

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do solo e da
Água



Dissertação

**Influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a qualidade
estrutural em um Argissolo no sul do RS**

Lara Fernandes Matoso

Pelotas, 2026

Lara Fernandes Matozo

**Influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a
qualidade estrutural em um Argissolo no sul do RS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Manejo e Conservação do Solo e da
Água da Universidade Federal de
Pelotas, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Ezequiel Cesar Carvalho Miola

Pelotas, 2026 Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas Catalogação da
Publicação

M425i Matozo, Lara Fernandes

Influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a
qualidade estrutural em um Argissolo no sul do RS [recurso eletrônico] /
Lara Fernandes Matozo ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, orientadora ;
Ezequiel Cesar Carvalho Miola, coorientador. — Pelotas, 2026.
83 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e
Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel,
Universidade Federal de Pelotas, 2026.

1. Estabilidade estrutural. 2. Atributos físicos. 3. Carbono orgânico.
4. Sustentabilidade. 5. Formação de agregados. I. Lima, Cláudia Liane
Rodrigues de, orient. II. Miola, Ezequiel Cesar Carvalho, coorient. III.
Título.

CDD 631.86

Elaborada por Ubirajara Buddin Cruz CRB: 10/901

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que estiveram ao meu lado ao longo dessa trajetória e que contribuíram, de alguma forma, para que este sonho se tornasse realidade.

Aos meus pais, Jorge e Luciane, ao meu irmão, Gabriel, e ao meu parceiro, Pedro Gabriel, por todo o amor, apoio e incentivo incondicionais. A confiança que sempre depositaram em mim foi fundamental para que eu acreditasse no meu potencial e seguisse adiante.

À minha orientadora, Prof^a. Cláudia Lima, agradeço pela orientação, pela disponibilidade, atenção e pelos valiosos ensinamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os quais foram essenciais para minha formação acadêmica e científica.

Ao meu co-orientador, Prof. Ezequiel Miola, pela orientação e contribuição no meu processo de formação, e todos conhecimentos compartilhados.

Aos meus amigos e colegas do PPG MACSA, em especial à Dienifer, Marcela e Diovana, agradeço pela amizade, apoio e parceria ao longo deste tempo, tornando a caminhada mais leve e significativa.

Aos professores e colaboradores do PPG MACSA e do Laboratório de Física do Solo, que de alguma forma contribuíram para minha formação e execução deste trabalho.

À agência financiadora, CAPES.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Pelotas (UFPeI), à Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pela oportunidade de realização do mestrado.

“Somos seres em construção e às vezes ainda é necessário reformar o que já foi construído, assim é o solo”. (Liah)

Resumo

MATOZO, Lara Fernandes. **Influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a qualidade estrutural em um Argissolo no sul do RS.** Orientadora: Prof^a. Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima. 2026. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2026.

A qualidade estrutural do solo é influenciada pelo uso e manejo, refletindo nos atributos físicos, químicos e biológicos. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho-Amarelo localizado na sub-bacia hidrográfica Micaela, no sul do Rio Grande do Sul. O estudo foi conduzido em duas propriedades rurais, considerando três sistemas de uso do solo: lavoura, pastagem e campo nativo. Foram avaliados atributos físicos, como densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, estabilidade de agregados em água e diâmetro médio ponderado (DMP), além de teores de carbono orgânico total (COT). Também foram identificadas as vias de formação dos agregados (biogênicos, fisiogênicos e intermediários) e realizada a avaliação visual da estrutura do solo pelo método VESS, nas camadas de 0,00 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. Os resultados indicaram que o campo nativo apresentou melhores condições estruturais, com menores valores de densidade do solo, variando entre 1,32 e 1,47 Mg m⁻³ e maiores valores de estabilidade de agregados, com DMP médio acima de 3,5 mm. Esse sistema também apresentou os maiores teores de COT, com valores médios superiores a 23 g kg⁻¹ na camada de 0,00 a 0,10 m, associados à maior proporção de macroagregados e predominância de agregados biogênicos. A pastagem apresentou valores médios de densidade próximos a 1,60 Mg m⁻³ e redução do DMP, indicando efeitos do pisoteio animal sobre a estrutura. A lavoura apresentou os menores valores de estabilidade estrutural, com DMP inferior a 3,0 mm, menores teores de COT, principalmente na camada de 0,10 a 0,20 m e predominância de agregados fisiogênicos. Os escores do VESS corroboraram os resultados quantitativos, mostrando-se eficiente na identificação de diferenças estruturais entre os sistemas de uso. Conclui-se que sistemas de uso com menor intensidade de manejo favorecem a conservação da estrutura do solo, destacando a importância de práticas que promovam o aporte de matéria orgânica e a atividade biológica para sustentabilidade dos agroecossistemas.

Palavras-chave: Estabilidade estrutural; Atributos físicos; Carbono orgânico; Sustentabilidade; Formação de agregados.

Abstract

MATOZO, Lara Fernandes. Influence of different land use and management systems on soil structural quality in an Ultisol in southern Rio Grande do Sul. Advisor: Prof. Dr. Cláudia Liane Rodrigues de Lima. 2026. Dissertation (Master's Degree in Soil and Water Management and Conservation) – Eliseu Maciel School of Agronomy, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2026.

Soil structural quality is influenced by land use and management, being reflected in physical, chemical, and biological attributes. This study aimed to evaluate the influence of different land use and management systems on the structural quality of a Red-Yellow Ultisol located in the Micaela watershed, in southern Rio Grande do Sul, Brazil. The study was conducted on two rural properties, considering three land use systems: cropland, pasture, and native grassland. Physical attributes were evaluated, including soil bulk density, total porosity, macro- and microporosity, aggregate stability in water, and mean weight diameter (MWD), as well as total organic carbon (TOC) contents. The pathways of aggregate formation (biogenic, physiogenic, and intermediate) were also identified, and soil structure was visually assessed using the Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) method, at depths of 0.00–0.10 m, 0.10–0.20 m, and 0.00–0.20 m. The results indicated that the native grassland exhibited better structural conditions, with lower soil bulk density values ranging from 1.32 to 1.47 Mg m⁻³ and higher aggregate stability, with mean MWD values above 3.5 mm. This system also showed the highest TOC contents, with mean values exceeding 23 g kg⁻¹ in the 0.00–0.10 m layer, associated with a higher proportion of macroaggregates and predominance of biogenic aggregates. Pasture presented mean bulk density values close to 1.60 Mg m⁻³ and reduced MWD, indicating the effects of animal trampling on soil structure. Cropland showed the lowest structural stability, with MWD values below 3.0 mm, lower TOC contents, especially in the 0.10–0.20 m layer, and predominance of physiogenic aggregates. VESS scores corroborated the quantitative results, proving to be effective in identifying structural differences among land use systems. It is concluded that land use systems with lower management intensity favor the conservation of soil structure, highlighting the importance of practices that promote organic matter input and biological activity for the sustainability of agroecosystems.

Keywords: Structural stability; Physical attributes; Organic carbon; Sustainability; Aggregate formation.

Lara Fernandes Matozo

Influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a qualidade estrutural em um Argissolo no sul do RS

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 23 de fevereiro de 2026

Banca examinadora:

Prof. Dr^a. Cláudia Liane Rodrigues de Lima (Orientadora)
Doutora em Agronomia pela Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Adilson Luís Bamberg
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas (UFPEl)

Prof. Dr. Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki
Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização das propriedades agrícolas situadas na sub-bacia Micaela inseridas na Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata e localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil	29
Figura 2 - Localização dos pontos de coleta de amostras de solo nas Propriedades 1 e 2, localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil	30
Figura 3 - Coleta de amostras indeformadas nas propriedades localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. (a) posicionamento dos anéis no solo; (b) anéis inseridos no solo; (c) remoção dos anéis do solo com o auxílio de uma pá de corte.....	31
Figura 4 - Coleta de amostras deformadas nas propriedades localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. (a) remoção da vegetação da área superficial do solo; (b) e (c) amostra deformada de solo; (d) amostra devidamente embalada e identificada.....	31
Figura 5 - Análise de estabilidade de agregados em água. (a) aparelho de oscilação vertical do tipo “Yoder”; (b) conjunto de peneiras de 9,52 a 4,76 mm; 4,76 a 2,00 mm; 2,00 a 1,00 mm; 1,00 a 0,25mm; 0,25 a 0,105 mm e <0,105 mm; (c) agregados imersos em água	33
Figura 6 - Análise de carbono orgânico total. (a) amostras de solo preparadas para o procedimento; (b) amostras de solo com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$)	35
Figura 7 - (a) bloco de solo recém extraído no campo; (b) e (c) bloco de solo com aproximadamente 0,15 x 0,15 x 0,20 m; (d) bloco após o rompimento manual pelos pontos de fraqueza para a caracterização da estrutura do solo	36
Figura 8 – Cartilha para Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)	37
Figura 9 - (a) análise da densidade de partículas pelo método do frasco de picnômetro; (b) anéis volumétricos após a realização do toailete; (c) amostras indeformadas prontas para a análise de porosidade e densidade; (d) análise de granulometria pelo método de Bouyoucos.....	39
Figura 10 - Valores médios de macroporosidade (%) na Propriedade 1, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)	47
Figura 11 - Valores médios de macroporosidade (%) na Propriedade 2, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)	48

Figura 12 - Valores médios de microporosidade (%) na Propriedade 1, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)	49
Figura 13 - Valores médios de microporosidade (%) na Propriedade 2, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)	50
Figura 14 - Valores médios de porosidade total (%) na Propriedade 1, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)	51
Figura 15 - Valores médios de porosidade total (%) na Propriedade 2, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)	52
Figura 16 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,00 a 0,10 m na Propriedade 1, localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso	53
Figura 17 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,10 a 0,20 m na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso	54
Figura 18 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,00 a 0,10 m na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso	55
Figura 19 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,10 a 0,20 m na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso	56
Figura 20 - Massa de agregados em % na Propriedade 1 com barras de desvio padrão na camada de 0,00 a 0,10 m localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da massa de agregados entre sistemas de uso	60

Figura 21 - Massa de agregados em % na Propriedade 2 com barras de desvio padrão na camada de 0,00 a 0,10 m localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da massa de agregados entre sistemas de uso 62

Figura 22 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos diferentes sistemas de uso do solo na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre sistemas de uso..... 64

Figura 23 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos diferentes sistemas de uso do solo na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre sistemas de uso..... 65

Figura 24 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos agregados biogênicos (B), fisiogênicos (F) e intermediários (I) nos diferentes sistemas de manejo na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre sistemas de uso .. 67

Figura 25 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos agregados biogênicos (B), fisiogênicos (F) e intermediários (I) nos diferentes sistemas de manejo na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre os sistemas 69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Frações granulométricas e densidade de partículas de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos nas camadas 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil..... 40

Tabela 2 - Frações granulométricas e densidade de partículas de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos nas camadas 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, na Propriedade 2 localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil..... 40

Tabela 3 - Estatística descritiva dos diferentes atributos físicos e químicos do solo, nas camadas de 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, na Propriedade 1, localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil 42

Tabela 4 - Estatística descritiva dos diferentes atributos físicos e químicos do solo, nas camadas de 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, na Propriedade 2, localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil 44

Tabela 5 - Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) em diferentes sistemas de uso do solo e camadas, na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) 58

Tabela 6 - Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) em diferentes sistemas de uso do solo e camadas, na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) 59

Tabela 7 - Avaliação visual da estrutura do solo (VESS), com respectivos escores e classes de qualidade estrutural, na camada de 0,00 - 0,20 m, em diferentes usos do solo (lavoura, pastagem e campo nativo) na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil..... 70

Tabela 8 - Avaliação visual da estrutura do solo (VESS), com respectivos escores e classes de qualidade estrutural, na camada de 0,00 - 0,20 m, em diferentes usos do solo (lavoura, pastagem e campo nativo) na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil..... 71

Sumário

1 Introdução	13
2 Objetivos	14
2.1 Geral	14
2.2 Específicos	14
3 Hipóteses	15
4 Revisão da literatura	16
4.1 Indicadores de Qualidade Estrutural do Solo	16
4.2 Estabilidade de Agregados	18
4.3 Agregados Biogênicos e Fisiogênicos	20
4.4 Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)	22
4.5 Agregação e Carbono Orgânico Total (COT)	24
4.6 Usos do Solo	26
5 Materiais e Métodos	27
5.1 Caracterização e histórico da área de estudo	27
5.2 Amostragem de solo	29
5.3 Estabilidade de Agregados em Água	32
5.4 Agregados Biogênicos e Fisiogênicos	33
5.5 Carbono orgânico total (COT)	34
5.6 Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)	35
5.7 Densidade, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, granulometria, umidade gravimétrica	38
5.8 Análises estatísticas	40
6 Resultados e discussão	41
6.1 Estabilidade de agregados em água	52
6.1.2 Diâmetro médio ponderado (DMP)	58
6.2 Agregados biogênicos e fisiogênicos	60

6.3 Distribuição do teor de carbono orgânico total nos sistemas de uso do solo e camadas	63
6.4 Distribuição do teor de carbono orgânico total nas diferentes classes de agregados	66
6.5 Análise visual da estrutura do solo (VESS)	70
7 Conclusão	69
8 Referências	70

1 Introdução

Para promover o uso sustentável dos recursos naturais, são necessárias informações sobre as condições físicas do solo, as quais contribuem para orientar práticas conservacionistas no meio agrícola e ambiental. Considerando a escala de bacias hidrográficas, a preservação dos ecossistemas naturais ganha relevância no âmbito econômico, social e cultural. Para um solo ser considerado ideal ao desenvolvimento das plantas é necessário apresentar adequada retenção de água, aeração, estabilidade dos agregados e baixa resistência ao crescimento de raízes.

As partículas de solo podem ser reunidas por meio de processos físicos, químicos e biológicos, resultando em agregados. A formação dos agregados se dá pela união das partículas, que após inúmeros ciclos bio-físico-químicos se agrupam, formando os microagregados, e a partir destes ocorrem os macroagregados (Tisdall & Oaedes, 1982). O estudo da gênese dos agregados do solo permite identificar a atuação de diferentes agentes que estão envolvidos na mudança da estrutura. Avaliar as vias de formação destes agregados em diferentes usos e manejos permite identificar a influência dos agentes biológicos como raízes e fauna do solo (Pereira *et al.*, 2021).

O uso dos recursos naturais tem aumentado de uma forma excessiva, e as bacias hidrográficas (BHs) têm sido adotadas como uma unidade de planejamento e gestão destes recursos. As bacias permitem planejamentos experimentais para estudos dos manejos utilizados e a conservação destes componentes naturais na BH, assim como a avaliação dos atributos do solo (Tuchtenhagen, 2018). O uso e manejo inadequado do solo resultam em efeitos negativos para a sua estrutura, afetando assim os atributos físicos como densidade, estabilidade de agregados e teor de carbono orgânico total (Silva *et al.*, 2018). Considerando que a bacia hidrográfica do Arroio Fragata, localizada no sul do Rio Grande do Sul representa uma unidade de planejamento e gestão ambiental de grande importância para a região, responsável pelo abastecimento de água para a população de Pelotas, possuindo uma extensa área com grande variabilidade de tipo de solos e usos da terra objetivou-se investigar de que forma diferentes usos e manejos podem alterar a formação e a estabilidade estrutural de um Argissolo Vermelho-Amarelo em duas propriedades na sub-bacia hidrográfica Micaela, localizada no sul do RS.

2 Objetivos

2.1 Geral

Investigar de que forma, diferentes usos e manejos do solo alteram a formação e a estabilidade estrutural de agregados de um Argissolo Vermelho-Amarelo em duas propriedades na sub-bacia hidrográfica Micaela, localizada no sul do RS.

2.2 Específicos

Os objetivos específicos visam:

- Determinar a densidade, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a estabilidade de agregados;
- Identificar e quantificar as vias de formação dos agregados do solo (biogênicos, fisiogênicos e intermediários);
- Quantificar os teores de carbono orgânico total e matéria orgânica dos diferentes tipos de agregados do solo (biogênicos, fisiogênicos e intermediários);
- Avaliar qualitativamente a estrutura do solo a partir do “Visual Evaluation of Soil Structure” (VESS);
- Analisar o comportamento dos atributos físicos em diferentes camadas e usos do solo, com base na caracterização dos parâmetros físicos e estruturais;
- Estimar a relação entre as propriedades físicas de cada área analisada a partir dos usos e manejos do solo, com base na análise conjunta dos atributos físicos, estruturais e do carbono orgânico do solo, visando compreender como esses indicadores se associam à qualidade estrutural do solo.

3 Hipóteses

- I) Os diferentes sistemas de uso e manejo promovem alterações na estrutura do solo.
- II) Alterações na estrutura do solo refletem modificações na estabilidade de agregados, nas vias de formação dos agregados e nos teores de carbono orgânico.
- III) Sistemas de uso e manejo com menor grau de interferência podem originar melhor qualidade estrutural do solo.
- IV) Existe relação positiva entre os teores de carbono orgânico e os índices de estabilidade de agregados do solo.
- V) A área de lavoura tende a apresentar maior predominância de agregados fisiogênicos, com menor teor de carbono orgânico e estabilidade estrutural do solo.

4 Revisão da literatura

4.1 Indicadores de Qualidade Estrutural do Solo

O solo é um recurso natural de grande importância, sendo fundamental tanto para a produção de alimentos quanto para a conservação ambiental. Nesse contexto, o estudo acerca da qualidade do solo tem se intensificado, e para esta avaliação existe um amplo conjunto de indicadores a serem utilizados, que possibilitam uma avaliação mais abrangente de suas condições e funções (Silva *et al.*, 2020). A qualidade do solo é um indicativo importante para a manutenção de toda a biodiversidade do ecossistema (Silva *et al.*, 2021). É fundamental para o desenvolvimento das espécies que habitam no solo e para a manutenção sustentável das culturas, além da garantia de alimentos para a população global (Silva *et al.*, 2021), sendo influenciada por fatores físicos, químicos e biológicos, que definem o potencial de capacidade dos solos em manter a sustentabilidade para a produção agrícola (Sobucki *et al.*, 2019). Para a caracterização da estrutura normalmente são utilizados métodos que estimam, principalmente, a compactação, a estabilidade de agregados e a morfologia do solo (Rabot *et al.*, 2018). Os indicadores físicos mais utilizados para avaliar a qualidade do solo são a estrutura, agregação, densidade, condutividade hidráulica, resistência a penetração, taxa de infiltração de água e porosidade (Reichardt & Timm, 2022).

A formação da estrutura do solo envolve dois níveis principais de agregação, sendo os microagregados, que se originam da associação entre partículas minerais, agentes floclantes (como cátions polivalentes e óxidos de ferro e alumínio) e matéria orgânica estabilizada, e os macroagregados, que formam-se a partir da união entre microagregados, matéria orgânica particulada e ação de raízes e hifas de fungos, que funcionam como agentes cimentantes, promovendo maior estabilidade estrutural. Essa estruturação influencia diretamente a formação do sistema poroso e o equilíbrio entre macro e microporos (Tisdall & Oades, 1982).

Os indicadores de qualidade podem representar propriedades físicas, químicas ou biológicas associadas aos diferentes processos que ocorrem, como a ciclagem de nutrientes, retenção hídrica, potencial de erosão, potencial de lixiviação, atividade biológica no solo, dentre outros (Silva *et al.*, 2020). Conhecer a qualidade dos solos é

importante para que ocorra um planejamento socioambiental, auxiliando os agricultores na conservação dos recursos naturais. Em algumas propriedades rurais do Brasil, as práticas de conservação do solo e da água são implementadas de forma inadequada, intensificando a erosão mesmo em áreas onde ocorre o plantio direto (Telles *et al.*, 2022). O preparo pode causar alterações no sistema poroso, e, dentre os processos que diminuem o funcionamento e a capacidade física do solo, destaca-se a compactação, como um dos principais indicadores da degradação física estrutural e diminuição da qualidade física, afetando os fluxos de ar e água e à resistência mecânica ao crescimento radicular. (Vizioli *et al.*, 2021). Os principais fatores estruturais que afetam o crescimento das plantas são o contato solo-raiz, aeração, disponibilidade de água e a baixa resistência mecânica. A porosidade adequada influencia profundamente o fluxo de água, gases e transporte de solutos, condições que, por sua vez, favorecem o desenvolvimento radicular e o crescimento das plantas (Wang & Zhang, 2024). O solo que possui boa estrutura proporciona uma adequada quantidade de poros, promovendo equilíbrio com a aeração do solo, que influencia tanto a movimentação da água quanto o crescimento das raízes das plantas (Reichardt & Timm, 2022).

A densidade do solo é uma das propriedades físicas mais relevantes para a caracterização estrutural, pois está diretamente associada ao grau de compactação, à porosidade e à distribuição de poros. Corresponde a relação entre a massa do solo seco e um determinado volume de solo, sendo amplamente utilizada como indicador da compactação e da qualidade física do solo (Paganos *et al.*, 2024). Essa propriedade é influenciada por diversos fatores, químicos, físicos e biológicos, e práticas de manejo (Giap & Ahmad, 2024). A relação entre densidade e estrutura também se estende aos impactos do manejo. A ação antrópica, especialmente o preparo do solo, o pisoteio animal e o tráfego de máquinas, pode aumentar significativamente os níveis de compactação do solo, reduzindo a porosidade e comprometendo o fluxo de água e gases (Rabot *et al.*, 2018).

A utilização responsável do solo para a produção de alimentos deve ser fundamentada na sustentabilidade. Práticas de manejo incorretas podem comprometer parcial ou totalmente a qualidade dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Campos *et al.*, 2022).

4.2 Estabilidade de Agregados

A agregação do solo é o resultado da interação entre as frações minerais, a matéria orgânica e os organismos vivos que habitam o solo (Salton *et al.*, 2017). Os agregados são formados a partir da união das partículas em associação com as atividades biológicas, que ocorrem no solo. A formação dos agregados é condicionada por diversos fatores, tais como os teores de argila, silte e areia, os processos de mineralização, a atuação de agentes de ligação, a presença de substâncias e exsudatos orgânicos, bem como os teores de matéria orgânica e carbono orgânico (Flora *et al.*, 2025).

A organização das partículas em agregados é fundamental para compreender o dinamismo do solo e sua importância para os diversos compartimentos ambientais, como a biosfera, atmosfera e hidrosfera (Salton *et al.*, 2017). A classificação dos agregados baseia-se em atributos como tamanho e forma, e a maneira como esses se organizam determina a formação de poros com diferentes tamanhos e formatos, influenciando diretamente em processos como infiltração, retenção de água, trocas gasosas, crescimento radicular, ciclagem de nutrientes e ocorrência de processos erosivos (Rabot *et al.*, 2018). Os agregados do solo aumentam a macroporosidade e a circulação de água, reduzindo a erosão e a resistência mecânica do solo ao crescimento radicular, contribuindo para maior absorção de água e nutrientes para as plantas (Pereira *et al.*, 2021).

Do ponto de vista funcional, os agregados são responsáveis por formar uma adequada estrutura do solo, promovendo maior porosidade, circulação de ar e água, desenvolvimento de raízes e maior resistência a alterações causadas por forças externas, como o pisoteio de animais e o uso de maquinário agrícola, além do impacto das gotas da chuva, que comprometem a estrutura do solo. Solos com agregados estáveis tendem a apresentar menor suscetibilidade à erosão, embora a estabilidade dos agregados possa ser modificada conforme o tipo de manejo adotado (Vicente *et al.*, 2012; Campos, 2021). Liu *et al.* (2025) destacam que a estabilidade de agregados é um indicador que está diretamente relacionado à resistência desagregação, quando submetidos a forças externas, como chuva intensa, tráfego de máquinas e processos de erosão.

Entre os fatores que influenciam a agregação do solo estão o teor de argila, os óxidos de ferro e alumínio, o carbonato de cálcio e, especialmente, a matéria orgânica, que atuam como agente cimentante (Vicente *et al.*, 2012). Alterações no teor de matéria orgânica afetam diretamente esse atributo, sendo que a redução do conteúdo orgânico está associada à diminuição da estabilidade (Tisdall & Oades, 1982). Embora exista correlação entre o teor de carbono orgânico do solo e a estabilidade dos agregados, esse efeito nem sempre resulta em maior estabilidade, uma vez que, apenas determinadas frações da matéria orgânica possuem a função agregante. Diferentes tipos de ligantes estão associados à estabilização dos agregados, podendo ser classificados conforme sua persistência no solo. Os ligantes transitórios são compostos por materiais orgânicos de rápida decomposição microbiana, como os polissacarídeos produzidos por microrganismos associados às raízes e à biomassa microbiana na rizosfera. Os ligantes temporários incluem raízes e hifas de fungos, que permanecem no solo por períodos (meses a anos) e são influenciados pelas práticas de manejo, atuando predominantemente, na estabilização de macroagregados e, por fim, os ligantes persistentes, que correspondem ao húmus, fração mais estável da matéria orgânica, com grande importância na manutenção da estrutura do solo ao longo do tempo (Tisdall & Oades, 1982).

Os agregados que apresentam estabilidade em água favorecem a infiltração e a manutenção da porosidade do solo, enquanto que os instáveis tendem a se romper facilmente, comprometendo a estrutura e aumentando a suscetibilidade à erosão (Vicente *et al.*, 2012).

A agregação está também associada à proteção física da matéria orgânica do solo, o que contribui para o sequestro de carbono ao dificultar sua decomposição por microrganismos e enzimas (Rabot *et al.*, 2018).

A estabilidade de agregados é considerada um dos atributos mais vulneráveis às alterações em decorrência das diferentes formas de uso e manejo do solo, constituindo em um indicador da qualidade física de áreas degradadas (Stumpf *et al.*, 2016). Práticas como a rotação de culturas, uso de plantas de cobertura e a redução do revolvimento mostram-se eficazes na recuperação da estrutura do solo, contribuindo para a sustentabilidade dos agroecossistemas (Gentsch *et al.*, 2024). Estudos demonstram que fatores climáticos como, temperatura e umidade, influenciam de forma significativa a estabilidade de agregados, evidenciando a sensibilidade estrutural do solo a variações ambientais e climáticas, reforçando seu

papel como indicador da qualidade do solo frente às mudanças ambientais (Dowdeswell-Downey *et al.*, 2023).

4.3 Agregados Biogênicos e Fisiogênicos

Os agregados do solo são formados a partir da união de partículas primárias de origem mineral e/ou orgânica, sendo influenciada por processos físicos, químicos e biológicos, podendo ser classificados de acordo com a sua gênese em três categorias, biogênicos, fisiogênicos e intermediários (Batista, 2011; Campos *et al.*, 2022). A formação de agregados no solo está associada à sua qualidade, fatores essenciais para a produção de alimentos, e podem ser classificados como biogênicos, quanto derivados da ação de fauna do solo e raízes, ou fisiogênicos, quando originados de fatores físico-químicos (Shimosaka, 2022).

Os agregados classificados como biogênicos têm origem na atividade da macrofauna edáfica do solo, especialmente dos organismos pertencentes à classe Oligochaeta, como as minhocas, cuja ação no solo, por meio da ingestão e excreção de material orgânico e mineral, resulta na formação de estruturas arredondadas, ricas em matéria orgânica. Esse tipo de agregado pode, inclusive, apresentar raízes visíveis em sua composição, em razão da interação com o sistema radicular das plantas. A presença de agregados biogênicos tem sido associada à maior estabilização física da matéria orgânica e à melhoria das propriedades estruturais e biológicas, destacando-se como indicadores sensíveis da qualidade do solo (Campos *et al.*, 2022; Batista, 2011).

Os agregados fisiogênicos são formados principalmente por processos físico-químicos, como os ciclos naturais de secagem e umedecimento, além da atuação de agentes cimentantes, incluindo húmus, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, os quais, promovem a coesão entre partículas minerais. Esses agregados possuem morfologia mais regular, com formatos angulares ou prismáticos, e sua formação ocorre de maneira progressiva em ambientes onde a atividade biológica é menos expressiva (Batista, 2011; Rossi *et al.*, 2016).

Além desses dois tipos, existem os agregados intermediários, que não apresentam morfologia arredondada ou angular. Os agregados intermediários podem se originar da degradação ou pelo envelhecimento de agregados biogênicos, os quais

perdem suas características originais com o tempo, ou ainda, da interação entre agregados fisiogênicos e materiais orgânicos, como coprólitos. Assim, em situações nas quais não há distinção evidente entre as vias de formação biológica e físico-química, os agregados são classificados como intermediários (Batista, 2011; Batista *et al.*, 2013).

A principal diferença que estes agregados possuem é evidenciada com base em suas características visuais e morfológicas, destacando o formato, o tamanho e a presença de raízes (Pulleman *et al.*, 2005; Pinto *et al.*, 2021a). A distinção entre esses três tipos de agregados não é apenas morfológica, mas também química. Estudos demonstram que os agregados biogênicos possuem, em geral, maiores teores de carbono e nitrogênio, indicando uma maior qualidade química em comparação aos fisiogênicos, que, por sua vez, se assemelham mais aos intermediários em termos de composição (Batista *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2021). Essa diferenciação química evidencia que a gênese dos agregados exerce papel determinante nas propriedades físico-químicas, uma vez que a classe de agregados biogênicos destaca-se como importante indicador da qualidade estrutural e biológica, uma vez que, contribui para a estabilidade física da matéria orgânica, aumentando sua proteção contra a decomposição do solo (Campos *et al.*, 2022; Silva Neto *et al.*, 2016).

A proporção dos diferentes tipos de agregados está diretamente relacionada ao manejo do solo, onde sistemas com menor intensidade de revolvimento tendem a apresentar maior proporção de agregados biogênicos, estando relacionado com atividade biológica mais intensa e uma estrutura mais estável de solo (Pinto *et al.*, 2021a). As minhocas presentes no solo, podem influenciar diretamente na formação dos agregados, afetando a proteção física da matéria orgânica contra a decomposição microbiana. Práticas agrícolas que favorecem a fauna edáfica, como o uso de plantas de cobertura e a redução do preparo convencional, contribuem para a formação de agregados biogênicos e, conseqüentemente, para uma agricultura mais sustentável (Pulleman *et al.*, 2005; Silva Neto *et al.*, 2016).

Além das características morfológicas e químicas, os tipos de agregados também diferem quanto ao seu desempenho físico, onde os agregados biogênicos, por apresentarem maior teor de matéria orgânica e estrutura mais porosa, costumam ter maior estabilidade em água e favorecem a formação de poros maiores e os fisiogênicos apresentam valores inferiores de diâmetro médio e resistência à desagregação, o que pode comprometer a estrutura do solo, especialmente em áreas

intensivamente manejadas (Silva Neto *et al.*, 2016). Pesquisas referente à gênese de agregados não apenas ampliam a compreensão sobre a dinâmica desses agregados e seus processos associados, mas também possibilitam sua qualificação como importantes indicadores da qualidade do solo (Silva Neto *et al.*, 2016).

Reconhecer a origem e a morfologia dos agregados possibilita avaliar com maior precisão os efeitos do manejo e da cobertura do solo sobre os processos de formação e estabilização estrutural. A classificação dos agregados a partir de sua gênese tem se consolidado como uma abordagem relevante no Brasil, permitindo inferências sobre a qualidade estrutural, biológica e química do solo em diferentes sistemas de uso e manejo (Pereira *et al.*, 2021; Campos *et al.*, 2022).

4.4 Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)

A avaliação da estrutura do solo por meio de métodos visuais tem ganhado destaque nas últimas décadas, sobretudo por se tratarem de ferramentas práticas, acessíveis, rápidas e de baixo custo, as quais permitem análises feitas diretamente no campo e de fácil compreensão (Guimarães *et al.*, 2011; Araújo *et al.*, 2013; Askari *et al.*, 2013). Existem na literatura vários métodos de avaliação visual, sendo os mais comumente utilizados os de Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) “Visual Evaluation Soil Structure” (Ball *et al.*, 2007) e de Avaliação Visual do Solo (VSA) “Visual Soil Assessment” (Shepherd, 2009).

A avaliação visual da estrutura do solo, “Visual Evaluation of Soil Structure” (VESS), foi originalmente desenvolvido por Peerlkamp (1959), que propôs um sistema de avaliação visual da estrutura do solo com base na análise de blocos indeformados. Posteriormente, o método foi aprimorado e sistematizado por Ball *et al.* (2007), que o denominaram Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). Esse sistema passou a ser amplamente adotado em diversos países, inclusive no Brasil, onde foi adaptado por Guimarães *et al.* (2011) para as condições edafoclimáticas nacionais.

O VESS consiste em um método semiquantitativo baseado na análise de um bloco de solo extraído cuidadosamente e de preferência quando o solo se encontra úmido, para preservar a sua estrutura. O bloco tende a se fragmentar e a retirada torna-se mais difícil quando o solo se encontra seco, o que pode comprometer a precisão da avaliação, tornando-a imprecisa. O bloco é avaliado visualmente quanto

a forma, estabilidade, tamanho e porosidade dos agregados, presença e distribuição de raízes, cor e atividade da fauna do solo (Ball *et al.*, 2007; Guimarães *et al.*, 2011). A classificação é feita por meio de uma escala de escores de 1 a 5, em que 1 representa uma estrutura excelente (solo friável, bem estruturado) e 5 uma estrutura degradada (solo compacto, com baixa porosidade e raízes deformadas). A atribuição de escores e o cálculo do escore final são realizados por meio de média ponderada, conforme Guimarães *et al.* (2011).

Guimarães *et al.* (2011), ao adaptar o método, incluiu uma chave visual com fotografias ilustrativas que exemplificam as diferentes classes de qualidade estrutural, facilitando a aplicação do método a campo, inclusive por agricultores e técnicos. Além disso, o VESS incorpora indicadores biológicos, como a atividade da fauna do solo, reconhecendo seu papel na formação e manutenção da estrutura do solo. A presença de minhocas nos agregados indica boa qualidade estrutural, enquanto sua ausência, em conjunto à predominância de agregados angulares e sem porosidade visível, indica degradação e, necessidade de intervenção por práticas conservacionistas (Guimarães *et al.*, 2011).

O VESS tem se mostrado uma ferramenta eficiente para a avaliação da estrutura de solos sob plantio direto, especialmente em áreas com diferentes históricos de uso, sendo capaz de identificar camadas compactadas que restringem o desenvolvimento radicular (Giarola *et al.*, 2013). Trata-se de uma ferramenta eficaz para detectar alterações nos agroecossistemas, além de contribuir significativamente para o monitoramento ambiental e para a análise de áreas manejadas sob práticas conservacionistas (Araújo *et al.*, 2013).

Estudos mais recentes reforçam essas contribuições, Tuchtenhagen *et al.* (2018) afirmam que os métodos visuais de avaliação estrutural, com destaque para o VESS, têm se tornado cada vez mais comum, por proporcionarem dados qualitativos confiáveis, além de facilitarem a comunicação técnica entre agricultores e pesquisadores. Segundo os autores, o VESS vem sendo utilizado não apenas em pesquisas, mas também na consultoria técnica e ensino, tornando-se uma importante ferramenta diagnóstica. A aplicação do VESS tem sido valorizada por seu papel na identificação de limitações produtivas relacionadas à estrutura do solo, sua facilidade de execução, aliada ao baixo custo, fortalece o uso do método no contexto da agricultura familiar e de base agroecológica.

Guimarães *et al.* (2017) reforçam que a necessidade de diagnósticos rápidos e confiáveis da qualidade do solo aprimoram o desenvolvimento e a adoção de métodos como o VESS, que possibilitam a identificação de áreas degradadas, o monitoramento da qualidade ao longo do tempo e a tomada de decisão quanto ao uso e manejo do solo. Além dos atributos visuais e estruturais diretamente observados, o VESS reconhece o papel fundamental da fauna do solo no controle da porosidade e na formação e estabilização dos agregados. A incorporação da matéria orgânica úmida no solo por alguns grupos de organismos do solo, como minhocas, cupins, formigas e besouros coleópteros, responsáveis pela formação e estabilização de agregados do solo. Dessa forma, o método não apenas atua como indicador da qualidade estrutural, mas também orienta práticas de manejo voltadas à promoção da atividade biológica, fator determinante para a resiliência, funcionalidade e sustentabilidade dos solos agrícolas ao longo do tempo (Tisdall & Oades, 1982).

4.5 Agregação e Carbono Orgânico Total (COT)

O carbono orgânico no solo desempenha um papel fundamental na manutenção da fertilidade e da sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas, especialmente devido à sua participação nos processos de agregação, retenção de água e disponibilidade de nutrientes. A dinâmica do carbono está condicionada pelo tipo de manejo adotado e pela influência de fatores abióticos, como temperatura, radiação solar e umidade, os quais influenciam na degradação da matéria orgânica e consequentemente na concentração de carbono no solo. Observa-se, ainda, que tanto os maiores teores quanto as maiores perdas de carbono se concentram nas camadas mais superficiais do solo, onde a atividade microbiana e a ação dos fatores ambientais são mais intensas, regulando os processos biogeoquímicos relacionados à matéria orgânica (Ahmed *et al.*, 2024).

Práticas conservacionistas como o uso de plantas de cobertura em sistemas de plantio direto têm demonstrado potencial significativo na recuperação e aumento dos teores de COT, promovendo o acúmulo de matéria orgânica e melhorando a estrutura física do solo (Gentsch *et al.*, 2024). A estruturação do solo, por sua vez, está diretamente associada à formação e estabilidade de agregados, que exercem um papel fundamental na proteção física do carbono, reduzindo sua taxa de

decomposição e favorecendo o sequestro no solo (Fernandes *et al.*, 2017; Rillig *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2023).

A agregação do solo não apenas melhora a qualidade estrutural e a capacidade hídrica, mas também como um mecanismo necessário para o armazenamento e a conservação do carbono orgânico. A formação de agregados estáveis contribui significativamente para os estoques de carbono e para a manutenção da fertilidade do solo, sendo influenciada tanto pelas práticas de manejo quanto pelas características do solo (Rillig *et al.*, 2017; Fernandes *et al.*, 2017). Contudo, o conhecimento atual sobre a interação entre agregação do solo e COT ainda é limitado, dificultando a compreensão dos processos que regulam sua dinâmica e estabilidade ao longo do tempo (Zhao *et al.*, 2023).

Além dos fatores estruturais, aspectos físico-químicos como densidade, teor de argila, pH e presença de óxidos de ferro influenciam diretamente os estoques de COT e sua distribuição nas diferentes frações do solo. Solos com alta densidade, por exemplo, tendem a apresentar menor conteúdo de carbono e maior suscetibilidade à decomposição da matéria orgânica (Wu *et al.*, 2022).

A compreensão da dinâmica do carbono é essencial para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo agrícola. A adoção de práticas adequadas depende do conhecimento sobre os processos que influenciam os estoques de carbono e sua estabilidade ao longo do tempo. Isso é particularmente relevante diante das alterações provocadas pelas mudanças no uso da terra, que impactam diretamente os fluxos de carbono no solo (Medeiros *et al.*, 2021). A adoção de plantas de cobertura, aliada ao pastejo rotacionado, configura um conjunto de práticas conservacionistas reconhecidas por contribuírem para o aumento da estabilidade dos agregados e aumento de carbono orgânico no solo. Quando adotadas de forma integrada, essas estratégias tendem a intensificar os efeitos quando comparados à aplicação isolada, pois promovem simultaneamente a proteção física do solo e o aporte contínuo de resíduos orgânicos (Hamido *et al.*, 2025).

Nos últimos anos, estudos têm enfatizado a importância do monitoramento contínuo dos teores de carbono orgânico nos solos como forma de orientar decisões de manejo, restaurar os agroecossistemas e mitigar os impactos da degradação ambiental. A incorporação de abordagens integradas, que considerem simultaneamente os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, tem se mostrado indispensável para entender a complexa dinâmica do COT (Basile-Doelsch *et al.*,

2020). Estudos sobre a agregação do solo e o carbono orgânico são essenciais para compreender de que forma diferentes práticas de manejo influenciam a estrutura do solo e os processos de retenção de carbono (Tanaka *et al.*, 2024).

O monitoramento do carbono orgânico do solo é também essencial para embasar políticas de conservação e promover ajustes no uso e manejo da terra, uma vez que, a conservação dos estoques de carbono está diretamente relacionada à sustentabilidade agrícola e à mitigação das mudanças climáticas globais (Li *et al.*, 2024).

4.6 Usos do Solo

Os sistemas de uso do solo podem ser classificados de acordo com as práticas de manejo, a intensidade de cultivo e sua finalidade produtiva, englobando desde áreas agrícolas com culturas anuais até sistemas destinados ao pastejo, diferenciando-se de ecossistemas naturais ou de vegetação permanente (Rodríguez *et al.*, 2024).

Áreas de lavoura de milho caracterizam-se como sistemas agrícolas baseados no cultivo de espécies anuais, com ciclo produtivo definido e elevado nível de intervenção, envolvendo práticas como semeadura, adubação e colheita (Bhat *et al.*, 2024). Em contraste, os sistemas de pastagem são voltados à produção de forragem, sendo compostos predominantemente por gramíneas adaptadas às condições locais e submetidas ao pastejo animal, o que confere a esses sistemas uma dinâmica própria de interação entre solo, plantas e microrganismos (Lima *et al.*, 2023; Rocha *et al.*, 2020). Além disso, as pastagens podem apresentar elevada biodiversidade e desempenhar simultaneamente funções produtivas e ecológicas.

Os campos nativos, por sua vez, representam sistemas com menor grau de interferência antrópica, sendo frequentemente utilizados como referência em estudos de qualidade do solo. Esses ambientes são caracterizados por elevada diversidade biológica e maior eficiência nos processos de ciclagem de nutrientes, quando comparados a sistemas agrícolas (Giménez *et al.*, 2025).

As diferenças entre esses sistemas de uso do solo refletem diretamente nos atributos físicos e no carbono do solo, sendo a matéria orgânica um dos principais fatores responsáveis por essa diferenciação (Kunde *et al.*, 2018). O manejo adotado em cada sistema exerce papel fundamental na modulação dessas propriedades,

influenciando a estrutura do solo, a estabilidade de agregados e os processos microbianos associados (Gentsch *et al.*, 2024).

No caso das pastagens, a elevada produção de biomassa radicular e a constante deposição de resíduos vegetais contribuem para a formação e estabilização de agregados, além de estimular a atividade microbiana. No entanto, a presença de animais pode provocar alterações físicas no solo devido ao pisoteio, como o aumento da densidade e a redução da porosidade. Ainda assim, quando manejado adequadamente, o pastejo pode favorecer a ciclagem de nutrientes e o acúmulo de carbono no solo (Cerecetto *et al.*, 2024; Simon *et al.*, 2024).

Em sistemas agrícolas, especialmente sob plantio direto, práticas conservacionistas têm sido apontadas como estratégias eficientes para a manutenção e incremento do carbono orgânico do solo, contribuindo também para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (De Los Rios *et al.*, 2022). De forma geral, a adoção de práticas conservacionistas é fundamental para a sustentabilidade dos agroecossistemas e para a proteção ambiental (Araújo *et al.*, 2013).

5 Materiais e Métodos

5.1 Caracterização e histórico da área de estudo

O estudo foi conduzido em duas propriedades situadas no interior do município de Pelotas, no Rio Grande do Sul, Brasil, no Passo da Micaela. Essas áreas encontram-se inseridas na Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata, pertencente ao Bioma Pampa, uma região reconhecida por sua importância ecológica e produtiva. Cada propriedade possui aproximadamente 7 (sete) hectares, representando sistemas de uso, típicos da agricultura familiar da região.

Na Propriedade 1, a área de lavoura encontrava-se em seu primeiro ano de cultivo de milho, tendo sido anteriormente manejada sob sistema de pastagem, com milheto no período de verão e azevém no inverno. Após a colheita do milho, realizou-se a adubação com NPK. Destaca-se que a pastagem de azevém atualmente na área é proveniente de ressemeadura. Enquanto a área de pastagem apresenta histórico recente de consórcio entre azevém e aveia, sucedido pelo cultivo de milho no verão. No período de verão subsequente, a área permaneceu em pousio. Ainda no inverno,

foi realizada gradagem seguida de adubação com NPK, sendo a pastagem de azevém estabelecida por ressemeadura natural.

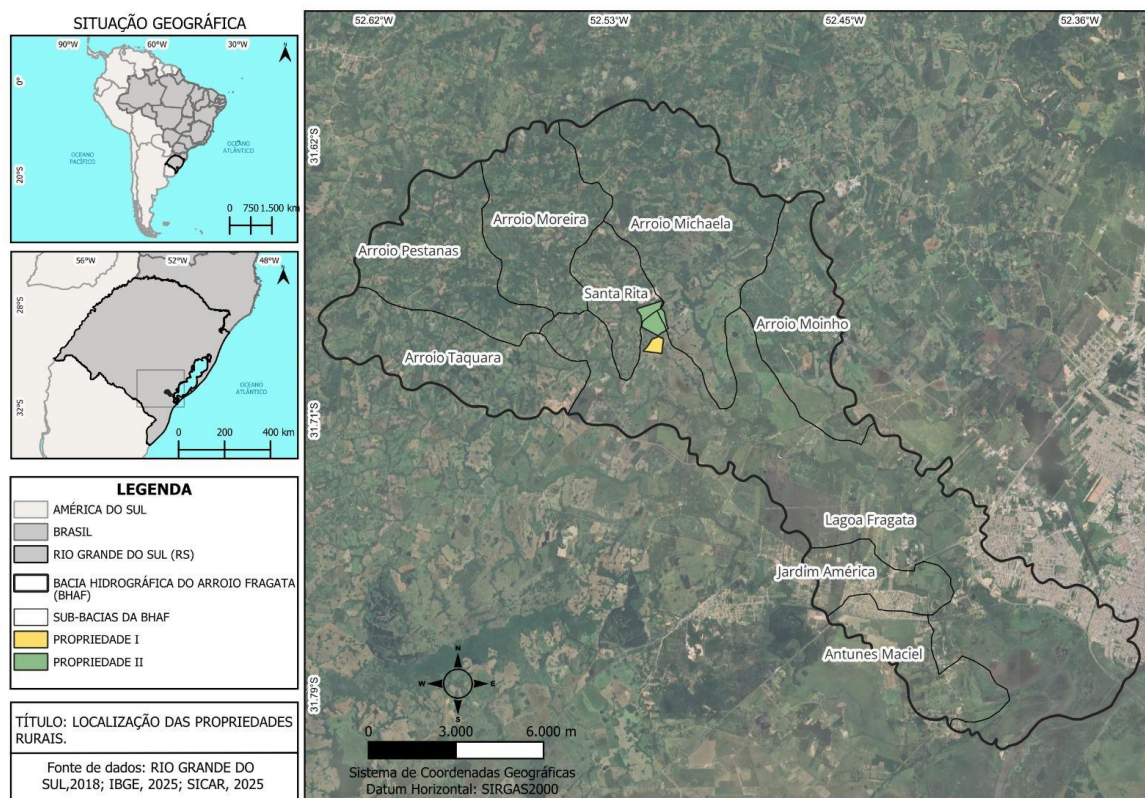
Na Propriedade 2, a área de lavoura encontrava-se em pousio, sendo anteriormente cultivado milho nos últimos 6 anos, realizando adubação com NPK. Na área de pastagem, havia sido semeado azevém, para utilização na alimentação do gado presente na área.

Em ambas propriedades, na área de campo nativo, área sem cultivo agrícola e com regeneração natural da vegetação, havia a presença de gado, assim como nas demais áreas. Os animais transitavam entre as áreas das propriedades durante diferentes épocas do ano.

O solo predominante é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa (Tabelas 1 e 2) (Santos *et al.*, 2025). O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948) é do tipo subtropical úmido (Cfa) (Alvares *et al.*, 2013). A precipitação média anual é de 1.385,6 mm, com maior concentração nos meses de fevereiro (189,7 mm) e julho (129,5 mm). Os menores índices ocorrem em março (90,6 mm) e maio (99,3 mm). A temperatura média anual apresenta variações entre 12,5 °C, nos meses mais frios, e 23,3 °C, nos meses mais quentes (Santos *et al.*, 2025).

Foram selecionados três sistemas de uso do solo com diferentes coberturas vegetais, em ambas propriedades, que refletem as principais formas de uso e manejo observadas nas propriedades. As áreas constituem de i) cultivo de milho, conduzida sob sistema de plantio direto, destinada à produção de grãos; ii) pastagem cultivada voltada ao pastejo animal, manejada com espécies forrageiras anuais de inverno e verão e iii) campo nativo sem cultivo agrícola, com regeneração natural da vegetação, embora sujeita ao pisoteio do gado.

Figura 1 - Localização das propriedades agrícolas situadas na sub-bacia Micaela inseridas na Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata e localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil



5.2 Amostragem de solo

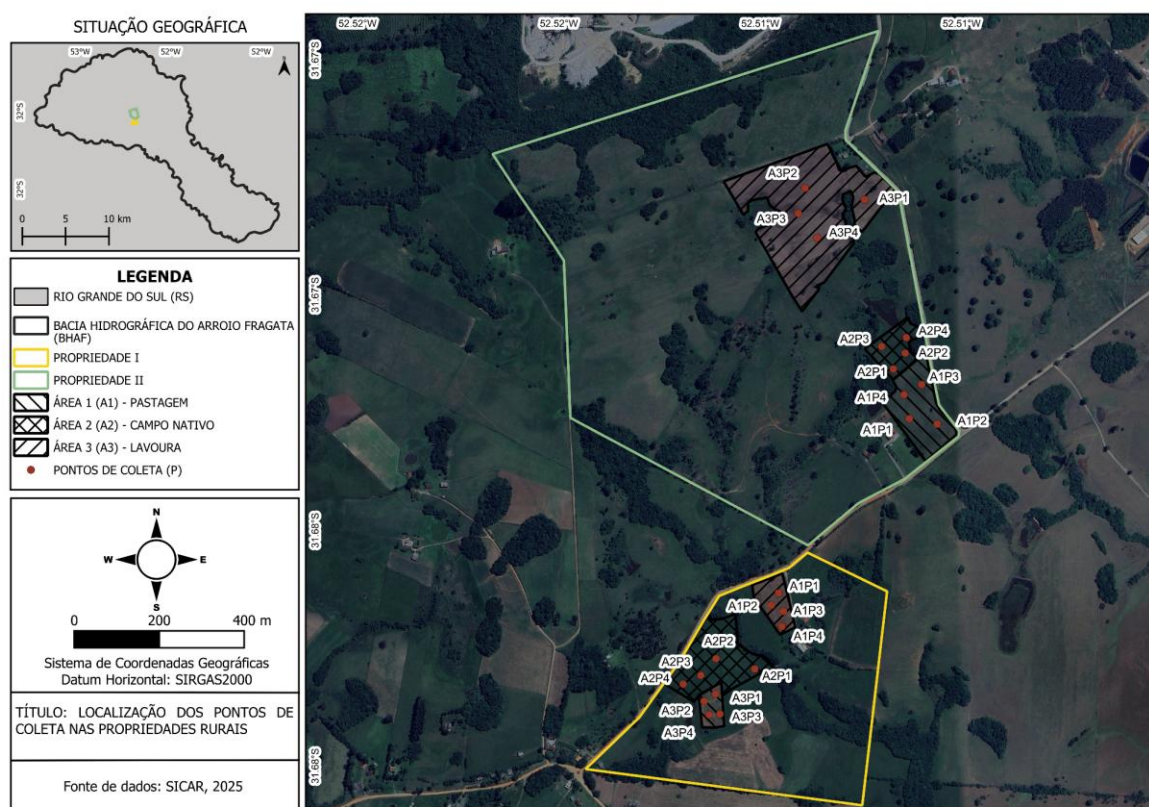
No segundo semestre do ano de 2024, para avaliação dos atributos físicos foram coletadas, aleatoriamente, em posições topográficas diferenciadas (altas, intermediárias e baixas), amostras de solo com estrutura preservada e não preservada na camada de 0,00 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m e 0,00 a 0,20 m.

Foram coletados quatro pontos amostrais no interior de cada área. Em cada ponto, obtiveram-se três repetições de amostras indeformadas nas camadas de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, além de duas amostras deformadas, uma em cada camada, destinadas às análises físicas. Adicionalmente, foi coletada uma amostra indeformada na camada de 0,00 a 0,20 m para a realização da avaliação visual da estrutura do solo (VESS).

Para a obtenção das amostras de solo foram realizadas aberturas de trincheiras de 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m e retiradas as amostras deformadas e indeformadas nas camadas de 0,00 a 10 m, 0,10 a 0,20 m e 0,00 a 0,20 m. As

amostras indeformadas foram extraídas utilizando anéis volumétricos de 5 cm de altura x 5 cm de diâmetro para determinação da densidade (D_s), macro (Ma) e microporosidade (Mi). Enquanto as amostras deformadas foram retiradas com auxílio de uma pá de corte, em blocos, para determinação de estabilidade de agregados, classificação de agregados biogênicos e fisiogênicos, e análise de carbono orgânico total, bem como a amostra indeformada utilizada para a análise do VESS.

Figura 2 - Localização dos pontos de coleta de amostras de solo nas Propriedades 1 e 2, localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil



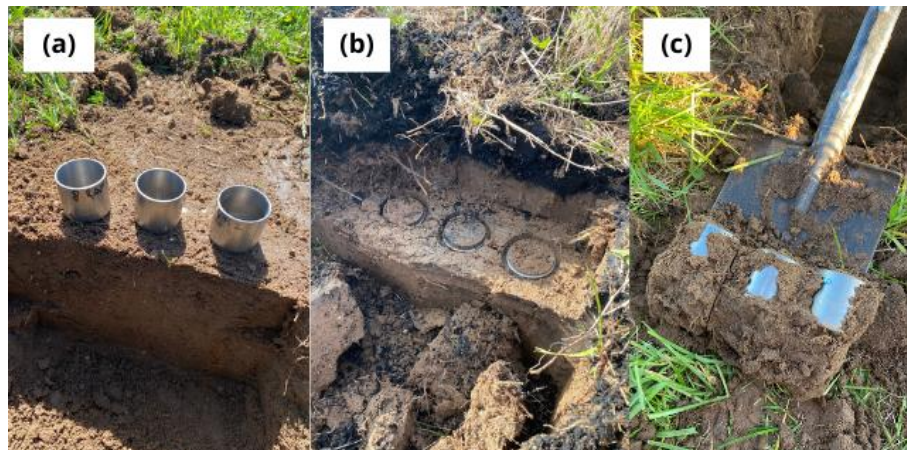
As amostras de solo coletadas foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo, da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPeI), para a realização das análises previamente comentadas.

Em laboratório, com as amostras indeformadas foram realizadas determinações de densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), da macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), respectivamente, conforme Embrapa (2011).

A amostras deformadas foram colocadas em tabuleiros de madeira para a secagem ao ar, até atingirem o ponto de friabilidade, sendo peneirada em peneira com malha de 2 mm, para a determinação da densidade de partículas (D_p),

granulometria e carbono orgânico, e em uma malha de 9,4 mm para estabilidade de agregados em água e classificação morfológica de agregados biogênicos, fisiogênicos e intermediários.

Figura 3 - Coleta de amostras indeformadas nas propriedades localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. (a) posicionamento dos anéis no solo; (b) anéis inseridos no solo; (c) remoção dos anéis do solo com o auxílio de uma pá de corte



Fonte: Autora

Figura 4 - Coleta de amostras deformadas nas propriedades localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. (a) remoção da vegetação da área superficial do solo; (b) e (c) amostra deformada de solo; (d) amostra devidamente embalada e identificada



Fonte: Autora

5.3 Estabilidade de Agregados em Água

Para determinação da estabilidade de agregados foi realizado o peneiramento úmido seguindo a metodologia de Kemper & Rosenau (1986), que permite determinar a estabilidade dos agregados pela distribuição dos agregados por classes de tamanho e calcular o diâmetro médio ponderado (DMP), utilizando o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936).

Foram utilizadas amostras deformadas coletadas com o auxílio de uma pá de corte, tendo o cuidado de preservar ao máximo a sua estrutura. No laboratório as amostras foram secas ao ar e quando apresentaram um teor de umidade correspondendo ao ponto de friabilidade foram peneiradas em uma peneira com malha de 9,52 mm.

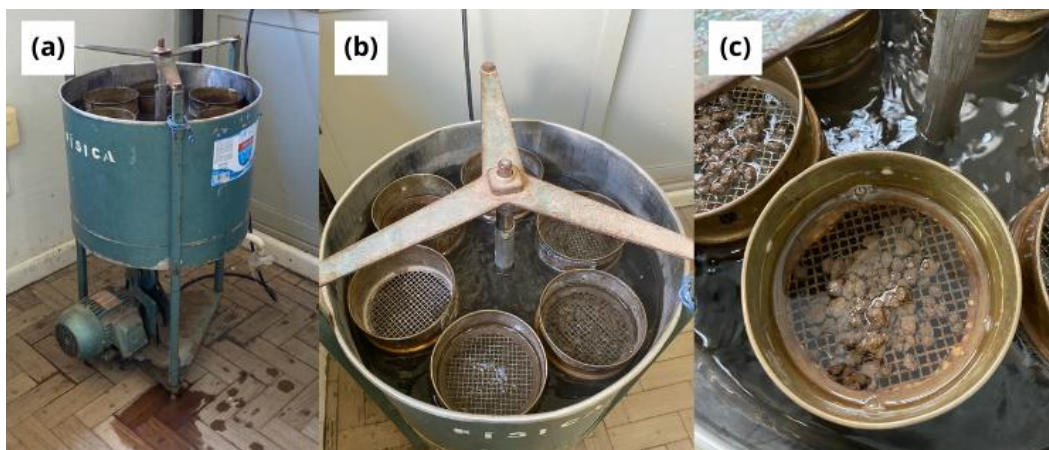
Para a determinação foram utilizadas cerca de 250 g de amostra seca ao ar, separadas em 4 partes, sendo uma utilizada para a determinação da umidade e as outras como repetições para a determinação da estabilidade dos agregados. Cerca de 50g de amostra foram colocadas na primeira peneira de cada jogo de peneiras, constituído das peneiras de 9,52 a 4,76 mm; 4,76 a 2,00 mm; 2,00 a 1,00 mm; 1,00 a 0,25mm; 0,25 a 0,105 mm e <0,105 mm. O aparelho funcionou durante 10 minutos de modo que permitisse 30 oscilações por minuto. Após esse período foi retirado o material retido em cada uma das peneiras e colocado em estufa a 105 °C por um período de 24 horas, para obtenção da massa de agregados seco.

Com base nessas classes, os agregados foram distinguidos em macroagregados, definidos como aqueles com diâmetro superior a 0,25 mm, e microagregados, correspondentes aos de diâmetro inferior a 0,25 mm (Tisdall & Oades, 1982). O cálculo do diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) foi realizado a partir da equação abaixo:

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^n D M_i (MAGR_i - m_i)}{\sum_{i=1}^n MAGR_i - m_i}$$

Onde: DMP = diâmetro médio da classe i (mm); MAGR_i= massa de agregados + material inerte na classe i (g); m_i = massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe i (g).

Figura 5 - Análise de estabilidade de agregados em água. (a) aparelho de oscilação vertical do tipo “Yoder”; (b) conjunto de peneiras de 9,52 a 4,76 mm; 4,76 a 2,00 mm; 2,00 a 1,00 mm; 1,00 a 0,25mm; 0,25 a 0,105 mm e <0,105 mm; (c) agregados imersos em água



Fonte: Autora

5.4 Agregados Biogênicos e Fisiogênicos

A caracterização morfológica dos agregados do solo foi realizada a partir de amostras deformadas coletadas na camada superficial de 0,00 a 0,10 m. A escolha dessa camada baseou-se na sua maior sensibilidade às alterações promovidas pelos sistemas de uso e manejo, além de concentrar a maior parte da atividade biológica e do aporte de resíduos orgânicos.

Após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado manualmente e submetido a peneiramento em malhas de um intervalo de 9,50 a 4,76 mm de diâmetro. Para a avaliação morfológica, selecionaram-se os agregados retidos neste intervalo, considerados representativos para a análise por permitirem a distinção mais clara das vias de formação. De cada repetição e área foram pesados 50g de agregados, destinados à quantificação da contribuição relativa a base de massa.

A separação e a classificação dos agregados foram realizadas manualmente sob lupa binocular, de acordo com os critérios morfológicos propostos por Bullock *et al.* (1985), adaptados por Pulleman *et al.* (2005) e, posteriormente validados por Pereira *et al.* (2021). O procedimento consistiu em identificar os agregados de acordo com a via predominante de formação, distinguindo-se três classes: biogênicos, fisiogênicos e intermediários.

5.5 Carbono orgânico total (COT)

Além da classificação morfológica, parte dos agregados foi destinada à caracterização química. Para tanto, o material foi destorroado e peneirado em malha de 2,0 mm, obtendo-se uma amostra de terra fina seca ao ar (TFSA). A partir dessa amostra, determinou-se o teor de carbono orgânico total (COT) pelo método de Walkley-Black, que consiste na oxidação úmida da matéria orgânica do solo por dicromato de potássio em meio ácido, seguido de titulação. Essa análise permitiu relacionar a origem dos agregados com a quantidade de carbono associada a cada classe estrutural.

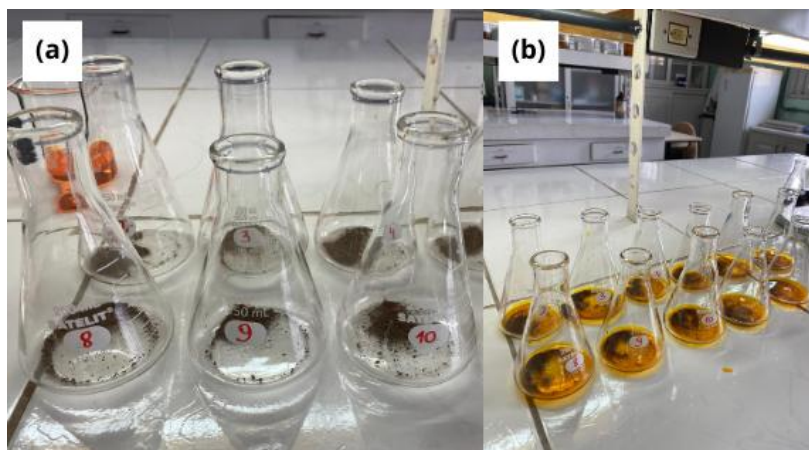
A determinação do carbono orgânico total do solo foi realizada pelo método de Walkley-Black, que consiste na oxidação úmida da matéria orgânica por meio de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido (H_2SO_4), utilizando 2g de solo, seguindo a metodologia de Tedesco *et al.* (1995). Nesse processo, parte do carbono orgânico é oxidada e o excesso de dicromato residual é quantificado por titulação com solução de sulfato ferro-amoniaco $[(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$, utilizando indicador ferroína para a identificação do ponto final da amostra.

O cálculo do teor de carbono orgânico é obtido a partir da diferença entre o volume gasto na titulação da amostra e do branco, considerando que 1 mL de solução 1 N de dicromato corresponde a aproximadamente 3mg de carbono. Como a oxidação não é completa, aplica-se o fator de correção de 1,3, conforme proposto originalmente por Walkley e Black (1934).

A matéria orgânica é obtida multiplicando o teor de COT pelo fator de van Bemmelen (1,724), com base no pressuposto de que a matéria orgânica contém 58% de carbono orgânico (Walkley & Black, 1934).

Para realizar a determinação do carbono orgânico nos agregados biogênicos, fisiogênicos e intermediários, após a separação, estes foram macerados em gral para então realizar a análise com o método Walkley-Black.

Figura 6 - Análise de carbono orgânico total. (a) amostras de solo preparadas para o procedimento; (b) amostras de solo com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$)



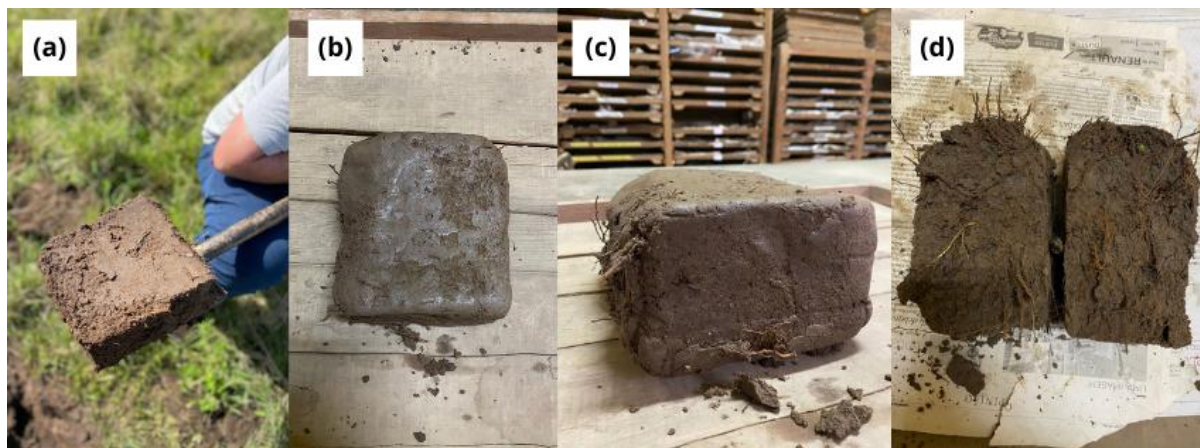
Fonte: Autora

5.6 Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)

A avaliação visual da estrutura do solo “Visual Evaluation of Soil Structure” (VESS) foi realizada conforme metodologia de Ball *et al.*, (2007), caracterizada pela extração de blocos de solo, na camada de 0,00 a 0,20 m.

A coleta feita a campo foi realizada em uma mini trincheira, com auxílio de uma pá de corte, para a coleta de um bloco de solo com dimensões de aproximadamente 0,15 x 0,15 x 0,20 metros (Figura 7), evitando cuidadosamente, a compactação ocasionada pela pá no momento da coleta. A análise foi realizada em 12 pontos, sendo quatro repetições em cada sistema de uso e manejo, totalizando 24 pontos.

Figura 7 - (a) bloco de solo recém extraído no campo; (b) e (c) bloco de solo com aproximadamente 0,15 x 0,15 x 0,20 m; (d) bloco após o rompimento manual pelos pontos de fraqueza para a caracterização da estrutura do solo



Fonte: Autora

Utilizando a metodologia de Ball *et al.* (2007) e Guimarães *et al.* (2011), após a extração do solo, quebrou-se o bloco na sua posição intermediária e, posteriormente, os agregados nas suas linhas de fraqueza, comparando os agregados obtidos e atribuindo uma pontuação (escore).

A qualidade da estrutura é dividida em cinco níveis: escore 1 (friável), definido por agregados que quebram facilmente com os dedos; escore 2 (intacto), agregados facilmente rompidos com a mão; escore 3 (firme), representa o rompimento da maioria dos agregados com a mão; escore 4 (compactado), agregados que exigem um esforço considerável para serem rompidos com a mão; e escore 5 (muito compactado), agregados muito difíceis de serem quebrados com a mão (Guimarães *et al.*, 2011). Para confirmar e complementar o escore anteriormente definido, efetuou-se anotações sobre os aspectos visuais dos agregados (forma e tamanho), raízes presentes, porosidade e compactação para cada condição de uso do solo (Ball *et al.*, 2007).

Figura 8 – Cartilha para Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)

Avaliação Visual da Estrutura do Solo

A estrutura do solo afeta a penetração das raízes, água disponível às plantas e aeração do solo. Este teste simples e rápido de avaliar a estrutura do solo baseia-se na aparência e tato de um bloco de solo retirado com uma pá. A escala do teste varia de Qe1, estrutura boa, a Qe5, estrutura pobre.

Equipamentos:
Pá reta de aprox. 20 cm de larg., 22-25 cm de comp.
Opcional: folha plástica de cor clara, saco ou bandeja 50 x 80 cm, faca pequena, câmera digital.

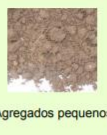
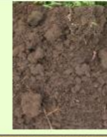
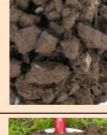
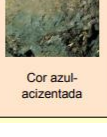
Quando amostrar:
Qualquer época do ano, mas preferencialmente quando o solo estiver úmido. Se o solo estiver muito seco ou muito úmido será difícil de ser obtida uma amostra representativa. Raízes são melhores vistas em uma área com cultura estabelecida ou logo após a colheita.

Onde amostrar:
Selecione uma área de cultura ou padrão de solo uniforme ou uma área onde há suspeita de restrições físicas. Dentro desta área, planeje uma malha de amostragem para avaliar o solo em 10 pontos, no mínimo. Em áreas experimentais pequenas pode ser necessário a redução deste número para 3 a 5.

Método de avaliação:		
Passo	Opção	Procedimento
Extração da fatia de solo		
1. Extraia uma fatia de solo	Solo solto	Remova a fatia de solo de ~15 cm de espessura diretamente da profundidade total da pá e coloque a pá com o solo em uma folha, bandeja ou no chão.
	Solo firme	Cave um buraco de acesso um pouco mais largo e profundo que a pá deixando um lado do buraco intacto. No lado intacto, corte cada lado do bloco com a pá e remova o bloco como mostrado abaixo.
2. Examine a fatia de solo amostrado	Estrutura uniforme	Remova qualquer solo compactado ou resíduo ao redor do bloco.
	Duas ou mais camadas com estrutura diferente	Estime a profundidade de cada camada e prepare para atribuir uma nota de qualidade estrutural (Qe) para cada uma separadamente.
Fragmentação da fatia de solo		
3. Fragmenta a fatia (tire uma foto – opcional)		Meça o comprimento da fatia e procure camadas. Delicadamente manipule a fatia utilizando as duas mãos para revelar qualquer camada coesiva ou torrões de agregados. Se possível separe o solo em seus agregados naturais e torrões manipulados. Torrões são agregados grandes, duros, coesos e arredondados.
4. Reduza agregados maiores para confirmar a nota		Quebre os agregados e fragmentos até obter um agregado de 1,5 – 2,0 cm. Olhe sua forma, porosidade, raízes e facilidade de quebra. Torrões podem ser quebrados em agregados não porosos, angulosos e são indicativos de estrutura pobre e nota alta.
Atribuição da nota		
5. Atribua a nota		Compare o solo com as fotos, categoria por categoria, e determine o que mais se assemelhe.
6. Confirme a nota com:	Extração da fatia	Dificuldade em extrair a fatia de solo.
	Forma e tamanho dos agregados	Maiores, mais angulosos, menos poros, presença de orifícios (buracos) devido a presença de raízes ou minhocas.
	Raízes	Agrupamento, engrossamento e achatamento.
	Anaerobismo	Regiões ou camadas de solo cinza, que cheira enxofre e apresentam ions de ferro.
	Fragmentação de agregados	Reduza agregados para ~ 1,5 – 2,0 cm de diâmetro para revelar seu tipo.
7. Calcule a nota da fatia com duas ou mais camadas de estrutura diferente		Multiplique a nota de cada camada pela sua espessura e divida o produto pela profundidade total, e.g. para uma fatia de 25 cm com 10 cm de profundidade de solo solto (Qe1) sobre uma camada mais compacta (Qe3) de 10-25 cm de profundidade, a nota será [(1 x 10)/25] + [(3 x 15)/25] = Qe 2.2.

Notas: A nota pode ser atribuída entre categorias se a camada apresentar características das duas. Notas entre 1-3 são geralmente aceitáveis enquanto notas de 4 a 5 requerem mudanças no manejo do solo.

Bruce Ball, SAC (bruce.ball@sac.ac.uk), Rachel M. L. Guimarães, University of Maringá, Brazil (rachellocks@gmail.com), Tom Batey, Independent Consultant (2033@tombatey.fs.com) and Lars Munkholm, University of Aarhus, Denmark (Lars.Munkholm@agrsci.dk) – Tradução: Rachel M. L. Guimarães e Cássio A. Tormena, Universidade Estadual de Maringá, Brasil

Qualidade Estrutural	Tamanho e aparência dos agregados	Porosidade visível e raízes	Aparência depois do manuseio: vários solos	Aparência depois do manuseio: mesmo solo diferentes manejos	Característica distintiva	Aparência e descrição de agregados naturais ou fragmento reduzido de ~ 1,5 cm de diâmetro	
Qe1 Friável Agregados quebram facilmente com os dedos	Maioria < 6 mm após a quebra	Alta porosidade Raízes por todo solo			 Agregados pequenos	 A ação de quebrar o bloco é suficiente para revelá-los. Agregados grandes são compostos por agregados menores, presos pelas raízes.	0
Qe2 Intacto Agregados quebram facilmente com uma mão	Uma mistura de agregados porosos e redondos entre 2 mm – 7 cm Sem presença de torrões	Maioria dos agregados são porosos Raízes por todo solo			 Agregados altamente porosos	 Agregados quando obtidos são redondos, muito frágeis, despedaçam muito facilmente e são altamente porosos.	5
Qe3 Firme Maioria dos agregados quebram com uma mão	Uma mistura de agregados porosos entre 2mm -10 cm; menos de 30% são <1 cm. Alguns torrões angulares não porosos podem estar presentes	Macroporos e fissuras presentes Porosidade e raízes: ambas dentro dos agregados			 Agregados com baixa porosidade	 Fragmentos de agregados são razoavelmente fáceis de serem obtidos. Apresentam poucos poros e são arredondados. Raízes geralmente crescem através dos agregados.	10
Qe4 Compacto Quebrar agregados com uma mão requer esforço considerável	Maioria > 10 cm e são sub-angulares não porosos; possibilidade de horizontalização; menos que 30% são <7 cm	Poucos macroporos e fissuras Raízes agrupadas em macroporos e ao redor dos agregados			 Macroporos bem distintos	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, em forma de cubo muito angulosos e pontudos e apresentam fissuras internamente.	15
Qs5 Muito compacto Difícil quebra	Maioria são maiores que > 10 cm, muito poucos < 7 cm, angular e não poroso	Porosidade muito baixa. Macroporos podem estar presentes. Pode conter zonas anaeróbicas. Poucas raízes e restritas a fissuras			 Cor azul-acinzentada	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, no entanto, considerável força é necessária. Geralmente não apresentam poros ou fissuras.	20
							25 cm

Fonte: Bruce Ball, Rachel M. L. Guimarães, Tom Batey e Lars Munkholm. Tradução: Rachel M. L. Guimarães e Cássio A. Tormena, Universidade Estadual de Maringá, Brasil

37

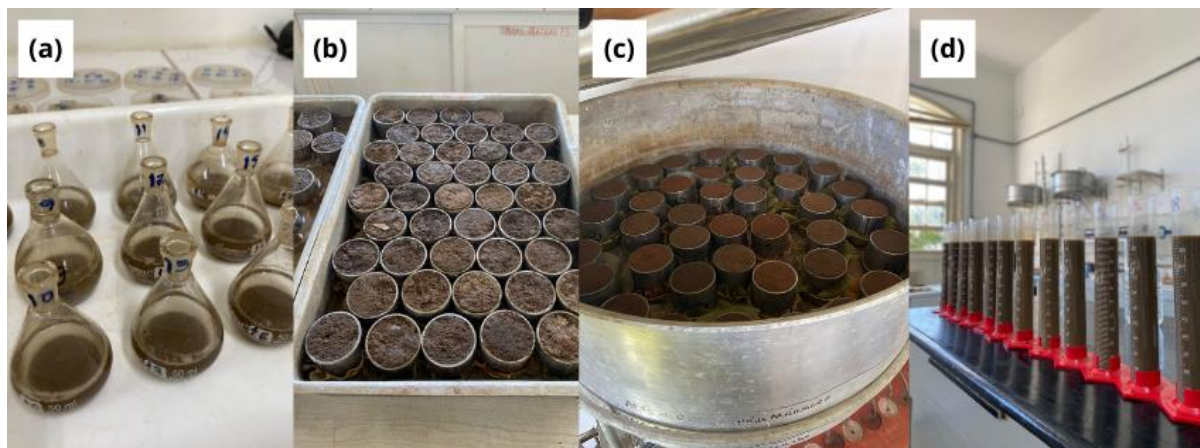
5.7 Densidade, densidade de partículas, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, granulometria, umidade gravimétrica

A determinação da densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i) e granulometria, foram realizadas seguindo a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

Para determinar a densidade do solo e a porosidade foram utilizadas as amostras coletadas com anéis volumétricos com aproximadamente 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, onde inicialmente foram realizados o toailete das amostras e submetidas à saturação por capilaridade, permanecendo nesse processo por no mínimo 48 horas. Concluída essa etapa, os anéis foram colocados na mesa de tensão e mantidos sob um potencial de 60 kPa até atingirem o equilíbrio, caracterizado pelo peso constante, visando a remoção de água nos poros. Posteriormente, os anéis foram levados à estufa a 105°C por um período de 24 horas, possibilitando a obtenção da massa de solo seco. Após estas etapas, foram realizados os cálculos necessários para a obtenção da D_s , P_t , M_a e M_i .

Para determinar a densidade de partículas foi utilizado o método do picnômetro, onde a amostra de 5g de solo seco, depois de peneirada a 2,0 mm, foi transferida para o picnômetro e em seguida preenchido de água destilada para facilitar a dispersão do solo. Este picnômetro foi submetido à bomba de vácuo para eliminar todo ar retido entre as partículas, e em seguida, após seu resfriamento à temperatura ambiente, foi preenchido com água destilada até o menisco de calibração e então, submetido à pesagem.

Figura 9 - (a) análise da densidade de partículas pelo método do frasco de picnômetro; (b) anéis volumétricos após a realização do toalete; (c) amostras indeformadas prontas para a análise de porosidade e densidade; (d) análise de granulometria pelo método de Bouyoucos



Fonte: Autora

A análise granulométrica foi realizada a partir do método de Bouyoucos, utilizando 40 g de solo seco ao ar, também peneirado a 2 mm, que foi acondicionada em um béquer de 250mL. Na sequência, foram adicionados 25 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH), utilizada como uma solução dispersante química. A suspensão permaneceu em repouso por aproximadamente 16 horas, de forma a assegurar a completa atuação do dispersante. Decorrido esse período, a amostra foi submetida à agitação mecânica em agitador horizontal por 15 minutos, favorecendo a dispersão integral das partículas. Posteriormente, a suspensão foi transferida para um cilindro de sedimentação com capacidade de 1 L, completando-se o volume com água destilada. Após a homogeneização, foi realizada a primeira leitura com o hidrômetro, aos 40 segundos, para determinação da fração silte + argila, a segunda leitura foi feita após 2 horas, correspondendo a fração argila. Os valores obtidos foram corrigidos conforme a temperatura da suspensão e descontando-se o valor do branco, constituído por um cilindro contendo apenas 25 mL de NaOH 1N e água destilada até 1 litro. A fração areia foi calculada por diferença ($100\% - [\text{silte} + \text{argila}]$). As proporções de areia, silte e argila foram expressas em porcentagem em relação à massa seca da amostra.

A umidade gravimétrica do solo foi mensurada de acordo com a metodologia da Embrapa (2011). Onde o valor médio obtido de umidade do solo foi de 2,1% na Propriedade 1 e 2,2% na Propriedade 2.

Os resultados obtidos referentes às análises granulométricas e densidade de partículas (Dp) são mostrados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Frações granulométricas e densidade de partículas de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos nas camadas 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

Propriedade 1					
Sistema	Camada (m)	Argila	Areia	Silte	Dp ¹
		g kg ⁻¹			Mg m ⁻³
Lavoura	0,00 - 0,10	7,00	27,73	5,27	2,96
	0,10 - 0,20	7,00	27,47	5,52	2,70
Pastagem	0,00 - 0,10	7,50	27,17	5,33	2,83
	0,10 - 0,20	7,00	27,49	5,51	2,73
Campo Nativo	0,00 - 0,10	7,50	24,89	7,60	2,76
	0,10 - 0,20	7,00	25,58	7,41	2,46

¹Dp: Densidade de partículas

Tabela 2 - Frações granulométricas e densidade de partículas de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos nas camadas 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, na Propriedade 2 localizadas no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

Propriedade 2					
Sistema	Camada (m)	Argila	Areia	Silte	Dp ¹
		g kg ⁻¹			Mg m ⁻³
Lavoura	0,00 - 0,10	11,00	24,01	4,98	2,70
	0,10 - 0,20	15,00	20,81	4,19	2,63
Pastagem	0,00 - 0,10	10,00	25,48	4,52	2,66
	0,10 - 0,20	11,00	24,14	4,85	2,73
Campo Nativo	0,00 - 0,10	10,00	26,01	3,99	2,63
	0,10 - 0,20	11,00	23,49	5,51	2,70

¹Dp: Densidade de partículas

5.8 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à estatística exploratória (estatística descritiva), obtendo-se medidas de posição (mínimo, média e máxima) e de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação (CV%), assimetria e de curtose). A hipótese

de normalidade foi testada pelo teste de Shapiro e Wilk ($p < 0,05$), sendo considerados como distribuição normal os dados que obtiveram p-valor $> 0,05$. Também foi realizada ANOVA seguida do teste de Tukey a 5% para verificar diferenças entre os sistemas e profundidades não dados que apresentaram normalidade, aos que não apresentaram foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn. Os softwares utilizados foram o R Core Team (2025) e BioEstat Versão 5.3 (Ayres et al., 2007).

6 Resultados e discussão

As Tabelas 3 e 4 apresentam estatísticas descritivas de atributos físicos e químicos do solo nas Propriedades 1 e 2, em duas camadas: 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Foram analisadas variáveis relacionadas à densidade do solo, porosidade, distribuição granulométrica, estabilidade de agregados, carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica do solo (MOS).

Tabela 3 - Estatística descritiva dos diferentes atributos físicos e químicos do solo, nas camadas de 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, na Propriedade 1, localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

Propriedade 1								
0,00 - 0,10 m								
Variáveis	Média	Mediana	CV (%)	S	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
Ds (Mg m^{-3})	1,42	1,47	12,34	0,18	1,17	1,67	-0,28	-1,52
Ma (%)	6,79	5,47	62,96	4,27	2,25	18,88	1,38	1,63
Mi (%)	33,46	33,54	20,35	6,81	14,21	48,72	-0,40	1,30
PT (%)	40,25	39,58	15,25	6,14	25,96	54,22	0,04	0,17
Areia (g kg^{-1})	26,60	27,17	5,19	1,38	24,56	28,07	-0,79	-1,20
Argila (g kg^{-1})	7,33	7,00	7,04	0,52	7,00	8,00	0,97	-1,88
Silte (g kg^{-1})	6,07	5,64	20,32	1,23	4,93	7,77	0,74	-1,70
DMP (mm)	3,53	3,03	29,21	1,03	1,92	5,55	0,52	-1,12
COT (g kg^{-1})	23,81	23,54	39,24	9,34	13,17	34,71	0,06	-1,95
MOS (g kg^{-1})	41,04	40,58	39,24	16,11	22,70	59,85	0,06	-1,95
0,10 - 0,20 m								
Ds (Mg m^{-3})	1,54	1,53	8,21	0,13	1,32	1,78	0,37	-0,71
Ma (%)	9,20	9,38	39,25	3,61	3,46	16,40	0,12	-0,92
Mi (%)	25,77	26,13	17,30	4,46	10,65	35,16	-1,58	5,36
PT (%)	34,97	34,43	13,94	4,87	20,27	50,41	0,19	3,92
Areia (g kg^{-1})	26,85	27,27	3,72	1,00	25,55	27,76	-0,80	-1,86
Argila (g kg^{-1})	7,00	7,00	0,00	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00
Silte (g kg^{-1})	6,15	5,73	16,26	1,00	5,24	7,45	0,80	-1,86
DMP (mm)	2,59	2,79	30,46	0,79	1,22	3,83	-0,32	-1,20
COT (g kg^{-1})	11,90	11,37	32,46	3,86	7,58	17,16	0,34	-1,70
MOS (g kg^{-1})	20,52	19,60	32,46	6,66	13,07	29,58	0,34	-1,70

Mi: Microporosidade; PT: Porosidade total; DMP: Diâmetro médio ponderado de agregados; COT: carbono orgânico total; MOS: Matéria orgânica do solo.

Na propriedade 1 (Tabela 3), a densidade do solo, na camada de 0,00 a 0,10 m, apresentou média de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que, na camada de 0,10 a 0,20 m foi $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$, evidenciando o aumento de valor em profundidade, um padrão comum em áreas agrícolas onde ocorrem tráfego de máquinas e pisoteio de animais (Marques Filho *et al.*, 2024). Apesar disso, os valores, de forma geral, observados permanecem abaixo do valor crítico estabelecido para solos franco-arenosos, os quais podem variar de $1,69$ a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$, segundo Reichert e Reinert (2003).

A macroporosidade (Ma) apresentou média de 6,79% na camada de 0,00 a 0,10 m, enquanto na camada 0,10 a 0,20 m foi de 9,20%, apresentando com um coeficiente de variação maior na camada superficial (62,96%). Enquanto a microporosidade (Mi) na camada de 0,00 a 0,10 m apresentou média de 33,46% e na camada 0,10 a 0,20 m média de 25,77%, indicando que na camada superficial, há

predomínio de microporos, aqueles responsáveis pela retenção de água, enquanto que na camada subsuperficial há mais presença de macroporos, que favorecem a aeração e drenagem do solo. A microporosidade apresenta relação direta com a densidade do solo, uma vez que a redução da densidade favorece o aumento do volume de microporos, conforme observado na camada de 0,00 a 0,10 m (Schaffrath *et al.*, 2008). A porosidade total (PT) apresentou média de 40,25% na camada de 0,00 a 0,10 m e de 34,97% na camada de 0,10 a 0,20 m. Esses valores refletem o arranjo estrutural distinto entre a camada superficial e a subsuperficial, sendo a camada de 0,10 a 0,20 m associada a condições de maior compactação.

No que se refere à granulometria, observou-se predominância de areia em ambas as camadas, na superficial (0,00 a 0,10 m), a fração areia apresentou média de 26,60 g kg⁻¹, enquanto na subsuperficial (0,10 a 0,20 m) a média foi de 26,85 g kg⁻¹. A fração argila apresentou pouca variação, com média de 7,33 g kg⁻¹ na camada superficial e 7,00 g kg⁻¹ na subsuperficial, enquanto o silte apresentou valores médios de 6,07 g kg⁻¹ na camada superficial e 6,15 g kg⁻¹ na subsuperficial. Solos caracterizados como franco-arenosos apresentam características que a tornam sensível às práticas de uso e manejo, sendo especialmente suscetível a processos de degradação estrutural e perda de matéria orgânica.

A estabilidade dos agregados, expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP), apresentou média de 3,53 mm na camada de 0,00 a 0,10 m e de 2,59 mm na camada de 0,10 a 0,20 m, indicando que a camada superficial possui agregados maiores, em função da maior presença de matéria orgânica e da intensa atividade radicular e microbiológica nesta faixa (Souza *et al.*, 2025). Esses resultados corroboram com um estudo de Ninomiya *et al.* (2025), onde a estabilidade de agregados apresentou valores mais elevados na camada superficial do solo (0,00 a 0,05 m) em comparação à subsuperficial (0,05 a 0,10 m), refletindo a influência da matéria orgânica e da atividade radicular no favorecimento de agregados estáveis. O clima das áreas estudadas é marcado pela boa disponibilidade hídrica e pelas oscilações sazonais de temperatura, na qual influencia diretamente os processos de formação, estabilização e degradação dos agregados do solo.

Em relação ao teor de carbono orgânico total (COT), a camada de 0,00 a 0,10 m apresentou média de 23,81 g kg⁻¹, enquanto a camada 0,10 a 0,20 m a média foi de 11,90 g kg⁻¹. Da mesma forma, a matéria orgânica do solo (MOS), apresentou

valor médio de 41,04 g kg⁻¹ na camada superficial, e de 20,52 g kg⁻¹ na subsuperficial. Esses resultados mostram que a camada mais superior possui aproximadamente o dobro dos teores de COT e MOS em relação à camada mais inferior, evidenciando que questões químicas também apresentam forte influência na formação de agregados, como o teor de carbono, matéria orgânica, existência de pontes iônicas, argila, carbonatos e presença de glomalina, que é um agente cimentante (Bronick & Lal, 2005; Rillig *et al.*, 2001).

Tabela 4 - Estatística descritiva dos diferentes atributos físicos e químicos do solo, nas camadas de 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, na Propriedade 2, localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

Propriedade 2								
0,00 - 0,10 m								
Variáveis	Média	Mediana	CV (%)	S	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
Ds (Mg m ⁻³)	1,42	1,45	8,40	0,12	1,17	1,58	-0,50	-0,92
Ma (%)	6,07	6,08	43,37	2,63	1,83	14,92	0,84	2,43
Mi (%)	31,74	30,35	27,93	8,87	24,36	77,61	4,32	22,05
PT (%)	37,81	36,60	22,62	8,55	27,72	80,12	3,73	18,04
Areia (g kg ⁻¹)	25,17	25,15	4,40	1,11	24,00	26,94	0,59	0,02
Argila (g kg ⁻¹)	10,33	10,00	5,00	0,52	10,00	11,00	0,97	-1,88
Silte (g kg ⁻¹)	4,50	4,85	16,80	0,76	3,06	5,00	-1,85	3,26
DMP (mm)	2,82	2,28	46,59	1,31	1,23	4,73	0,47	-1,56
COT (g kg ⁻¹)	20,68	20,55	18,64	3,86	16,36	26,33	0,33	-0,95
MOS (g kg ⁻¹)	35,65	35,43	18,64	6,65	28,20	45,40	0,33	-0,95
0,10 - 0,20 m								
Ds (Mg m ⁻³)	1,53	1,54	7,75	0,12	1,25	1,71	-0,58	-0,19
Ma (%)	5,30	4,16	80,78	4,28	0,36	19,83	2,34	5,74
Mi (%)	28,60	27,19	31,26	8,94	22,29	68,32	3,61	13,77
PT (%)	33,90	31,15	28,23	9,57	23,12	72,68	2,63	8,08
Areia (g kg ⁻¹)	22,82	23,49	6,93	1,58	20,78	24,21	-0,82	-1,87
Argila (g kg ⁻¹)	12,33	11,00	16,75	2,07	11,00	15,00	0,97	-1,88
Silte (g kg ⁻¹)	4,85	4,86	12,21	0,59	4,16	5,54	-0,01	-1,88
DMP (mm)	2,76	2,79	32,02	0,88	1,22	4,26	-0,08	-1,12
COT (g kg ⁻¹)	16,36	17,56	21,15	3,46	10,77	19,55	-1,00	-0,37
MOS (g kg ⁻¹)	28,20	30,27	21,15	5,97	18,57	33,71	-1,00	-0,37

Mi: Microporosidade; PT: Porosidade total; DMP: Diâmetro médio ponderado de agregados; COT: Carbono orgânico total; MOS: Matéria orgânica do solo.

Na Propriedade 2 (Tabela 4), a densidade do solo na camada de 0,00 a 0,10 m apresentou média de 1,42 Mg m⁻³, enquanto a camada de 0,10 a 0,20 m a média observada foi de 1,53 Mg m⁻³. A densidade do solo pode servir como indicador da

capacidade do solo de armazenar água para as plantas, além de indicar as alterações da estrutura do solo, como a compactação (Campos, 2021).

A macroporosidade apresentou valor médio de 6,07% na camada de 0,00 a 0,10 m, enquanto a camada mais profunda apresentou média de 3,50%. A microporosidade apresentou média de 31,74% na camada superficial e de 26,60% na camada subsuperficial. A porosidade total apresentou média de 37,81% na camada de 0,00 a 0,10 m e de 33,90% na camada de 0,10 a 0,20 m. Esses valores refletem as condições estruturais observadas ao longo do perfil do solo, as quais influenciam os processos de retenção e movimentação de água, bem como a suscetibilidade à compactação nas diferentes camadas avaliadas. Conforme Bronick e Lal (2005), a porosidade é controlada, em grande parte, pela estabilidade dos agregados do solo, sendo essencial para funções como o armazenamento e o fornecimento de água às plantas. Além disso, a diversidade de tamanhos de poros derivados dos agregados permite o equilíbrio entre drenagem e retenção hídrica, promovendo um ambiente adequado para a atividade radicular.

Em relação às frações granulométricas, assim como na Propriedade 1, observou-se predominância da fração arenosa em ambas as profundidades. Na camada superficial, o teor médio de areia foi de 25,17 g kg⁻¹, enquanto na subsuperficial a média foi de 22,82 g kg⁻¹. A fração argila apresentou valores bastante próximos entre as profundidades, com média de 10,33 g kg⁻¹ na camada superficial e 10,00 g kg⁻¹ na camada subsuperficial, evidenciando baixa variação. O silte apresentou médias de 4,50 g kg⁻¹ na camada superficial e 4,85 g kg⁻¹ na subsuperficial.

O teor de carbono orgânico total foi em média de 20,68 g kg⁻¹ na camada de 0,00 a 0,10 m. Enquanto na camada de 0,10 a 0,20 m, o COT apresentou média de 10,56 g kg⁻¹. Da mesma forma, o teor de matéria orgânica do solo foi de 35,65 g kg⁻¹ na camada superficial, enquanto na subsuperficial a média foi de 28,20 g kg⁻¹.

A análise dos atributos físicos e químicos do solo nas Propriedades 1 e 2 evidencia variações associadas à profundidade. Os valores observados ao longo do perfil indicam comportamentos distintos entre os atributos avaliados, refletindo a influência do uso e do manejo do solo sobre sua qualidade física e química. De modo geral, os dados da camada de 0,00 a 0,10 m estão relacionadas ao arranjo estrutural do solo, à porosidade e aos teores de matéria orgânica, enquanto a camada de 0,10

a 0,20 m apresenta valores associados às condições físicas observados em subsuperfície, incluindo densidade e teores de carbono e matéria orgânica. Esses padrões ressaltam a relevância do manejo adequado do solo, especialmente nas áreas de uso agrícola, para a manutenção da sua qualidade e sustentabilidade a longo prazo.

Em termos de densidade do solo, observa-se que a média na camada 0,00 a 0,10 m é semelhante nas duas propriedades, sendo $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$. Na camada de 0,10 a 0,20 m, os valores médios foram de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ na Propriedade 1 e $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ na Propriedade 2.

A estabilidade dos agregados apresentou valores de 3,53 mm na camada de 0,00 a 0,10 m da Propriedade 1 e de 2,82 mm na mesma camada da Propriedade 2. Esses valores estão associados às condições estruturais da camada superficial e aos teores de matéria orgânica presentes em cada área. O manejo que é atribuído ao solo e às culturas influencia diretamente na estabilidade da estrutura do solo, incluindo os agregados estáveis em água (Reichert & Reinert, 2003).

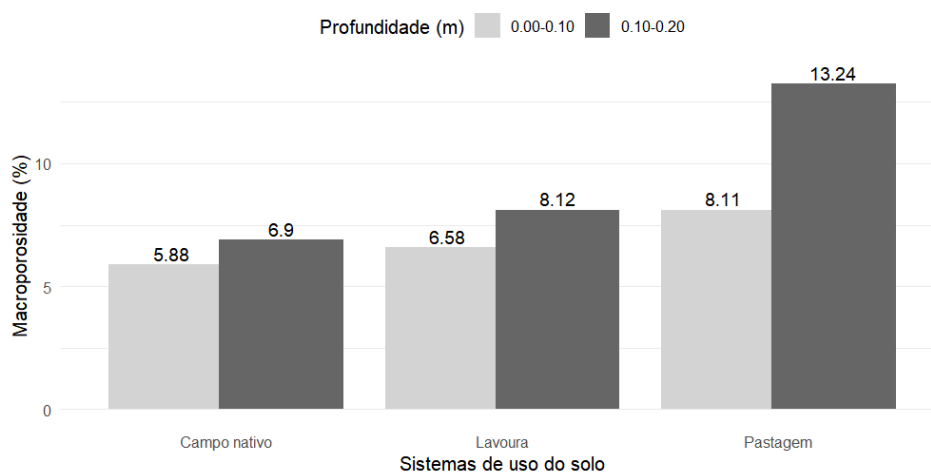
Os teores de carbono orgânico total e a matéria orgânica também apresentaram variações entre as propriedades e ao longo do perfil. Na camada de 0,00 a 0,10 m, os valores de COT e MOS observados na Propriedade 1 indicam condições de acúmulo de compostos orgânicos. Na camada de 0,10 a 0,20 m, os valores de COT mantiveram-se associados à Propriedade 1, enquanto a MOS apresentou comportamento distinto.

Ao considerar as possíveis causas e implicações desses comportamentos, destaca-se que os valores de COT, MOS e DMP observados na camada superficial da Propriedade 1 estão relacionados às condições de estabilidade estrutural do solo, uma vez que a formação e a estabilidade dos agregados estão associadas à qualidade do solo e à capacidade de estocagem de carbono (Fernandes *et al.*, 2017). A matéria orgânica do solo constitui um dos principais indicadores de qualidade, estando relacionada a atributos físicos, químicos e biológicos, com influência direta sobre a estabilidade dos agregados (Reichert & Reinert, 2003). O predomínio da fração areia nessa área, especialmente em profundidade, aliado aos menores teores de argila, sugere que a estabilidade estrutural depende fortemente da matéria orgânica e dos processos de estruturação biogênica promovidos por raízes e pela fauna edáfica. Por sua vez, na Propriedade 2, embora a maior proporção de argila represente um potencial para a coesão dos agregados, os valores observados de

DMP e MOS na camada superficial indicam que esse potencial não se traduz necessariamente em maior estabilidade estrutural, corroborando observações de Lima *et al.* (2024), que destacam que solos mais argilosos nem sempre apresentam maior estabilidade de agregados quando outros fatores físicos e químicos não são favoráveis.

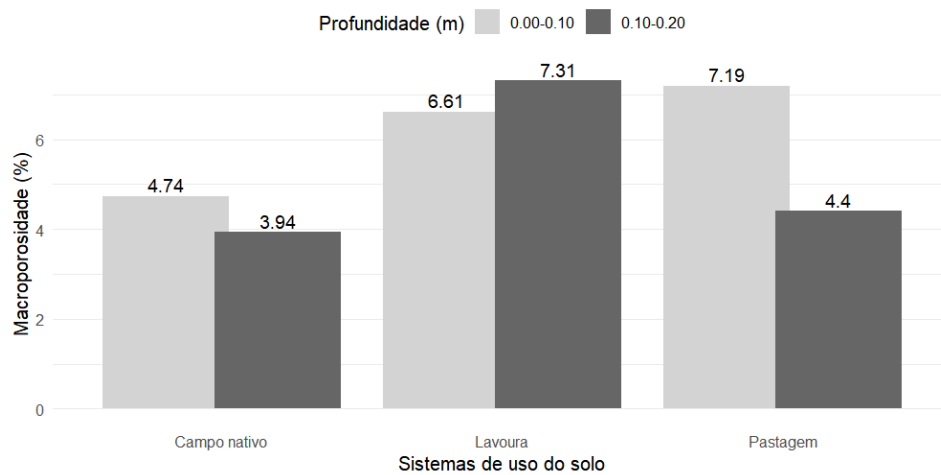
Observa-se que na Propriedade 1, em todos os sistemas avaliados, a macroporosidade é maior na camada de 0,10 a 0,20 m (Figura 10). O campo nativo apresenta valores mais baixos em ambas profundidades, seguido pela lavoura, enquanto a pastagem se destaca com os maiores valores principalmente na camada mais profunda. De modo geral, há um aumento consistente da macroporosidade com a profundidade, e a pastagem apresenta maior abertura de poros em relação aos demais usos do solo.

Figura 10 - Valores médios de macroporosidade (%) na Propriedade 1, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)



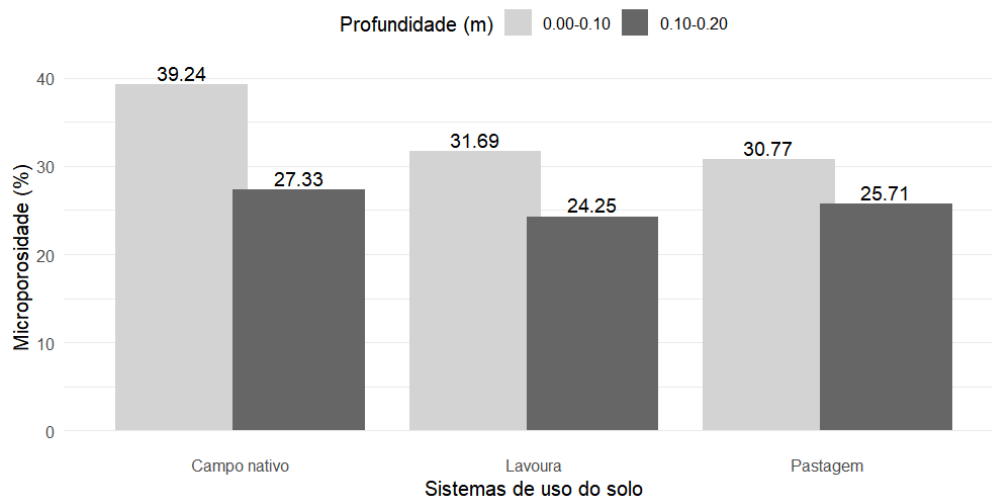
Na Propriedade 2 (Figura 11), o campo nativo, a macroporosidade é ligeiramente maior na camada superficial do que na camada de 0,10 a 0,20 m. Na lavoura, ocorre o comportamento oposto, com maior valor na camada de 0,10 a 0,20 m. Já na pastagem, a macroporosidade é mais elevada na camada superficial e reduz na profundidade. Entre os sistemas, a lavoura apresenta valores relativamente elevados nas duas profundidades, enquanto o campo nativo mantém valores mais baixos e a pastagem mostra variação mais acentuada entre as camadas.

Figura 11 - Valores médios de macroporosidade (%) na Propriedade 2, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)



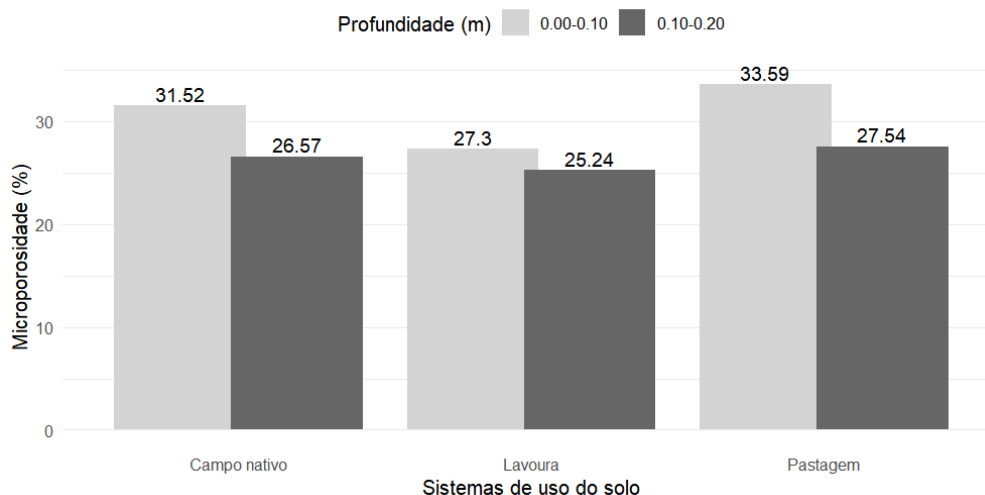
A microporosidade na Propriedade 1 (Figura 12) apresenta, em todos os sistemas de uso do solo, valores mais elevados na camada de 0,00 a 0,10 m em comparação com a camada de 0,10 a 0,20 m. O campo nativo se destaca com o maior valor na superfície, seguido pela lavoura e pela pastagem. Em profundidade, ocorre redução em todos os sistemas, sendo essa diminuição mais evidente no campo nativo. De forma geral, observa-se uma tendência de diminuição da microporosidade com o aumento da profundidade.

Figura 12 - Valores médios de microporosidade (%) na Propriedade 1, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)



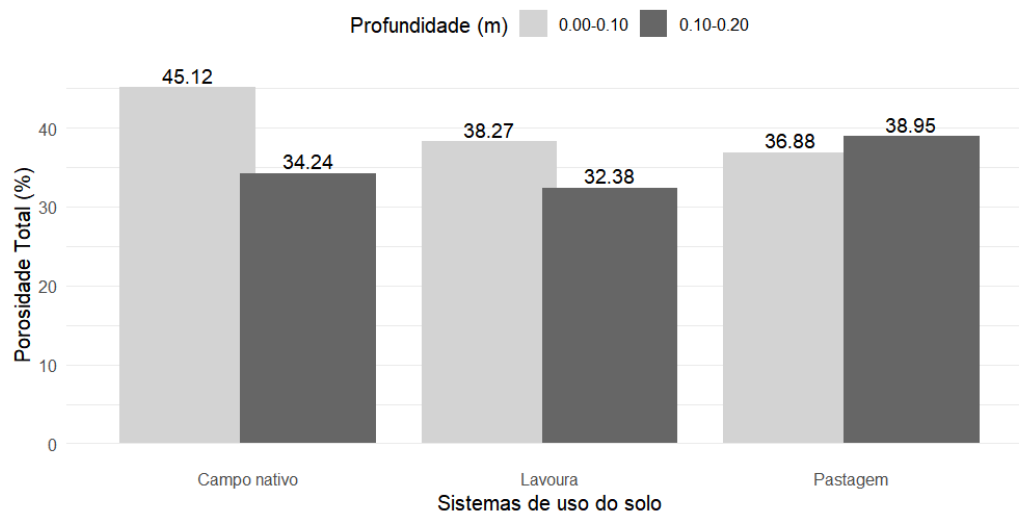
Assim como observado anteriormente, a microporosidade na Propriedade 2 (Figura 13) é maior na camada superficial em todos os sistemas avaliados. A pastagem apresenta o maior valor na superfície, seguida pelo campo nativo e pela lavoura. Na camada mais profunda, há redução dos valores em todos os casos, porém de forma menos acentuada. A diferença entre as profundidades é relativamente pequena na lavoura, enquanto campo nativo e pastagem mostram uma variação um pouco mais perceptível.

Figura 13 - Valores médios de microporosidade (%) na Propriedade 2, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)



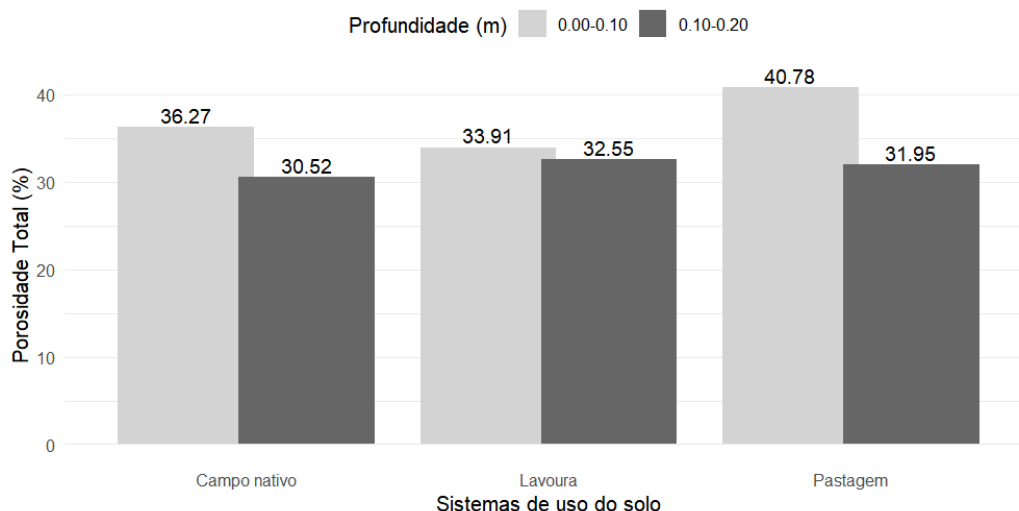
Observa-se que na Propriedade 1 (Figura 14), na camada de 0,00 a 0,10 m, o campo nativo apresenta a maior porosidade, seguido pela lavoura, enquanto a pastagem apresenta valor intermediário. Já na camada mais profunda (0,10 - 0,20 m), ocorre uma redução da porosidade no campo nativo e na lavoura, enquanto a pastagem mantém valores próximos ou ligeiramente superiores aos da camada superficial. De modo geral, o campo nativo tende a apresentar maior porosidade na superfície, possivelmente associada à menor perturbação do solo e maior acúmulo de matéria orgânica. A redução em profundidade pode refletir a menor influência direta desses fatores nas camadas inferiores.

Figura 14 - Valores médios de porosidade total (%) na Propriedade 1, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)



Na Propriedade 2 (Figura 15), na camada de 0,00 a 0,10, a pastagem apresenta o maior valor médio de porosidade, seguida pelo campo nativo e pela lavoura. Em profundidade, a camada de 0,10 a 0,20 m, há uma tendência de diminuição da porosidade em todos os sistemas, com valores mais próximos entre si. A maior porosidade ocorre na camada de 0,00 a 0,10 da pastagem, que pode estar relacionada à presença de raízes e à estruturação superficial do solo, enquanto a redução em profundidade sugere menor influência desses fatores estruturantes.

Figura 15 - Valores médios de porosidade total (%) na Propriedade 2, avaliados em diferentes sistemas de uso do solo (campo nativo, lavoura e pastagem) e em duas profundidades (0,00–0,10 m e 0,10–0,20 m)

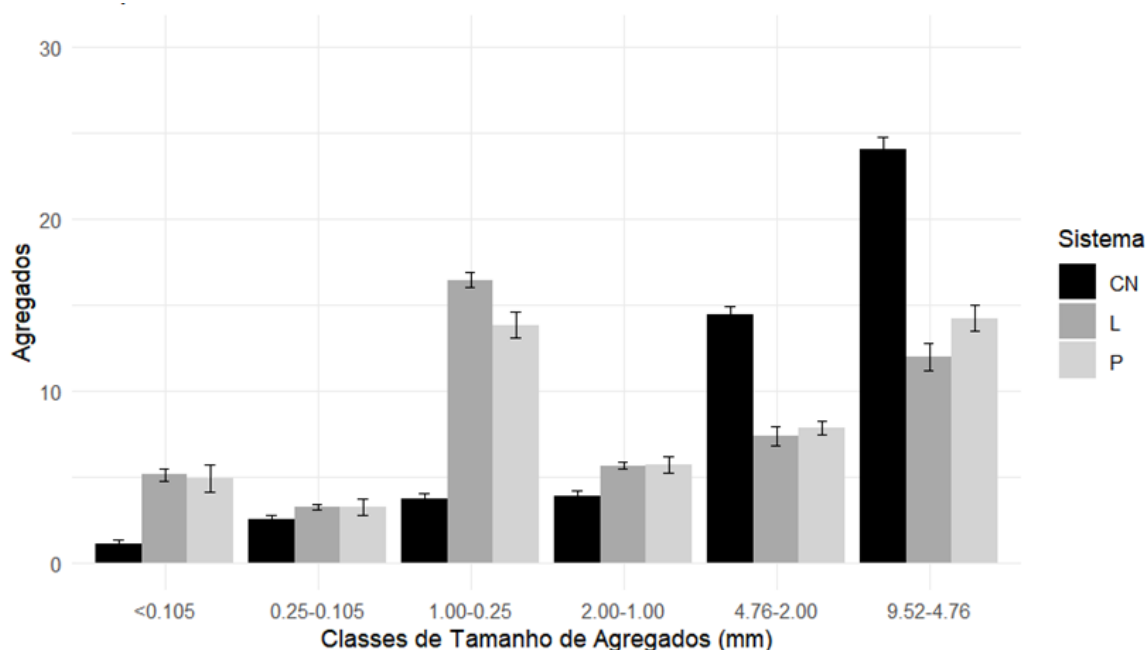


A análise dos atributos físicos do solo nos diferentes sistemas de uso avaliados não evidenciou sinais de degradação estrutural em nenhuma das áreas. De modo geral, os valores observados indicam condições adequadas de qualidade física do solo, sugerindo que tanto o sistema de lavoura quanto as áreas de pastagem e campo nativo encontram-se em bom estado de conservação. Esse comportamento pode ser atribuído, em grande parte, ao histórico de uso e manejo adotado nas áreas, o qual tem contribuído para a manutenção da estrutura do solo e para a estabilidade dos seus atributos físicos.

6.1 Estabilidade de agregados em água

Uma das formas de avaliar a estrutura do solo consiste no peneiramento úmido, utilizando um conjunto de peneiras que são imersas em água. A partir da massa do solo retida em cada peneira, calculam-se os índices de agregação, sendo o principal o diâmetro médio ponderado (DMP).

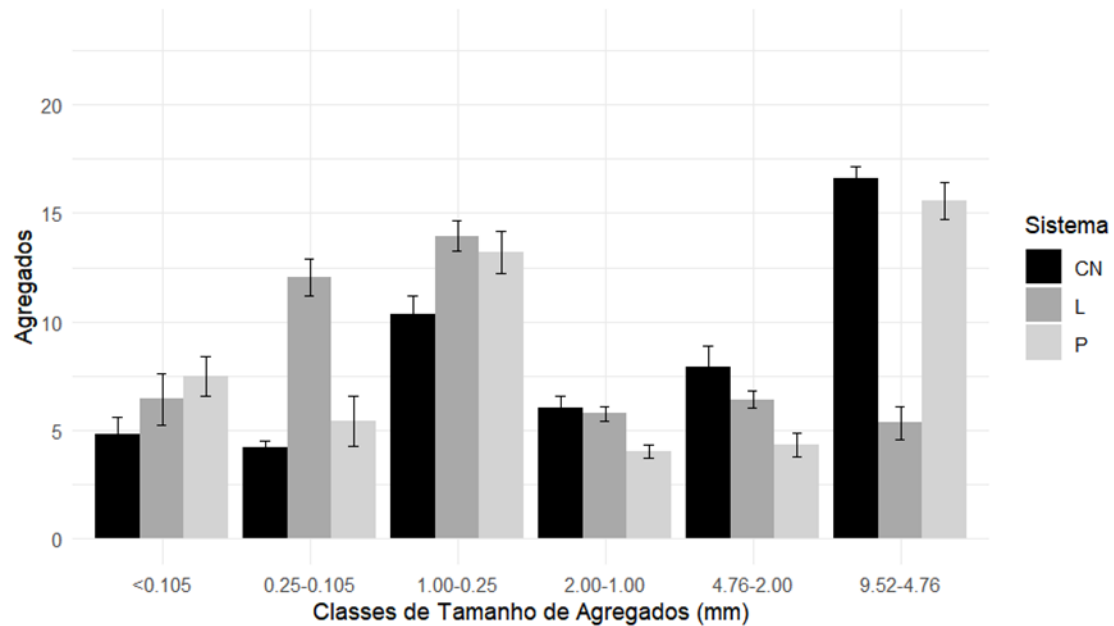
Figura 16 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,00 a 0,10 m na Propriedade 1, localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso



Observa-se (Figura 16), que na camada de 0,00 a 0,10 m houve predominância de agregados na classe de 9,52 - 4,76 mm, no sistema de campo nativo (CN). Os sistemas de lavoura (L) e pastagem (P) também apresentam uma contribuição relevante nessa classe de agregados, porém em menor escala que a área de campo nativo. A classe de 1,00 - 0,25 mm apresentou valores significativamente superiores nas áreas de lavoura e pastagem, evidenciando que o manejo agrícola influencia a fragmentação dos macroagregados, com redução da proporção de agregados mais estáveis de maior diâmetro (Salton *et al.*, 2008; Bronick & Lal, 2005).

O campo nativo manteve maior proporção de macroagregados estáveis, sendo influenciado pela cobertura vegetal permanente e da maior quantidade de matéria orgânica presente nessas áreas, que favorecem a estabilidade estrutural. Enquanto que nos sistemas de lavoura e pastagem, e o modo de preparo e o pisoteio animal interferiram na estabilidade dos agregados. Zhao *et al.* (2023) observaram que áreas sob diferentes usos, afetam significativamente a estabilidade e a distribuição do tamanho dos agregados, devido à variação do teor de matéria orgânica e dos óxidos de ferro e de alumínio.

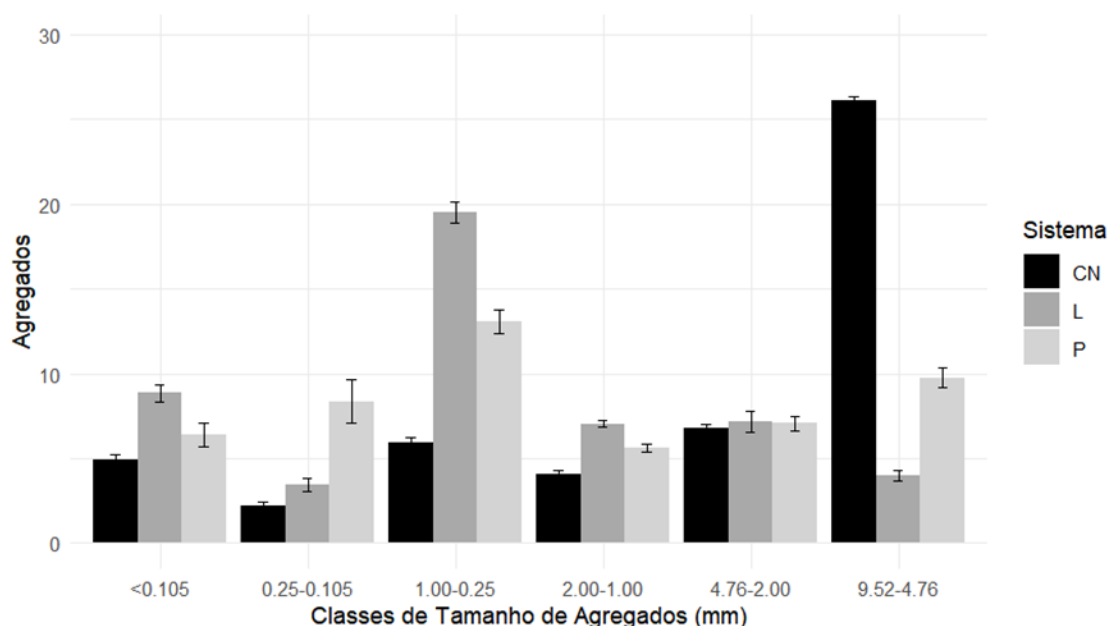
Figura 17 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,10 a 0,20 m na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso



Na camada de 0,10 a 0,20 mm (Figura 17) houve redução geral na proporção de agregados da classe 9,52 - 4,76 mm, porém no sistema de campo nativo os valores mais elevados ainda são desta classe, seguido pela pastagem. Nessa camada, a maior expressividade da classe <0,25 mm, especialmente nos sistemas de lavoura e pastagem, indica maior suscetibilidade à desagregação em profundidade, refletindo os efeitos do manejo agrícola sobre a estabilidade estrutural do solo (Six *et al.*, 1999; Salton *et al.*, 2008; Bronick & Lal, 2005).

A diferença entre os sistemas é menos notável na camada superficial, embora o sistema de campo nativo conserve melhor a proporção de macroagregados devido a presença de resíduos vegetais, corroborando com o papel fundamental da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados do solo (Tisdall & Oades, 1982).

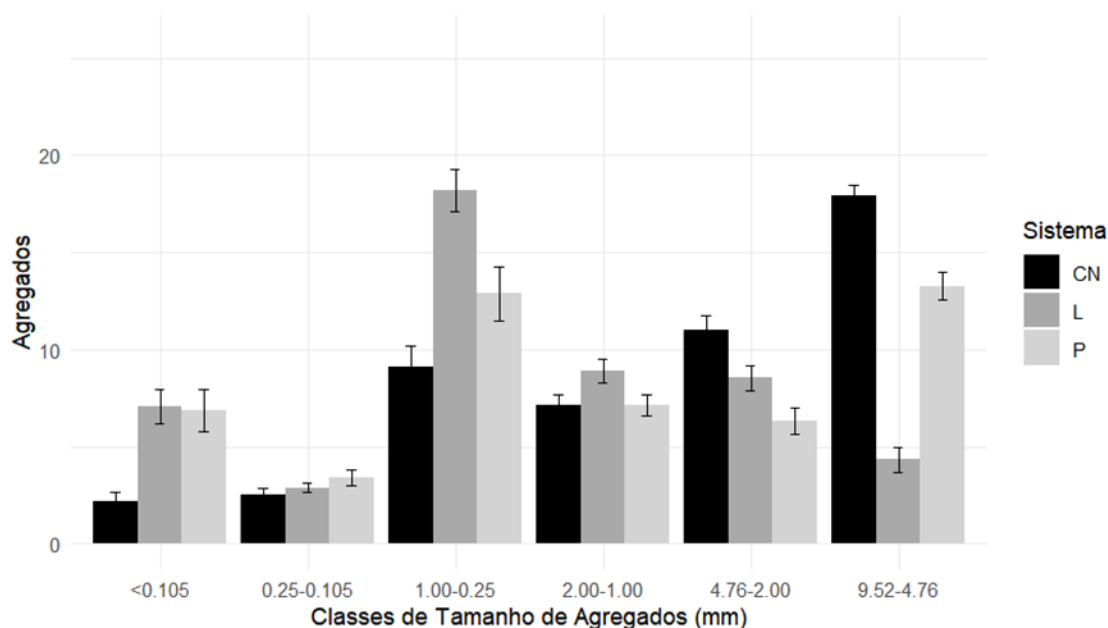
Figura 18 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,00 a 0,10 m na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso



Na Propriedade 2 (Figura 18), na camada de 0,00 a 0,10 m, o comportamento é semelhante ao observado na Propriedade 1 (Figura 17), porém com diferenças mais evidentes entre os sistemas. O campo nativo apresenta o maior percentual de agregados estáveis na classe de 9,52 - 7,76 mm, atingindo valores próximos a 30%, enquanto lavoura e pastagem registraram cerca de 12% e 14%, respectivamente. Na classe de 1,00 - 0,25 mm, a lavoura apresentou o maior valor, seguida da pastagem e do campo nativo. A classe de < 0,25 mm apresenta valores consideráveis nos sistemas de lavoura e pastagem, indicando que nestas áreas os agregados são mais vulneráveis à desagregação. Corroborando com Ferreira *et al.* (2025), embora os sistemas de manejo exerçam influência sobre agregação do solo, as diferenças tornam-se mais evidentes quando comparadas ao sistema de campo nativo, o qual também apresentou uma estrutura mais estável e bem definida.

Assim como na Propriedade 1, os sistemas manejados concentram maior proporção de macroagregados, possivelmente em função da fragmentação mecânica do solo e da menor contribuição de macroagregados de origem biogênica, conforme descrito em estudos clássicos sobre agregação do solo (Tisdall & Oades, 1982; Six *et al.*, 1999; Salton *et al.*, 2008).

Figura 19 - Estabilidade de agregados em água em diferentes classes de distribuição de tamanho, na camada de 0,10 a 0,20 m na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da estabilidade de agregados entre sistemas de uso



Na camada de 0,10 a 0,20 m (Figura 19), o sistema de campo nativo novamente se destaca na classe de 9,52 - 4,76 mm, embora em uma intensidade menor que a camada superficial. Também é observada a presença de agregados intermediários nas classes de 2,00 - 1,00 mm e 4,76 - 2,00 mm em todos os sistemas. O sistema de lavoura, novamente, apresenta valores elevados na classe de 1,00 - 0,25 mm. Enquanto a classe de <0,25 mm continua expressiva nos sistemas de lavoura e pastagem, reforçando a menor estabilidade desses sistemas em profundidade.

De modo geral, tanto na Propriedade 1 quanto na Propriedade 2, observa-se que o sistema de campo nativo apresenta maior proporção de macroagregados estáveis, sobretudo na classe de 9,52 - 4,76 mm, devido a presença de vegetação nativa, ocorrendo maior ação de agentes biológicos, devido a estabilidade do ambiente (Pinto *et al.*, 2021a).

Na Propriedade 1, os valores de macroagregados são mais expressivos na camada de 0,00 a 0,10 m, enquanto que na Propriedade 2, embora o campo nativo apresenta predominância de macroagregados, os sistemas de lavoura e pastagem também possuem uma maior concentração nas classes de 1,00 - 0,25 mm e 2,00 - 1,00 mm, resultando em uma menor estabilidade estrutural. Na camada de 0,10 a

0,20 m, ambas propriedades apresentaram redução na proporção de macroagregados, evidenciando menor influência da matéria orgânica em profundidade. Essa comparação ressalta que a Propriedade 1 apresenta maior estabilidade estrutural de forma geral, principalmente na camada superficial, com maior predominância de macroagregados sob campo nativo e melhor estabilidade na lavoura e pastagem, quando comparados à Propriedade 2.

A avaliação comparativa desses sistemas permite compreender os efeitos do uso e manejo do solo sobre sua estrutura e funcionamento, possibilitando propor estratégias voltadas ao manejo sustentável, conciliando produtividade agrícola e conservação ambiental. Nesse contexto, os resultados indicam que o campo nativo e a pastagem favorecem uma estrutura do solo mais heterogênea e potencialmente mais estável, enquanto que a lavoura tende a promover maior uniformidade, sobretudo em profundidade. As diferenças observadas entre as propriedades ressaltam a importância de considerar não apenas o sistema de uso do solo, mas também as características da área e o histórico de uso e manejo para a avaliação da qualidade estrutural do solo.

6.1.2 Diâmetro médio ponderado (DMP)

Tabela 5 - Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) em diferentes sistemas de uso do solo e camadas, na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Propriedade 1	
0,00 - 0,10 m	
Sistemas	DMP (mm)
Campo Nativo	4,79 a
Pastagem	2,98 b
Lavoura	2,65 b
0,10 - 0,20 m	
Campo Nativo	3,27 a
Pastagem	2,86 b
Lavoura	1,61 c

DMP: Diâmetro médio ponderado

Na Propriedade 1 (Tabela 5), os valores do diâmetro médio ponderado (DMP) evidenciam diferenças nítidas entre os sistemas de uso do solo e as camadas avaliadas. O campo nativo apresentou os maiores valores de DMP em ambas camadas, com 4,79 mm na camada de 0,00 a 0,10 m e 3,27 mm na camada de 0,10 a 0,20 m. Esses resultados indicam maior estabilidade de agregados, associada à menor interferência do solo, maior aporte contínuo de resíduos orgânicos e presença de sistema radicular diversificado. A associação entre a estabilidade estrutural e o carbono orgânico é evidenciada por Bronick & Lal (2005), os quais ressaltam que os compostos húmicos, polissacarídeos microbianos e raízes finas promovem ligações físicas mais duráveis entre as partículas, resultando em agregados mais resistentes à ação da água. Também é esperada a redução do DMP ao longo da profundidade, refletindo em um menor teor de matéria orgânica e menor atividade biológica nas camadas mais subsuperficiais.

A pastagem apresentou valores intermediários, com DMP de 2,98 mm na camada de 0,00 a 0,10 m e DMP de 2,86 mm na camada de 0,10 a 0,20 m, sugerindo

uma condição estrutural relativamente estável quando comparada à lavoura. A pequena variação entre as camadas indica que o sistema radicular das gramíneas e o menor revolvimento do solo contribuem para a manutenção da agregação do solo. Isso ocorre porque a elevada biomassa radicular promove a liberação de exsudatos e estimula a atividade microbiana, a qual atua diretamente na estabilização dos agregados do solo (Costa *et al.*, 2012). A lavoura apresentou os menores valores de DMP, principalmente na camada de 0,10 a 0,20 m, evidenciando menor estabilidade estrutural. No entanto, o revolvimento do solo e o tráfego de máquinas tendem a romper os agregados, principalmente nas camadas mais profundas, comprometendo a estrutura do solo e resultando em menores valores de DMP, conforme evidenciado por estudos que demonstram a degradação da estrutura do solo sob manejo intensivo (Luz *et al.*, 2022).

Tabela 6 - Diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) em diferentes sistemas de uso do solo e camadas, na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Propriedade 2	
0,00 - 0,10 m	
Sistemas	DMP (mm)
Campo Nativo	4,56 a
Pastagem	2,38 b
Lavoura	1,55 c
0,10 - 0,20 m	
Campo Nativo	3,76 a
Pastagem	2,77 b
Lavoura	1,74 c

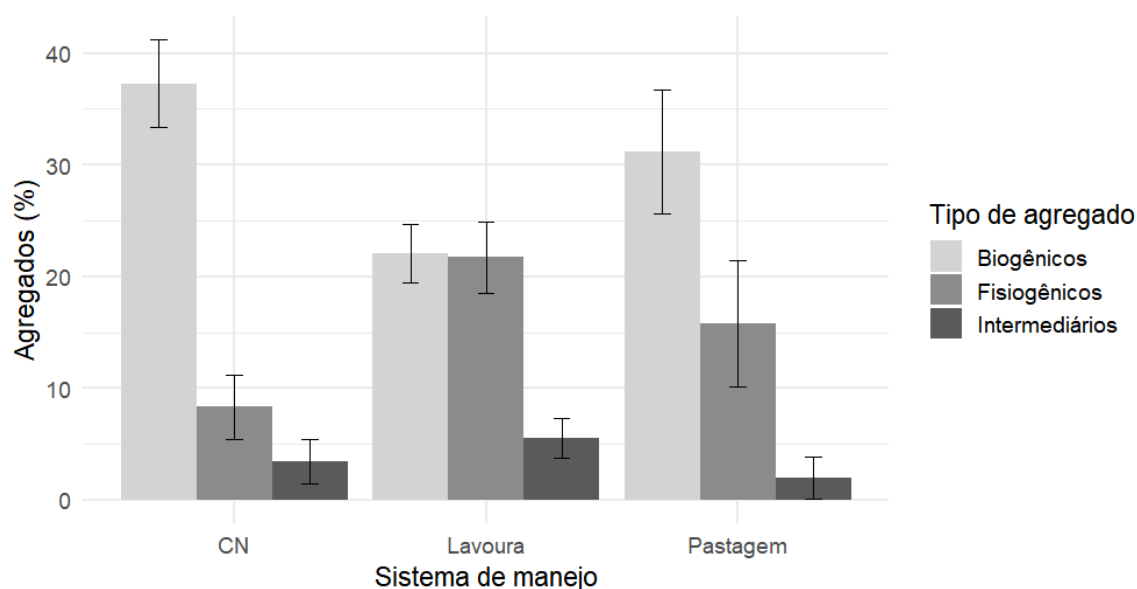
DMP: Diâmetro médio ponderado

O campo nativo apresentou os maiores valores de DMP, com 4,56 mm na camada de 0,00 a 0,10 m e 3,76 mm na camada de 0,10 a 0,20 m, confirmando a elevada estabilidade de agregados nesse sistema. Diferente da Propriedade 1, que manteve os valores elevados na camada de 0,10 a 0,20 m, indicando melhor

conservação estrutural em profundidade. A pastagem novamente apresentou valores intermediários, variando de 2,38 mm a 2,77 mm. A lavoura apresentou resultados semelhantes à Propriedade 1, com os menores valores de DMP, indicando novamente a baixa estabilidade de agregados, possivelmente relacionada ao manejo, à menor cobertura do solo e à redução do teor de matéria orgânica (Phefadu & Munjonji, 2024). Esses valores indicam que, apesar da presença de matéria orgânica, a agregação não é tão estável, provavelmente devido à menor quantidade de resíduos vegetais e às interações bióticas na camada subsuperficial, contribuindo para formação de agregados menos estáveis e suscetíveis à desestruturação (Ninomiya *et al.*, 2025).

6.2 Agregados biogênicos e fisiogênicos

Figura 20 - Massa de agregados em % na Propriedade 1 com barras de desvio padrão na camada de 0,00 a 0,10 m localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da massa de agregados entre sistemas de uso



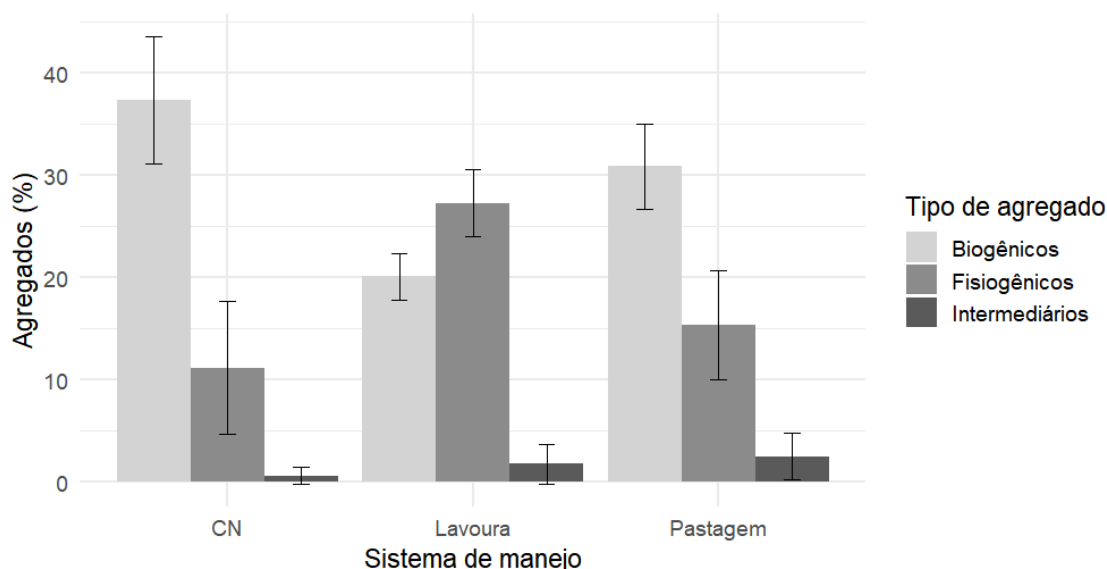
Na Propriedade 1 (Figura 20), a distribuição da massa de agregados na camada superficial (0,00 a 0,10 m) difere entre os tipos de agregados quando analisados dentro de cada sistema de manejo. No campo nativo, observa-se predominância de agregados biogênicos, que apresentaram os maiores percentuais de massa em relação aos agregados fisiogênicos e intermediários. Os agregados fisiogênicos apresentaram valores mais baixos, enquanto os intermediários

representaram a menor fração da massa total. Esse comportamento indica uma forte influência da atividade biológica na formação e estabilização dos agregados na camada superficial (0,00 a 0,10 m), especialmente em sistemas com menor revolvimento do solo e maior aporte de resíduos orgânicos. A conservação da biodiversidade edáfica favorece a formação de agregados biogênicos, essenciais para a qualidade do solo. Estes, originam-se, em grande parte, pela passagem de partículas pelo trato digestivo da macrofauna do solo, principalmente Oligochaeta (minhocas) (Bartz *et al.*, 2010). As galerias e os coprólitos produzidos por esses animais constituem as estruturas biogênicas, capazes de modificar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, desempenhando papel relevante na formação e manutenção da fertilidade em agroecossistemas. Sendo assim, os agregados biogênicos contribuem de forma significativa para a melhoria da estrutura do solo e para maior disponibilidade de nutrientes (Maffra *et al.*, 2020).

Na lavoura, verificou-se uma distribuição mais equilibrada entre os tipos de agregados, com valores próximos entre os biogênicos e fisiogênicos, ambos superiores aos agregados intermediários. Em estudos realizados por Pulleman *et al.* (2005), verificou-se que uma área de lavoura sob plantio convencional favorece a formação de agregados fisiogênicos, onde foram encontrados 67% desses agregados na camada superficial do solo, enquanto os agregados biogênicos representaram somente 7,4%.

Na pastagem, os agregados biogênicos apresentam maiores percentuais, seguidos pelos agregados fisiogênicos, enquanto os intermediários permanecem com baixa representatividade. Batista *et al.* (2013), em um estudo realizado no Cerrado Brasileiro, mostrou que a proporção relativa de agregados também é influenciada pelas épocas do ano, sendo que, no período seco prevalecem os agregados intermediários, enquanto em períodos chuvosos a predominância varia de acordo com o manejo adotado.

Figura 21 - Massa de agregados em % na Propriedade 2 com barras de desvio padrão na camada de 0,00 a 0,10 m localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão da massa de agregados entre sistemas de uso



Na Propriedade 2 (Figura 21), o padrão de distribuição dos agregados também evidenciou predominância dos agregados biogênicos, especialmente nos sistemas de campo nativo e pastagem. No campo nativo, os agregados biogênicos apresentaram os maiores percentuais, enquanto os intermediários apresentaram uma mínima participação nesse sistema. A formação de agregados pela via biogênica tende a ser mais eficiente na estabilização estrutural, na conservação da matéria orgânica e na retenção de umidade do solo, porém, mostra-se mais sensível às mudanças ambientais (Maffra *et al.*, 2020). Esses resultados reforçam a importância da atividade biológica no solo, da concentração de matéria orgânica, raízes e macrofauna edáfica. Pereira *et al.* (2021), em um estudo demonstrou que os agregados biogênicos apresentaram maior disponibilidade de nutrientes, teor de matéria orgânica em diferentes graus de decomposição e maior estabilidade em água. Essas características demonstram que os agregados biogênicos podem ser utilizados como potenciais indicadores de qualidade de manejo de solo.

Na lavoura, observaram-se maiores percentuais de agregados fisiogênicos em relação aos biogênicos, enquanto os agregados intermediários mantiveram valores baixos. Esse padrão sugere que, nesse sistema, os processos físicos associados à fragmentação e rearranjo estrutural do solo exercem papel mais relevante do que os processos biológicos na composição da massa de agregados.

Na pastagem, os agregados biogênicos apresentaram os maiores percentuais, seguidos pelos fisiogênicos, e com os intermediários permanecendo como a fração menos expressiva. Em um estudo realizado por Shimosaka *et al.* (2022) no estado de Santa Catarina, a área de pastagem também apresentou maior proporção de agregados biogênicos e maiores teores de carbono. A maior proporção de agregados biogênicos nesta área está relacionada à presença de gramíneas e do manejo em pastoreio racional voisin. Na área de frutíferas e sistema silvipastoril com núcleos arbóreos, o uso de leguminosas também influenciou positivamente nos maiores valores de carbono no solo, em comparação com a área de pastagem nas duas vias de formação de agregados.

Em um estudo de Pinto *et al.*, (2021b), o uso de gramíneas, especialmente de *Brachiaria spp.*, como plantas de cobertura, após 6 e 18 anos em sistema de plantio direto, favorece a formação de agregados biogênicos, corroborando com os resultados encontrados nas Figuras 20 e 21. Os autores também concluem que o teor de carbono orgânico no solo é influenciado pelas vias de formação de agregados, onde foram encontrados agregados biogênicos especialmente em áreas cobertas com milheto e crotalária.

6.3 Distribuição do teor de carbono orgânico total nos sistemas de uso do solo e camadas

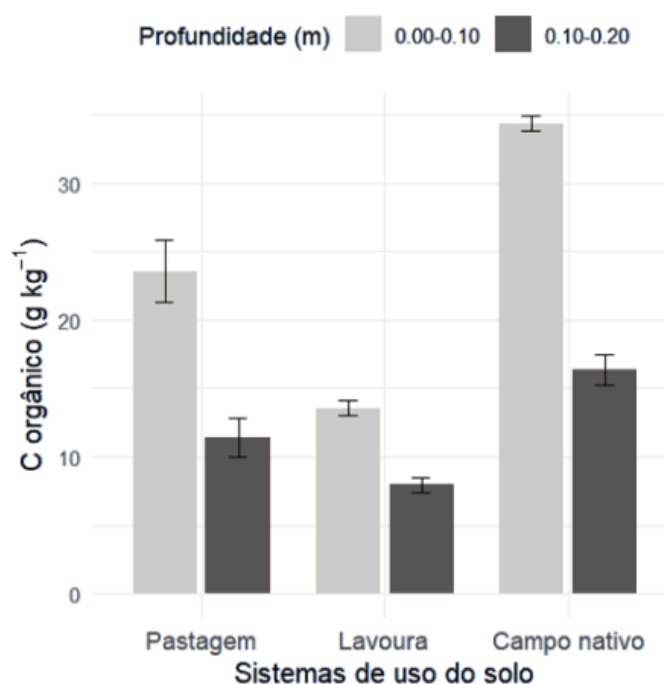
Na Propriedade 1 (Figura 22), os teores de carbono orgânica total (COT) apresentaram uma variação expressiva entre os sistemas de uso do solo e entre as camadas. Em todos os sistemas, observou-se redução dos teores com o aumento da profundidade evidenciando maior acúmulo de carbono nas camadas superficiais do solo.

Na camada de 0,00 a 0,10 m, a área de campo nativo apresentou os maiores valores de COT, com média 34,3 g kg⁻¹, seguido pela pastagem com média de 23,5 g kg⁻¹ e pela lavoura, que apresentou os menores valores, com média de 13,5 g kg⁻¹. Assim como encontrado por Ferreira *et al.* (2025), onde observaram que na área de floresta o teor de carbono orgânico foi maior na camada superficial do solo. Na camada de 0,10 a 0,20 m, esse padrão se repetiu, porém com valores mais reduzidos, atingindo média de 16,3 g kg⁻¹ no campo nativo, 11,3 g kg⁻¹ na pastagem e 7,9 g kg⁻¹

na lavoura. Em áreas com presença de árvores, como no campo nativo, contribui para o aumento do carbono orgânico no solo, devido ao aporte de resíduos vegetais e presença de raízes finas, combinação que favorece a atividade microbiana (Ninomyia *et al.*, 2025).

Esses resultados indicam que, na Propriedade 1, o campo nativo mantém maior estoque de carbono, refletindo a ausência de revolvimento do solo, a deposição contínua de resíduos vegetais e a maior diversidade radicular. Embora apresente elevado potencial de formação de agregados devido ao seu sistema radicular denso, fasciculado e diversificado, a pastagem nem sempre promove os maiores aportes de carbono ao solo, sendo que sistemas como vegetação nativa, florestas e plantio direto podem apresentar maiores estoques de carbono (Costa *et al.*, 2012). Por outro lado, os menores teores observados na lavoura sugerem efeitos do manejo agrícola adotado na área. Quando são adotados sistemas de manejos sustentáveis de produção agrícola, podem melhorar a qualidade do solo e seus atributos, além de aumentar os estoques de carbono no solo (Silva *et al.*, 2018).

Figura 22 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos diferentes sistemas de uso do solo na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre sistemas de uso

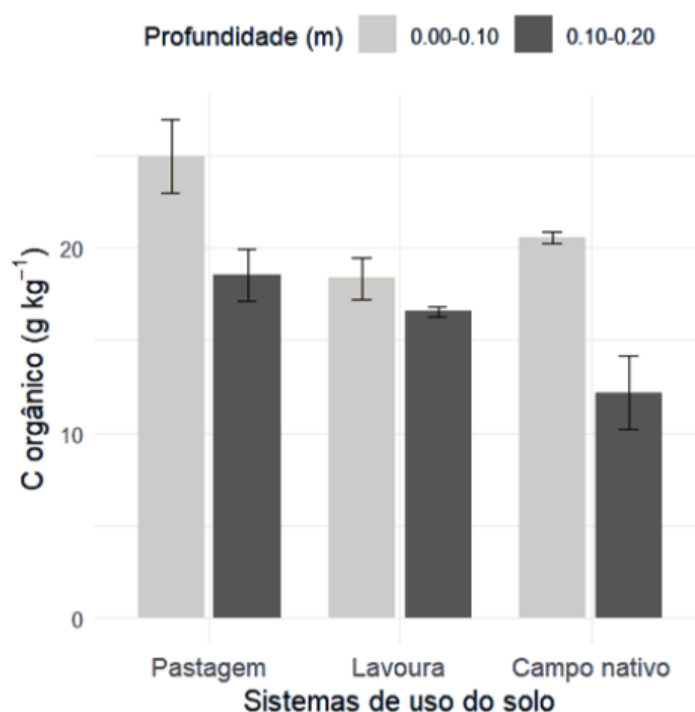


Na Propriedade 2 (Figura 23), também foi observado diminuição dos teores de COT em profundidade, embora com menor discrepância entre os sistemas de uso do

solo, quando comparado à Propriedade 1. Na camada de 0,00 a 0,10 m, a pastagem apresentou os maiores valores de COT, com média de $24,9 \text{ g kg}^{-1}$, seguida pela lavoura com $16,5 \text{ g kg}^{-1}$ e pelo campo nativo com $20,5 \text{ g kg}^{-1}$. Enquanto na camada 0,10 a 0,20 m, os valores diminuíram para $18,5 \text{ g kg}^{-1}$ na pastagem, $18,3 \text{ g kg}^{-1}$ na lavoura e $12,2 \text{ g kg}^{-1}$ no campo nativo.

Ao contrário da Propriedade 1, na Propriedade 2 a pastagem apresentou melhor desempenho que o campo nativo, principalmente na camada de 0,00 a 0,10 m. Esse comportamento pode estar relacionado a presença de plantas forrageiras na área, as quais promovem a adição de carbono e assim aumentam a fauna do solo (Camargo *et al.*, 2015).

Figura 23 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos diferentes sistemas de uso do solo na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre sistemas de uso



A redução dos teores com a profundidade em ambas propriedades reforça o papel da camada superficial como principal compartimento de acúmulo de carbono, sendo altamente sensível às mudanças no uso e manejo do solo (Medeiros *et al.*, 2022). Os resultados reforçam a relevância de sistemas que reduzem o revolvimento do solo e aumentam o aporte de resíduos vegetais na conservação do carbono orgânico. A pastagem, quando inserida em sistemas de rotação, favorece o aporte de

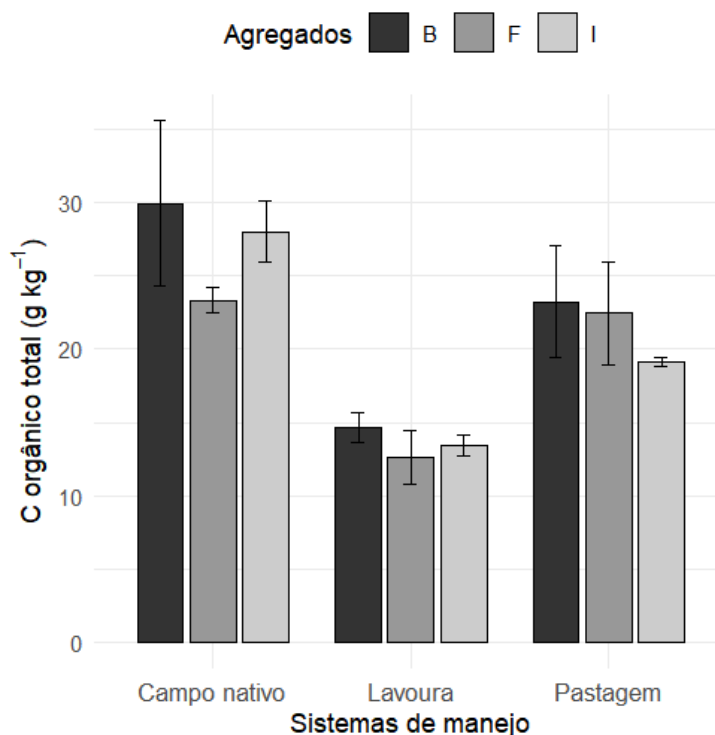
carbono e a melhoria dos índices de agregação do solo (Loss *et al.*, 2011; Loss *et al.*, 2014).

6.4 Distribuição do teor de carbono orgânico total nas diferentes classes de agregados

Para corroborar com os resultados da análise morfológica dos agregados biogênicos e fisiogênicos e com a análise visual da estrutura do solo (VESS), foi quantificado as frações de carbono orgânico do solo (COT), confirmando que solos das áreas de campo nativo possuem maiores teores de COT e melhor qualidade estrutural a partir da cartilha de VESS, sendo classificado como Q1, um solo friável, com alta porosidade e raízes por solo o solo, enquanto as áreas de lavoura possuem menores teores de COT e são classificados como Q2, solos intactos, mas ainda com alta porosidade.

Os diferentes tipos de agregados formados, além de apresentarem diferentes características morfológicas, também apresentam características distintas quanto à composição química, uma vez que os agregados biogênicos possuem uma correlação positiva com os teores de carbono no solo para o processo de formação (Batista *et al.*, 2013). A distribuição do carbono orgânico total (COT) nas classes de agregados está apresentada nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos agregados biogênicos (B), fisiogênicos (F) e intermediários (I) nos diferentes sistemas de manejo na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre sistemas de uso



Na Propriedade 1 (Figura 24), os teores de COT variaram de forma uniforme entre os tipos de agregados (biogênicos, fisiogênicos e intermediários) e entre os sistemas de manejo e uso, evidenciando a influência das vias de formação de agregados na proteção e no acúmulo de matéria orgânica.

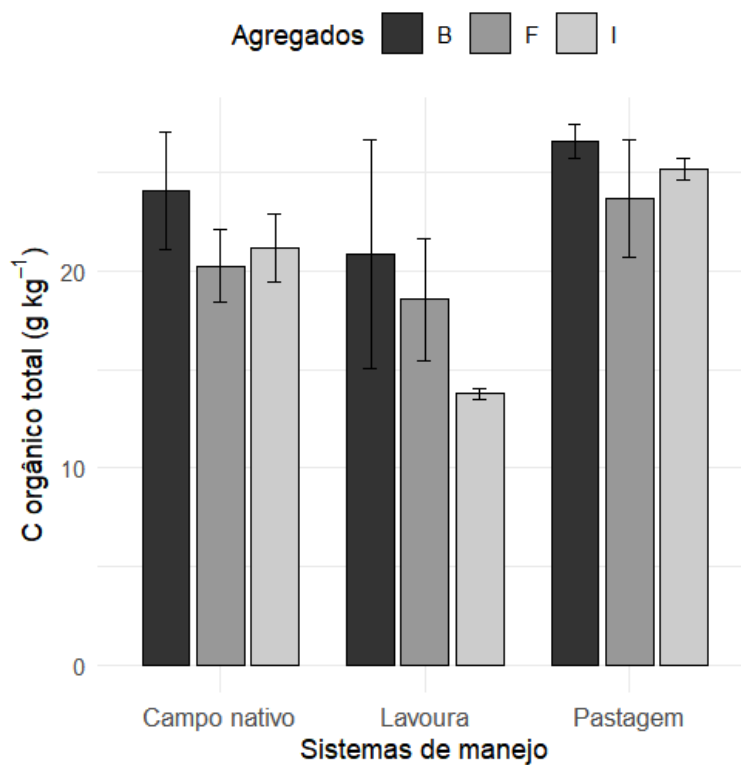
No campo nativo, os agregados biogênicos apresentaram os maiores teores de COT, com valores de 30 g kg⁻¹, seguidos pelos agregados intermediários com 27,8 g kg⁻¹ e os fisiogênicos com 24,5 g kg⁻¹. Bossuyt *et al.* (2005) encontraram resultados semelhantes, com um acréscimo de 22% em carbono orgânico nos agregados biogênicos em comparação aos agregados fisiogênicos. Estudos de Mergen Junior *et al.* (2019) também corroboram com estes resultados, apresentando maiores teores de carbono orgânico total nos agregados biogênicos. Os resultados indicam que o manejo do solo exerce papel determinante na formação dos agregados, uma vez que, em condições de baixa perturbação, a atividade biológica favorece a formação de agregados biogênicos com elevada concentração de carbono e maior estabilidade estrutural.

Durante a separação visual dos agregados, foi possível observar uma maior proporção de coprólitos de minhocas na área de campo nativo, quando comparado com as demais áreas analisadas. Da mesma forma que é possível observar que há maior influência da macrofauna nestes agregados biogênicos, esta proporção também pode estar relacionada com o maior teor de carbono orgânico no solo, o qual foi encontrado nesta mesma área. As minhocas estão associadas à formação dos agregados biogênicos, que são altamente influenciados pela disponibilidade de matéria orgânica (Batista *et al.*, 2013).

Na lavoura, os teores de COT foram menores em todos os tipos de agregados, variando de 15 g kg⁻¹ nos biogênicos, 13 g kg⁻¹ nos fisiogênicos e 14 g kg⁻¹ nos intermediários. Esse comportamento sugere que o manejo agrícola, possivelmente associado ao revolvimento do solo, reduz tanto o acúmulo quanto a diferenciação do carbono entre as vias de formação de agregados (Six *et al.*, 1999; Pereira *et al.*, 2021). Na pastagem, os agregados biogênicos apresentaram os maiores teores de COT, com média de 24,5 g kg⁻¹, seguido pelos fisiogênicos com 22,3 g kg⁻¹ e os intermediários com 20 g kg⁻¹.

Sendo assim, na Propriedade 1, os agregados biogênicos apresentaram maiores teores de COT em todos os sistemas avaliados. Fernandes *et al.* (2017), também encontraram valores maiores de COT em agregados biogênicos, quando comparados aos agregados fisiogênicos e intermediários. Dessa forma, os agregados biogênicos, em conjunto com a estabilidade de agregados, podem ser utilizados como indicadores de qualidade do solo, contribuindo significativamente para a capacidade de armazenamento de carbono, bem como a manutenção de nutrientes do solo.

Figura 25 - Teor de carbono orgânico total (COT) nos agregados biogênicos (B), fisiogênicos (F) e intermediários (I) nos diferentes sistemas de manejo na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. As barras verticais indicam o desvio padrão do COT entre os sistemas



Na Propriedade 2 (Figura 25), o teor de COT no campo nativo foi de 22,6 g kg⁻¹ nos agregados biogênicos, 20 g kg⁻¹ nos fisiogênicos e 21 g kg⁻¹ nos intermediários. No sistema de lavoura observou-se redução do COT, especialmente nos agregados intermediários, que apresentou 14,2 g kg⁻¹, enquanto os agregados biogênicos e fisiogênicos obtiveram 21,7 g kg⁻¹ e 19,2 g kg⁻¹, respectivamente. A pastagem apresentou os maiores teores de COT da Propriedade 2, com 26,2 g kg⁻¹ de agregados biogênicos, 24,4 g kg⁻¹ nos fisiogênicos e 25,3 g kg⁻¹ nos intermediários, superando os valores observados na área de campo nativo. Segundo Pulleman *et al.* (2005) os teores de carbono orgânico tendem a ser mais elevado nos agregados biogênicos do que nos fisiogênicos em uma área de pastagem permanente e uma de lavoura orgânica.

6.5 Análise visual da estrutura do solo (VESS)

A avaliação da qualidade estrutural do solo por meio do VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) evidenciou diferenças entre os usos do solo nas duas propriedades avaliadas (Tabela 7 e 8). A interpretação dos escores foi realizada com base na cartilha metodológica do VESS descrita por Ball *et al.*, (2007) e adaptada por Guimarães *et al.*, (2011), a qual permite relacionar atributos visuais, como porosidade, tamanho e forma de agregados, presença de raízes e resistência à desagregação, com processos físicos e biológicos.

Tabela 7 - Avaliação visual da estrutura do solo (VESS), com respectivos escores e classes de qualidade estrutural, na camada de 0,00 - 0,20 m, em diferentes usos do solo (lavoura, pastagem e campo nativo) na Propriedade 1 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

Propriedade 1		
0,00 - 0,20 m		
Uso do solo	Escore VESS	Qualidade estrutural
Lavoura	2	Q2
Pastagem	1	Q1
Campo Nativo	1	Q1

Q1 – Friável; Q2 - Intacto; Q3 - Firme; Q4 - Compacto; Q5 – Muito compacto.

Na Propriedade 1 (Tabela 7), a área de lavoura apresentou escore igual a 2, enquadrando-se na classe Q2 (estrutura intacta). Segundo a cartilha utilizada, essa classe é caracterizada por agregados relativamente porosos, de formato arredondado, que se quebram facilmente com uma mão. Esse resultado sugere que, embora o manejo agrícola tenha promovido algum grau de alteração estrutural, a estrutura do solo ainda mantém condições razoáveis de porosidade. Em um estudo realizado por Lima *et al.* (2018) em Piracicaba, no estado de São Paulo, concluiu-se que o VESS é um bom indicador para avaliar os impactos de máquinas agrícolas e outros implementos de preparo sobre a qualidade do solo.

As áreas de pastagem e campo nativo apresentaram escore igual a 1, sendo classificadas como Q1 (estrutural friável). De acordo com a cartilha, essa classe representa a condição estrutural mais favorável, caracterizada por alta porosidade, agregados pequenos e bem definidos, que se desagregam facilmente com os dedos, além de elevada presença de raízes distribuídas por todo o solo. Esses atributos

refletem a predominância de processos biológicos na formação e estabilização de agregados.

Tabela 8 - Avaliação visual da estrutura do solo (VESS), com respectivos escores e classes de qualidade estrutural, na camada de 0,00 - 0,20 m, em diferentes usos do solo (lavoura, pastagem e campo nativo) na Propriedade 2 localizada no Passo da Micaela, interior do município de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

Propriedade 2		
0,00 - 0,20 m		
Uso do solo	Escore VESS	Classe estrutural
Lavoura	2.65	Q2
Pastagem	1	Q1
Campo Nativo	2.1	Q2

Q1 – Friável; Q2 - Intacto; Q3 - Firme; Q4 - Compacto; Q5 – Muito compacto.

Na Propriedade 2 (Tabela 8), observou-se maior variabilidade estrutural entre os usos do solo. A lavoura apresentou escore de 2,65, enquadrando-se na classe Q2, indicando uma condição estrutural menos favorável. Conforme a cartilha, os valores próximos a 3 sugerem agregados menos porosos e com maior resistência à desagregação.

A pastagem apresentou escore igual a 1, resultado que indica elevada porosidade, abundância de raízes e agregados facilmente destorroados. O campo nativo, apresentou escore igual a 2,1, também classificado como Q2. Essa condição indica agregados intactos, porém com menor porosidade e maior coesão, o que pode refletir diferenças intrínsecas do solo, do relevo ou do histórico de uso da área. A vegetação natural presente no local, o que contribui para as condições físicas serem mais favoráveis à aeração e à movimentação de água no solo (Gentsch *et al.*, 2024; Rabot *et al.*, 2018). A presença de raízes e hifas fúngicas no interior e no entorno dos agregados contribui para sua estabilização, uma vez que esses organismos produzem compostos orgânicos que atuam como agentes ligantes entre as partículas do solo (Bronick & Lal, 2005).

Esses resultados reforçam a importância da utilização conjunta de indicadores quantitativos, como a densidade do solo, e avaliações qualitativas, como a análise visual da estrutura, na interpretação da qualidade estrutural do solo.

7 Conclusão

Sistemas de uso e manejo do solo influenciam significativamente a estabilidade de agregados e os teores de carbono orgânico total de um Argissolo Vermelho-Amarelo.

O campo nativo apresentou melhor qualidade estrutural, caracterizada pela, maior estabilidade e proporção de agregados biogênicos seguido de carbono orgânico, especialmente na camada de 0,00 a 0,10m, evidenciando a importância da baixa interferência e da contínua deposição de resíduos vegetais para a manutenção da qualidade do solo.

A pastagem apresentou comportamento intermediário, com contribuição significativa para a formação de agregados biogênicos e manutenção da estrutura, embora com indícios de compactação associados ao pisoteio animal, o que reforça que o manjo do pastejo exerce papel determinante sobre a qualidade estrutural.

A lavoura, submetida à plantio direto, apresentou menor estabilidade estrutural com predominância de agregados fisiogênicos, e redução nos teores de carbono orgânico. Confirmando a hipótese de que sistemas agrícolas tendem a apresentar maior degradação estrutural, mesmo sob práticas conservacionistas como o plantio direto.

Verificou-se relação positiva entre os teores de carbono orgânico e a estabilidade de agregados, confirmando que o carbono desempenha papel fundamental na formação e estabilização da estrutura do solo, atuando como agente cimentante e favorecendo a agregação.

A Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) corroborou os resultados obtidos pelos métodos quantitativos, mostrando-se eficiente na identificação de diferenças estruturais entre os sistemas de uso.

8 Referências

- AHMED, M. S.; NASRIN, S.; HALDER, M. **Does the presence of mineral nutrient enhance the carbon sequestration, soil aggregation, and microbial biomass in the subtropical clay soil?** Discover Soil, v. 1, p. 10, 2024.
- AYRES, M.; AYRES JÚNIOR, M.; AYRES, D. L.; SANTOS, A. A. **BIOESTAT. Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas.** Belém, PA: Ong Mamirauá, 2007.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAÚJO, A. L. de; OLIVEIRA, R. T. de; FERREIRA, T. O.; ROMERO, R. E.; OLIVEIRA, T. S. de. **Avaliação da estrutura do solo utilizando métodos participativos na região semiárida brasileira.** Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 411-418, 2013.
- ASKARI, M. S.; HOLDEN, N. M. **Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management.** Geoderma, v. 230, p. 131-142, 2013.
- BHAT, S. A.; QADRI, S. A. A.; DUBBEY, V.; SOFI, I. B.; HUANG, N.-F. **Impact of crop management practices on maize yield: insights from farming in tropical regions and predictive modeling using machine learning.** Journal of Agriculture and Food Research, v. 18, p. 101392, 2024.
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. **Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerlkamp test.** Soil Use and Management, v. 23, n. 4, p. 329-337, 2007.
- BASILE-DOELSCH, I.; BALESSENT, J.; PELLERIN, S. **Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil.** Biogeosciences, v. 17, n. 21, p. 5223-5242, 2020.
- BARTZ, M. L. C.; COSTA, A. C. S.; TORMENA, C. A.; SOUZA JR., G.; BROWN, G. G. **Sobrevivência, produção e atributos químicos de coprólitos de minhocas em um Latossolo Vermelho Distroférrico (Oxisol) sob diferentes sistemas de manejo.** Acta Zoológica Mexicana, v. 26, p. 261-280, 2010.
- BATISTA, I. **Atributos edáficos e fauna do solo em áreas de integração lavoura-pecuária no Bioma Cerrado, Mato Grosso do Sul.** 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. **Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS.** Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 34, n. 4, p. 1535-1548, 2013.

BOSSUYT, H.; SIX, J.; HENDRIX, P. F. **Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts.** Soil Biology & Biochemistry, Oxford, v. 37, n. 2, p. 251-258, 2005.

BRONICK, C. J.; LAL, R. **Soil structure and management: A review.** Geoderma, v. 124, n. 1–2, p. 3-22, 2005.

BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for Soil Thin Section Description.** Albrighton: Waine Research Publications, 1985. 152 p.

CAMARGO, F. F.; SANTOS, A.; CARDOSO, G. B. X.; NADOLNY, H.; ASSUNÇÃO, R. R.; MENDONÇA NEGRETTI, T. F.; DINIZ NEGRETTI, B.; MARANHÃO FROUFE, L. C.; BROWN, G. G. **Comunidades de minhocas em diferentes tipos de uso do solo localizados na Área de Proteção Ambiental da Serra da Mantiqueira-MG.** In: 5º Encontro Latino-Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligoquetas, 1., 2015, Curitiba. Curitiba: Embrapa Florestas, 2017. p. 63-68.

CAMPOS, B. H. **Estudo de caso de atributos físicos de solo no bioma cerrado, em diferentes sistemas de uso e manejo.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2021.

CAMPOS, M. C. C.; SOUSA, A. C. dos S.; CARNEIRO, M. R. S.; BRITO FILHO, E. G. de; SILVA, J. de B.; SANTOS, R. V. dos. **Vias de formação e classes de agregados em áreas sob floresta e pastagem em Areia, PB.** Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente, v. 13, n. 2, p. 180-191, 2022.

CERECETTO, Victoria; SANTOS, S. S.; SCHMIDT, R.; et al. **Pasture-crop rotations modulate the soil and rhizosphere microbiota and preserve soil structure supporting oat cultivation in the Pampa biome.** Soil Biology and Biochemistry, v. 196, 2024.

CHENG, W.; BU, R.; HAN, S.; TANG, S.; WANG, H.; LI, M.; ZHU, R.; JIANG, F.; TANG, M.; WU, J. **Effects of deep tillage combined with organic amendments application on carbon and nitrogen storage within aggregates and wheat yield.** Frontiers in Plant Science, Lausanne, v. 16, p. 1669580, 2025.

COSTA, C.; PÍCCOLO, M. de C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. **Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1311-1321, 2012.

DE LOS RIOS, J.; POYDA, A.; TAUBE, F.; KLUß, C.; LOGES, R.; REINSCH, T. **No-till mitigates SOC losses after grassland renovation and conversion to silage maize.** Agriculture, v. 12, n. 8, p. 1204, 2022.

DOWDESWELL-DOWNEY, E.; GRABOWSKI, R. C.; RICKSON, R. J. **Do temperature and moisture conditions impact soil microbiology and aggregate stability?** Journal of Soils and Sediments, v. 23, p. 3706-3719, 2023.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise do Solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 2011. 230 p.

FERNANDES, J. C. F.; PEREIRA, M. G.; NETO, E. C. da S.; CORRÊA NETO, T. de A. **Caracterização de agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos em áreas sob domínio de Mata Atlântica**. Revista Caatinga, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 59-67, 2017.

FLORA, D. P. D.; CORTEZ, J. W.; TOMAZI, M.; SERPA, F. C.; SCHWAMBACH, D. A. **A variabilidade granulométrica determina a distribuição de carbono orgânico e atributos físicos do solo em semeadura direta**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 18, n. 3, p. 1904-1916, 2025.

FERREIRA, E. É. da S.; SAUCEDA, M.; WEBER, O. L. dos S.; CASTELLÓN, N.; SOARES, K. R. **Carbono e nitrogênio em agregados do solo cultivados com cana-de-açúcar na região sudoeste de Mato Grosso**. Observatorio de la Economía Latinoamericana, Curitiba, v. 23, n. 3, p. 01-20, 2025.

GENTSCH, N.; RIECHERS, F. L.; BOY, J.; SCHWENEKER, D.; FEUERSTEIN, U.; HEUERMANN, D.; GUGGENBERGER, G. **Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions**. Soil, v. 10, n. 1, p. 139-150, 2024.

GIAP, S. G. E.; AHMAD, M. F. **Factors affecting soil bulk density: a conceptual model**. Journal of Soil, Environment & Agroecology, v. 1, n. 1, p. 27-45, 2024.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C. **On the Visual Evaluation of Soil Structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage**. Soil and Tillage Research, v. 127, p. 60-64, 2013.

GIMÉNEZ, Matías; BERENSTECHER, Paula; LIGRONE, Andrés; IRAOLA, Gregorio; PIÑEIRO, Gervasio. **Soil microbiome analysis of Uruguayan grasslands and croplands reveals losses of microbial diversity and necromass recycling traits**. Environmental Microbiome, v. 20, p. 96, 2025.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. **Improvements in the visual evaluation of soil structure**. Soil Use and Management, v. 27, n. 3, p. 395-403, 2011.

GUIMARÃES, R. M.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L. J.; BALL, B. C.; KELLER, T. **Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research**. Soil & Tillage Research, v. 173, p. 104-113, 2017.

HAMIDO, S. A.; GHALEHGOLABBEHBAHANI, A.; SMITH, A. **Soil carbon dynamics, sequestration potential, and physical characteristics under grazing management in regenerative organic agroecosystems**. Agronomy, Basel, v. 15, n. 10, 2426, 2025.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p. 425-441, 1986.

KUNDE, R. J.; LIMA, A. C. R. de; SILVA, J. L. S. da; VALGAS, R. A.; PILLON, C. N. **Qualidade do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária no Bioma Pampa**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 13, n. 4, e5591, 2018.

LI, T.; CUI, L.; KUHNERT, M.; McLAREN, T. I.; PANDEY, R.; LIU, H.; WANG, W.; XU, Z.; XIA, A.; DALAL, R. C.; DANG, Y. P. **A comprehensive review of soil organic carbon estimates: Integrating remote sensing and machine learning technologies**. Journal of Soils and Sediments, v. 24, p. 3556-3571, 2024.

LIMA, C. C. de; DE MARIA, I. C.; DA SILVA GUIMARÃES JÚNNYOR, W.; DA SILVA, L. F. S.; ROSSETTO, R. **Visual Evaluation of Soil Structural and Sugarcane Root Under Deep Strip-till and Conventional Tillage**. Journal of Agricultural Science, v. 10, n. 11, p. 231-241, 2018.

LIMA, A. F. L.; BRITO FILHO, E. G.; CAMPOS, M. C. C.; BONDADE, B. B.; ALMEIDA, R. G.; PINHEIRO, E. N.; CAVALCANTE, E. C.; OLIVEIRA, F. P. **Pastagens amazônicas: uma revisão sobre o avanço da pecuária sobre as terras amazônicas**. Revista Valore, v. 8, p. 37-50, 2023.

LIMA, A. F. L. de; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, J. B.; ARAÚJO, W. O.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, F. G. de; BEIRIGO, R. M.; SILVA, D. M. P.; MACEDO, R. S.; OLIVEIRA, F. P. de. **The stability of aggregates in different Amazonian agroecosystems is influenced by the texture, acidity, and availability of Ca and Mg in the soil**. Agronomy, Basel, v. 14, n. 4, p. 677, 2024.

LIU, J.; YANG, Y.; ZHOU, J.; FENG, X.; LI, Y.; LI, Y.; ZI, J.; WANG, C.; WANG, E.; JIA, Y. **Evaluation of soil aggregate sieving: the impact of field moisture content on size distribution and stability**. Agronomy, v. 15, n. 3, p. 558, 2025a.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. **Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. **Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ¹³C and ¹⁵N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems**. Soil Research, v. 52, n. 7, p. 685-697, 2014.

LUZ, F. B.; CASTIONI, G. A. F.; TORMENA, C. A.; FREITAS, R. S.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. **Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields**. Soil & Tillage Research, v. 223, p. 105459, 2022.

MAFFRA, A. A.; SILVA NETO, E. C. da; BRUMANO, F. L.; BEZERRA, G. S. F.; PEREIRA, M. G. **Gênese e estabilidade de agregados em solos no Parque Natural Municipal de Nova Iguaçu - RJ**. Agropecuária Científica no Semiárido, Patos-PB, v. 16, n. 2, p. 64-70, 2020.

MARQUES FILHO, A. C.; MOURA, M. S.; MELO, A. C.; DAMASCENO, F. A.; LANÇAS, K. P. **Soil compaction in progressive agricultural tractor treads.** Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 18, e1117, 2024.

MEDEIROS, A. S.; MAIA, S. M. F.; SANTOS, T. C.; GOMES, T. C. **Losses and gains of soil organic carbon in grasslands in the Brazilian semi-arid region.** Scientia Agricola, Piracicaba, v. 78, n. 3, 2021.

MEDEIROS, A. S.; SANTOS, T. C.; MAIA, S. M. F.; CORRÊA, M. F.; ALMEIDA, F. C.; RODRIGUES, C. H.; LIMA, J. L. S.; UEBER, M. M. **Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil.** Soil & Tillage Research, v. 219, p. 105336, 2022.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; DOS SANTOS JUNIOR, E.; GIUMBELLI, L. D.; PINHO, D.; ABREU, L.; LOURENZI, C. R.; COMIN, J. J.; BRUNETTO, G. **Caracterização física de agregados do solo submetido a 10 anos de aplicação de dejetos suínos.** Revista de Ciências Agrícolas, v. 26, n. 1, p. 79-92, 2019.

NINOMIYA, L. S. **Tecnologia acessível para avaliação da qualidade do solo e otimização da amostragem.** 2025. Dissertação - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2025.

PANAGOS, P.; DE ROSA, D.; LIAKOS, L.; LABOUYRIE, M.; BORRELLI, P.; BALLABIO, C. **Soil bulk density assessment in Europe: implications for soil compaction and soil health monitoring.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 364, p. 108907, 2024.

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BATISTA, I.; MELO, T. R.; SILVA NETO, E. C.; PINTO, L. A. S. R. **Biogenic and physicogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 45, p. e0210108, 2021.

PHEFADU, K.; MUNJONJI, L. **Assessing the impact of no-tillage duration on soil aggregate size distribution, stability and aggregate associated organic carbon.** Agronomy, v. 14, n. 2482, p. 1-12, 2024.

PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G. **Physicogenic and biogenic aggregates under different management systems in the Cerrado region, Brazil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 45, 2021a.

PINTO, L. A. S. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; LIMA, W. F. S. J.; SERENA, S.; FIGUEIRA DA SILVA, C.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. **Soil organic matter of aggregates physicogenic and biogenic in areas under no-tillage system in the Cerrado, Brazil.** Research, Society and Development, v. 10, n. 5, 2021b.

PULLEMAN, M. M.; VAN WAARDEN, L. F.; VAN AERT, M.; VAN LEEUWEN, J. P.; KROES, M.; SCHOUTEN, T. A.; JONGMANS, A. G.; VAN BODEGOM, P. M.; JONGERDEN, M. R.; DE GROOT, W. J. **Earthworms and management affect**

organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. Applied Soil Ecology, v. 29, n. 1, p. 1-15, 2005.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H. J. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** Geoderma, v. 314, p. 122-137, 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. **Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas.** Ciência e Ambiente, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** 2. ed. Barueri: Manole, 2022.

RILLIG, M. C.; WRIGHT, S. F.; NICHOLS, K. A.; SCHMIDT, W. F.; TORN, M. S. **Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils.** Plant and Soil, v. 233, n. 2, p. 167-177, 2001.

RILLIG, M. C.; MULLER, L. A. H.; LEHMANN, A. **Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators.** ISME Journal, v. 11, n. 9, p. 1943-1948, 2017.

ROCHA, A. K. P.; ALVES, C. P.; SILVA, J. N.; SILVA, T. G. F.; LEITE, M. L. M. V.; CIRINO JUNIOR, B. **Principais ecossistemas usados como pastagem nativa do Brasil: uma revisão.** Research, Society and Development, v. 9, n. 10, e3859108592, 2020.

RODRIGUEZ, A. M.; VERBURG, P. H.; ALKEMADE, R.; SCHIPPER, A. M. **Classification of agricultural land management systems for global modeling of biodiversity and ecosystem services.** Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 353, p. 108593, 2023.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; MOURA, O. V. T.; ALMEIDA, A. P. C. **Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob sistemas de manejo agroecológico.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1677-1685, 2016.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. **Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; ARANTES, M.; ZIMMER, A. H.; RICHETTI, A.; TOMAZI, M.; KRUKER, J. M.; MERCANTE, F. M.; KICHEL, A. N. **Sistema São Mateus: viabilidade técnico-econômica do sistema integrado de produção no Bolsão Sul-Matogrossense.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. Circular Técnica, 40, 12 p., 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).** Embrapa Solos, 2025.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

SHIMOSAKA, A. M. **Caracterização físico-química de agregados no Sistema Silvipastoril com Núcleos: uma análise comparativa em diferentes usos e ocupações dos solos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Florianópolis, 2022.

SILVA, J. C. N.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; DANTAS, E. F.; DO SACRAMENTO, J. A. A. S. **Aggregation, carbon, and total soil nitrogen in crop-livestock-forest integration in the Eastern Amazon.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 12, p. 837-842, 2018.

SILVA, O. M.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. **Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SILVA, M. O.; SANTOS, M. P.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, R. L. V.; MOURA, I. A. A.; SILVA, R. S.; COSTA, K. D. S. **Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 1, 2021.

SILVA NETO, E. C. da; PEREIRA, M. G.; FERNANDES, J. C. F.; CORRÊA NETO, T. A. **Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation in Atlantic Forest from Southeastern Brazil.** Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 37, n. 6, p. 3927-3940, 2016.

SIMON, Logan M.; OBOUR, Augustine K.; HOLMAN, Jonathan D.; JOHNSON, Sandy K.; ROOZEBOOM, Kraig L. **Cover crop grazing effects on soil properties in no-tillage dryland cropping systems in the central Great Plains.** Agricultural Systems, v. 218, 2024.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. **Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems.** Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 63, n. 5, p. 1350-1358, 1999.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. **Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil.** Soil and Tillage Research, v. 161, p. 71-78, 2016.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; BELLÉ, C.; ANTONIOLLI, Z. I. **Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise.** Revista Agronomia Brasileira, v. 3, n. 4, 2019.

SOUZA, T. C.; BELLON, G. J.; CARVALHO, A. H. de O. **Atributos físicos do solo sob diferentes sistemas agroflorestais na região do Caparaó/ES.** XXIX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XXV Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e XIX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica Júnior - Anais, São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba - Univap, 2025.

TANAKA, R. T.; WEBER, O. L. dos S.; TORRES, G. N.; MIRANDA, J. G. de; COUTO, E. G. **Soil aggregation and organic carbon under different management systems in the cerrado of Mato Grosso**. Revista Caatinga, Mossoró, v. 38, e12508, 2025.

TELLES, T.; MELO, T.; RIGHETTO, A.; DIDONÉ, E.; BARBOSA, G. **Soil management practices adopted by farmers and how they perceive conservation agriculture**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 46, p. 0210151, 2022.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1985. 188 p. (Boletim Técnico, 5).

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. **Organic matter and water-stable aggregates in soils**. European Journal of Soil Science, v. 33, n. 2, p. 141-350, 1982.

TUCHTENHAGEN, I. K. **Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS**. Tese Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação da Água e do Solo, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

TUCHTENHAGEN, I. K.; LIMA, C. L. R.; BAMBERG, A. L.; GUIMARÃES, R. M. L.; MANSONIA, P.-M. **Visual Evaluation of the Soil Structure under Different Management Systems in Lowlands in Southern Brazil**. Revista Brasileira De Ciência Do Solo, v. 42, e0170270, 2018.

VICENTE, T. F. da S.; PEDROSA, E. M. R.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; OLIVEIRA, A. K. S.; SOUZA, A. M. P. L. **Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 11, p. 1215-1222, 2012.

VIZIOLI, B.; POLIZELI, K. M. V. C.; TORMENA, C. A.; BARTH, G. **Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol**. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v. 209, p. 104935, 2021.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. **An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method**. Soil Science, v. 37, p. 29-38, 1934.

WANG, X.; ZHANG, Y. **Soil pore structure: formation, function and research methods**. Soil and Water Research, v. 19, n. 1, p. 1-24, 2024.

WU, X.; FU, D.; DUAN, C.; HUANG, G.; SHANG, H. **Distributions and influencing factors of soil organic carbon fractions under different vegetation restoration conditions in a subtropical mountainous area, SW China**. Forests, v. 13, n. 4, art. 629, 2022.

YODER, R. E. **A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses.** Journal of the American Society of Agronomy, v. 28, p. 337-351, 1936.

ZHAO, Z.; MAO, Y.; GAO, S.; LU, C.; PAN, C.; LI, X. **Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system.** Scientific Reports, v. 13, p. 3665, 2023.