

QUALIDADE FÍSICA E CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM CAMBISSOLO HÁPLICO SOB PASTEJO ROTACIONADO DE LONGO PRAZO COM APLICAÇÃO DE DEJETO LÍQUIDO DE SUÍNOS

¹Alieze Nascimento da Silva, ²Eveline Ferreira Soares, ³Mariza Tereza Souza do Prado, ⁴Rodrigo Ferreira Da Silva, ⁴Vanderlei Rodrigues Da Silva, ⁴Claudir José Basso, ⁵Cícero Ortigara

¹ Doutora em Agronomia, Docente da Universidade de Cruz Alta, UNICRUZ, Campus Cruz Alta, Brasil
mail: alieze.agro@gmail.com

²Doutoranda em Fitotecnia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

³ Graduanda em Agronomia pelo Instituto Federal Farroupilha, Campus Panambi, RS, Brasil

⁴Docente na Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen, Brasil

⁵ Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Recebido em: 15/01/2026 – Aprovado em: 02/03/2026 – Publicado em: 30/03/2026
DOI: 10.18677/EnciBio_2026A12

RESUMO

A intensificação de sistemas pastorais demanda estratégias de manejo que conciliem produtividade e conservação do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar as alterações em indicadores físicos da qualidade do solo em um Cambissolo Háplico sob pastagem perene manejada em sistema de pastejo rotacionado, com e sem aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS), ao longo de diferentes tempos de manejo. O estudo foi conduzido no município de Taquaruçu do Sul, RS, comparando áreas sob pastejo rotacionado há cinco anos (Past 5), pastejo rotacionado com fertirrigação com DLS por cinco anos (Past 5 IR), pastejo rotacionado há quinze anos (Past 15) e mata nativa como referência. Foram avaliados atributos físicos e mecânicos do solo nas camadas de 0,00–0,30 m, incluindo densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, pressão de preconsolidação e índice de compressão. Os resultados indicaram aumento da compactação nas áreas sob pastejo, especialmente nas camadas superficiais, evidenciado por maiores valores de densidade do solo, densidade relativa e resistência à penetração, em comparação à mata nativa. O sistema Past 15 apresentou sinais de maior estabilização estrutural em relação às áreas com menor tempo de manejo. A aplicação de DLS apresentou efeitos moderados sobre os indicadores físicos, com respostas mais evidentes associadas ao maior tempo de manejo. Conclui-se que o pastejo rotacionado, embora contribua para a sustentabilidade produtiva, não elimina os efeitos do pisoteio animal sobre a qualidade física do solo, sendo o tempo de manejo um fator determinante para a reorganização estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: compactação do solo; pastejo rotacionado; qualidade física do solo;

PHYSICAL QUALITY OF A HAPLIC CAMBISOL UNDER LONG-TERM ROTATIONAL GRAZING WITH PIG SLURRY APPLICATION

ABSTRACT

The intensification of pasture-based systems requires management strategies that reconcile productivity with soil conservation. This study aimed to evaluate changes in physical soil quality indicators in a Haplic Cambisol under perennial pasture managed with rotational grazing, with and without pig slurry application (PS), over different management durations. The study was conducted in the municipality of Taquaruçu do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil, comparing areas under rotational grazing for five years (Past 5), rotational grazing with pig slurry fertigation for five years (Past 5 IR), rotational grazing for fifteen years (Past 15), and a native forest used as a reference system. Physical and mechanical soil attributes were assessed in the 0.00–0.30 m soil layer, including bulk density, porosity, penetration resistance, precompression stress, and compression index. The results indicated increased soil compaction in grazed areas, particularly in surface layers, as evidenced by higher bulk density, relative density, and penetration resistance compared with the native forest. The Past 15 system showed signs of greater structural stabilization relative to areas with shorter management duration. Pig slurry application had moderate effects on physical soil quality indicators, with more pronounced responses associated with longer management periods. It is concluded that rotational grazing, although contributing to productive sustainability, does not fully eliminate the effects of animal trampling on soil physical quality, with management duration being a key factor in soil structural reorganization.

KEYWORDS: soil compaction; rotational grazing; soil physical quality.

INTRODUÇÃO

Atender à crescente demanda global por alimentos, conciliando aumento da produtividade agrícola com redução dos impactos ambientais e fortalecimento da resiliência dos sistemas alimentares, representa um dos principais desafios do setor agrícola contemporâneo (YOST *et al.*, 2022; LIU *et al.*, 2024; RODRIGUES *et al.*, 2025; CHERUBIN *et al.*, 2025; WU *et al.*, 2025). Esse desafio é especialmente crítico em regiões tropicais, marcadas por intensas mudanças no uso da terra, perda de biodiversidade, elevada suscetibilidade à erosão e maior vulnerabilidade às mudanças climáticas (FERON *et al.*, 2024).

O solo, como recurso natural finito, desempenha papel central na sustentação da produtividade agrícola e na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais (CHERUBIN *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2025). A intensificação do uso do solo sem práticas conservacionistas pode comprometer a estrutura e funcionalidade, tornando indispensável a avaliação integrada dos efeitos do manejo por meio de indicadores de qualidade física do solo (QS), os quais permitem diagnosticar alterações no funcionamento do sistema edáfico e subsidiar estratégias de manejos mais sustentáveis (GIACOMINI; AITA, 2008; CHERUBIN *et al.*, 2021; FERREIRA *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2025).

O estudo da QS do solo baseia-se na mensuração de atributos físicos que refletem sua capacidade de sustentar a produtividade vegetal, regular o fluxo de água e a aeração, essenciais para o crescimento radicular. Um indicador de QS

pode consistir em uma variável isolada, facilmente mensurável, ou na integração de múltiplos atributos por meio de índices compostos, capazes de expressar de forma mais abrangente a condição física do solo sob diferentes manejos (ORTIGARA *et al.*, 2014; CHERUBIN *et al.*, 2021).

A degradação e a redução da produtividade de pastagens são frequentemente atribuídas ao manejo inadequado do solo e à taxa de lotação animal excessiva, fatores que comprometem a estrutura do solo e afetam negativamente a qualidade física (ORTIGARA *et al.* 2014; ANTONELI *et al.*, 2025; ISHAQ *et al.*, 2025; WU *et al.*, 2025). A pressão exercida pelos cascos dos animais, especialmente quando associada à elevada umidade do solo, pode intensificar os efeitos do pisoteio, resultando em aumento da densidade do solo e redução da porosidade, principalmente nas camadas superficiais (NICOLOSO *et al.*, 2024; PUN *et al.*, 2024; FLORENTINO *et al.*, 2025).

Entre os indicadores físicos de QS, a densidade e a porosidade do solo destacam-se como os atributos mais utilizados na avaliação da qualidade física, por estarem diretamente relacionados à compactação, à infiltração de água, à aeração e ao crescimento radicular (FERREIRA *et al.*, 2021; NICOLOSO *et al.*, 2024; FLORENTINO *et al.*, 2025). Em áreas sob pastejo, observa-se frequentemente maior grau de compactação nos primeiros 0,10 a 0,15 m do perfil do solo, camada mais suscetível à ação mecânica do pisoteio animal (NICOLOSO *et al.*, 2024; PUN *et al.*, 2024).

A aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS) em áreas de pastagem tem sido amplamente estudada como alternativa parcial ou total ao uso de fertilizantes minerais. Além de aumentar a produtividade e o valor nutricional da forragem, a adição de DLS pode contribuir para a melhoria da QS física, desde que manejada de forma adequada (GWENGU *et al.*, 2025; WU *et al.*, 2024; SHAKOOR *et al.*, 2022).

Estudos recentes indicam que aplicações sucessivas de resíduos orgânicos, como o DLS, em sistemas sem revolvimento do solo, promovem alterações significativas nas propriedades físicas do solo. Entre os efeitos positivos, destacam-se o aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS), a melhoria da agregação e a estabilidade de agregados, fatores cruciais para a estrutura física do solo (SANTOS *et al.*, 2022; BOITT *et al.*, 2022; SHAKOOR *et al.*, 2022).

O acúmulo de carbono orgânico do solo é considerado um dos principais indicadores de QS física, pela estreita relação com a estabilidade de agregados e a retenção de água (CHERUBIN *et al.*, 2021; BOITT *et al.*, 2022). Maiores teores de carbono orgânico refletem melhorias diretas na QS física, influenciando positivamente a estrutura e a capacidade hídrica do solo (SHAKOOR *et al.*, 2022).

Apesar dos avanços, ainda são escassos os estudos que avaliam, de forma integrada e em longo prazo, os efeitos de sucessivas aplicações de DLS associadas ao não revolvimento do solo em pastagens perenes sob pastejo rotacionado. Evidências indicam que alterações significativas na QS física podem se tornar mais evidentes apenas após períodos superiores a 10 anos de manejo contínuo, enquanto avaliações de curto prazo podem resultar em respostas inconsistentes ou conflitantes (SANTOS *et al.*, 2022; SHAKOOR *et al.*, 2022).

Diante desse contexto, torna-se fundamental o estudo integrado de indicadores físicos da QS sob sistemas de manejo de longo prazo, de modo a compreender as inter-relações entre os atributos físicos do solo e fornecer subsídios técnicos para o manejo sustentável de pastagens. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar as alterações nos indicadores físicos relacionados à qualidade do solo

em um Cambissolo Háplico, cultivado com pastagem perene sob pastejo rotacionado e submetido a sucessivas aplicações de dejetos líquidos de suínos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma propriedade rural localizada no município de Taquaruçu do Sul, região do Médio Alto Uruguai, estado do Rio Grande do Sul, Brasil, situada nas coordenadas geográficas 27°25'24" de latitude sul e 53°26'50" de longitude oeste, a uma altitude média de 480 m. O clima da região é classificado como subtropical úmido do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado por temperatura média anual de aproximadamente 19 °C e precipitação média anual variando entre 1.800 e 2.000 mm, distribuída de forma relativamente uniforme ao longo do ano (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háplico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018).

Foram selecionadas quatro áreas consideradas homogêneas quanto ao solo e ao histórico de manejo: (i) Past 5 – área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras há cinco anos; (ii) Past 5 IR – área sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras há cinco anos, com aplicação de dejetos líquidos de suínos via sistema de fertirrigação; (iii) Past 15 – área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras há 15 anos; e (iv) Mata nativa – área adjacente, utilizada como sistema de referência. A taxa de lotação animal adotada foi de 14 unidades animais por hectare (UA ha⁻¹) durante o período de verão e 8 UA ha⁻¹ durante o inverno, de acordo com o potencial produtivo da pastagem.

A pastagem de verão foi composta por tifton 85 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.), enquanto, no período de inverno, foram utilizadas aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.), implantadas por semente sobre a pastagem perene. A implantação inicial da pastagem de tifton 85 foi realizada manualmente, com preparo do solo envolvendo duas subsolagens utilizando escarificador de cinco hastes, espaçadas em 0,45 m, até a profundidade média de 0,25 m.

Nas áreas Past 5 e Past 15, o dejetos líquidos de suínos (DLS) foi aplicado superficialmente por meio de esterqueira autopropelida, enquanto na área Past 5 IR a aplicação ocorreu via sistema de fertirrigação por aspersão convencional fixo. Em todas as áreas manejadas, a taxa anual de aplicação foi de 120 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. No sistema de fertirrigação, o DLS foi previamente diluído em água, conforme as exigências nutricionais e hídricas da pastagem, buscando evitar excessos e perdas por escoamento superficial ou lixiviação (SHAKOOR *et al.*, 2022; NICOLOSO *et al.*, 2024).

A área de Mata nativa foi considerada como tratamento controle e corresponde a um fragmento de Floresta Estacional Decidual, conforme classificação fitoecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, sem evidências de interferência antrópica recente (IBGE, 2012).

As amostras de solo indeformadas foram coletadas nas camadas de 0,00–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,20; e 0,20–0,30 m, utilizando anéis volumétricos com altura média de 0,05 m e diâmetro médio de 0,048 m, inseridos manualmente no solo. Foram realizadas duas amostragens por camada em cada parcela, com quatro repetições por tratamento, totalizando 128 amostras indeformadas.

No laboratório, as amostras foram saturadas com água por capilaridade e posteriormente submetidas ao equilíbrio hídrico na tensão de –6 kPa, em mesa de

tenção. Em seguida, metade das amostras foi destinada aos ensaios de compressão uniaxial, realizados em prensa automatizada (CNTAIHM/BR-001/07), conforme metodologia descrita por Ortigara *et al.* (2014). As curvas de compressão foram ajustadas utilizando o suplemento SCC para Microsoft Excel, com base no método de Casagrande, conforme proposto por Gubiani *et al.* (2014), possibilitando a determinação da pressão de preconsolidação do solo (σ_p), do índice de compressão (C_c), da densidade máxima do solo (D_{smax}) e da densidade relativa do solo (D_{sRel}).

TABELA 1. Valores médios referentes à análise granulométrica em cada camada de cada tratamento.

Camada --- m ---	Mata			Past 5 *			Past 5 IR			Past 15		
	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia
0,00-0,05	37,5	34,8	26,7	34,3	32,6	33,1	38,2	32,2	29,6	39,0	31,5	29,5
0,05-0,10	36,2	31,9	32,0	36,5	36,1	27,4	41,3	28,5	30,2	40,4	31,8	27,8
0,10-0,20	40,4	31,5	28,1	39,0	31,7	29,2	42,2	32,2	25,6	44,9	32,2	23,0
0,20-0,30	46,3	32,5	21,2	48,2	26,9	24,8	49,9	28,6	21,6	46,1	30,9	23,1

*Onde: Past 5 = área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 5 anos; Past 5 IR = área fertiirrigada manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 5 anos; Past 15 = área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 15 anos; e Mata nativa.

A outra metade das amostras foi submetida à avaliação da resistência mecânica do solo à penetração (RP), determinada em laboratório com o auxílio de um penetrômetro de bancada (modelo MA 933, Marconi). Utilizou-se cone com diâmetro basal de 4 mm e ângulo de 60°, com velocidade de inserção de 20 mm min⁻¹, conforme metodologia descrita por Tormena *et al.* (1998).

Após a realização dos ensaios de compressibilidade e resistência à penetração, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 h, para determinação da umidade gravimétrica do solo. Posteriormente, as amostras foram destorroadas manualmente, peneiradas em malha de 2 mm e utilizadas para a determinação da granulometria pelo método da pipeta e da densidade de partículas, conforme procedimentos descritos pela Embrapa (2017).

TABELA 2. Valores médios referentes à análise de densidade de partícula realizada em cada camada de cada tratamento

Camada (m)	Mata	Past 5	Past 5 IR	Past 15
0,00-0,05	2,38	2,71	2,71	2,68
0,05-0,10	2,51	2,76	2,76	2,75
0,10-0,20	2,61	2,78	2,75	2,76
0,20-0,30	2,63	2,77	2,75	2,75

*Onde: Past 5 = área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 5 anos; Past 5 IR = área fertiirrigada manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 5 anos; Past 15 = área manejada sob pastejo rotacionado por vacas leiteiras nos últimos 15 anos; e Mata nativa

Os dados obtidos para cada camada de solo foram analisados separadamente. Inicialmente, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, adotando-se o nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico Genes (CRUZ, 2006). As relações entre os atributos físicos, microbiológicos e biológicos do solo

foram representadas graficamente com o auxílio do software SigmaPlot® versão 16 (Systat Software, Inc.).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise de variância (Tabela 3) demonstram que os indicadores físico-mecânicos do solo apresentaram elevada sensibilidade para discriminar diferenças entre os sistemas de uso e manejo avaliados, bem como entre as camadas do perfil. Houve efeito significativo dos tratamentos para a maioria dos atributos físicos analisados, incluindo densidade do solo (Ds), densidade máxima (Ds_{max}), densidade relativa (Ds_{Rel}), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), pressão de preconsolidação (σ_p), índice de compressão (Cc) e resistência do solo à penetração (RP).

A ausência de significância para a microporosidade (Micro) e para a umidade gravimétrica (UG) na camada de 0,20–0,30 m indica que, em maiores profundidades, esses atributos apresentam menor sensibilidade às pressões antrópicas impostas pelo pastejo. Esse comportamento reflete maior estabilidade estrutural do solo subsuperficial, conforme relatado em estudos que apontam a concentração dos efeitos do manejo e do pisoteio animal nas camadas superficiais do solo (RAUBER *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2025).

Esses resultados confirmam que atributos relacionados à compactação, à capacidade de suporte de carga e à resistência mecânica do solo constituem indicadores robustos da qualidade física em sistemas pastorais, corroborando a ampla utilização em estudos de avaliação da qualidade do solo sob pastejo (SCHEID *et al.*, 2020; CHERUBIN *et al.*, 2021; FERREIRA *et al.*, 2021; NICOLOSO *et al.*, 2024; CHEN *et al.*, 2025).

Em termos relativos, os sistemas sob pastejo apresentaram aumentos moderados a elevados na densidade do solo e na densidade relativa em comparação à mata nativa, especialmente na camada de 0,00–0,10 m. Essas alterações foram acompanhadas por expressiva redução da macroporosidade, indicando mudança estrutural do solo em direção a uma condição mais compactada. Tais diferenças quantitativas reforçam a elevada sensibilidade desses indicadores à pressão exercida pelo pastejo e evidenciam sua relevância para a avaliação da qualidade física do solo em sistemas pastorais (FERREIRA *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2025; FLORENTINO *et al.*, 2025).

TABELA 3. Teste de significância da ANOVA para os parâmetros densidade do solo (Ds); densidade do solo máxima (Ds_{max}); densidade do solo relativa (Ds_{Rel}); porosidade total (Pt); macroporosidade (Macro); microporosidade (Micro); umidade gravimétrica (UG); pressão de preconsolidação (σ_p); índice de compressão (Cc) e resistência à penetração (RP).

Atributo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Ds	**	**	**	**
Ds _{max}	**	**	**	**
Ds _{Rel}	**	**	**	**
Pt	**	**	**	**
Micro	**	**	**	ns
Macro	**	**	**	**
UG	**	**	**	ns
σ_p	**	**	**	**
Cc	**	**	**	**
RP	**	**	**	**

O solo de mata nativa apresentou, em todas as camadas avaliadas, os menores valores de densidade do solo (D_s), densidade máxima (D_{smax}) e densidade relativa (D_{sRel}), associados aos maiores valores de porosidade total e macroporosidade (Figura 1). Esses resultados refletem a estrutura física mais porosa, biologicamente organizada e com menor grau de compactação, característica de solos não submetidos à pressão mecânica recorrente.

Em contraste, os sistemas sob pastejo (Past 5, Past 5 IR e Past 15) apresentaram aumento consistente da densidade do solo e redução da macroporosidade, especialmente nas camadas de 0,00–0,10 m, evidenciando o efeito do pisoteio animal sobre a estrutura do solo. Esse padrão é amplamente descrito na literatura, uma vez que a pressão exercida pelos cascos promove rearranjo das partículas sólidas e colapso dos macroporos, convertendo poros de maior diâmetro em poros menores (SILVA *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2024; GWENGU *et al.*, 2025; ISHAQ *et al.*, 2025).

A microporosidade apresentou menor variação entre os sistemas de uso, corroborando os resultados da ANOVA (Tabela 3) e indicando que os poros de menor diâmetro são menos suscetíveis às alterações promovidas pelo manejo. Esse comportamento reforça que os principais impactos do pastejo concentram-se sobre atributos relacionados à aeração e à infiltração de água, diretamente associados à macroporosidade (NICOLOSO *et al.*, 2024; PUN *et al.*, 2024; FLORENTINO *et al.*, 2025).

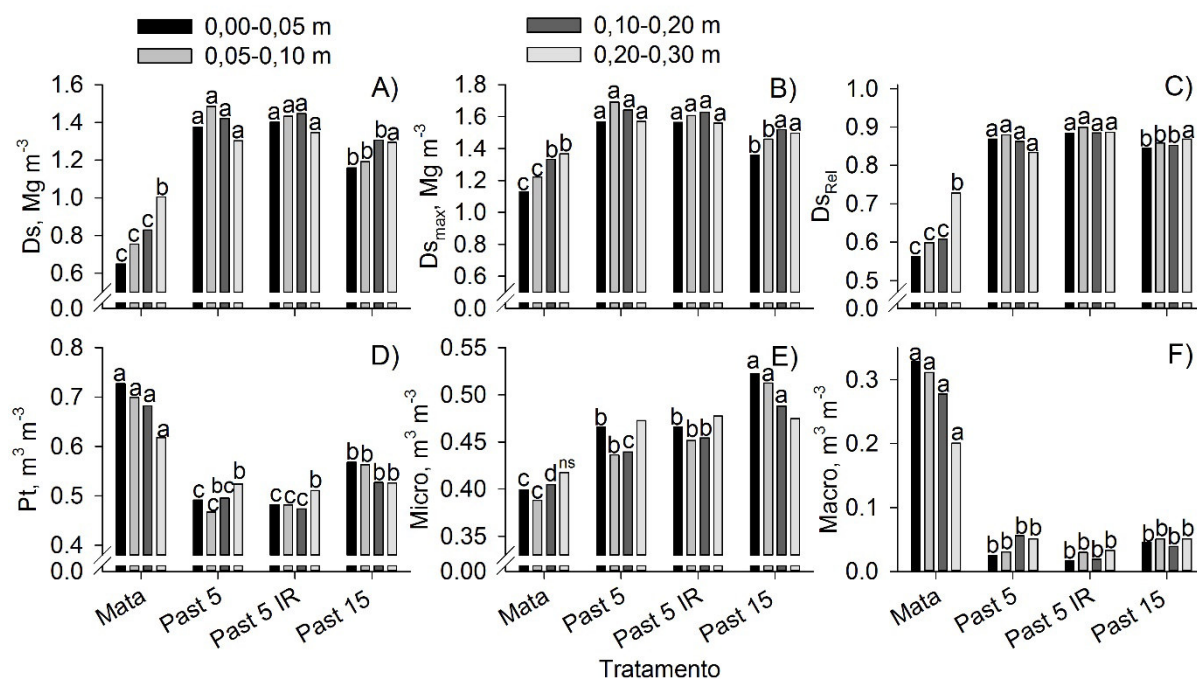
Os valores observados para D_s , D_{smax} , D_{sRel} e P_t evidenciaram diferenças importantes associadas ao tempo de manejo dos sistemas pastorais. O sistema Past 15 apresentou valores intermediários entre a mata nativa e os sistemas com menor tempo de manejo (Past 5 e Past 5 IR), sugerindo um processo gradual de estabilização estrutural do solo ao longo do tempo.

Esse comportamento pode estar associado ao maior período sem revolvimento do solo, que favorece a reorganização da estrutura, o acúmulo de matéria orgânica (WU *et al.*, 2025) e o desenvolvimento do sistema radicular da pastagem perene. Em contraste, os sistemas Past 5 e Past 5 IR, mais recentemente implantados, ainda refletem os efeitos do revolvimento inicial do solo realizado durante a implantação do tifton 85, apresentando maior suscetibilidade à compactação.

A menor densidade máxima observada no sistema Mata está diretamente relacionada ao maior teor de carbono orgânico, à presença contínua de resíduos vegetais e à maior elasticidade da matriz do solo, fatores que dissipam parte da energia aplicada durante processos de compactação (ORTIGARA *et al.*, 2014; RODRIGUES *et al.*, 2025). Esses aspectos explicam os menores valores de densidade relativa observados nesse sistema, variando entre 0,56 e 0,73.

O aumento da densidade do solo observado nos sistemas sob pastejo é consistente com resultados reportados por Wu *et al.*, (2025), que verificaram elevação da D_s de aproximadamente 35 a 48% quando comparados com solos de floresta nativa ($0,88 \text{ Mg m}^{-3}$) e áreas manejadas com sistemas agrícolas e pastagens (até $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$). Esses incrementos percentuais evidenciam a forte influência do manejo e do tráfego sobre a compactação do solo, reforçando que a conversão de áreas naturais para uso agropecuário resulta em alterações estruturais expressivas, especialmente nas camadas superficiais.

FIGURA 1: Médias referentes à densidade do solo (A), densidade do solo máxima (B), densidade do solo relativa (C); porosidade total do solo (D); micro e macroporosidade (E e F respectivamente). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5 % de probabilidade de erro. ^{ns} não significativo.



A redução da porosidade total observada nos sistemas sob pastejo segue a mesma tendência descrita por Wu *et al.*, (2025), que relataram diminuição do volume total de poros de aproximadamente 37%, com valores reduzidos de cerca de 0,60 m³ m⁻³ em áreas de floresta nativa para aproximadamente 0,38 m³ m⁻³ em áreas sob manejo agrícola. Tal redução percentual indica perda significativa da qualidade física do solo, associada principalmente ao colapso da macroporosidade em função da compactação.

Em diversos tratamentos sob pastejo, os valores de resistência do solo à penetração aproximaram-se ou ultrapassaram limites frequentemente reportados como restritivos ao crescimento radicular, especialmente em condições de menor umidade do solo. Da mesma forma, valores elevados de densidade relativa indicam proximidade de limiares críticos de compactação, os quais podem comprometer a infiltração de água, a aeração e a expansão do sistema radicular (FLORENTINO *et al.*, 2025). Esses resultados sugerem que as alterações observadas não são apenas estruturais, mas também funcionais.

A pressão de preconconsolidação (σ_p) foi significativamente maior nos sistemas sob pastejo em comparação à mata nativa (Figura 2), indicando maior capacidade de suporte de carga desses solos antes da ocorrência de deformações adicionais. Esse aumento de σ_p reflete um histórico de compactação prévia, típico de áreas submetidas ao tráfego animal recorrente.

Em contrapartida, o índice de compressão (Cc) apresentou valores mais elevados no sistema Mata, indicando maior suscetibilidade à deformação quando submetido a cargas externas. Esse comportamento é característico de solos estruturalmente mais estáveis e menos compactados, com maior proporção de

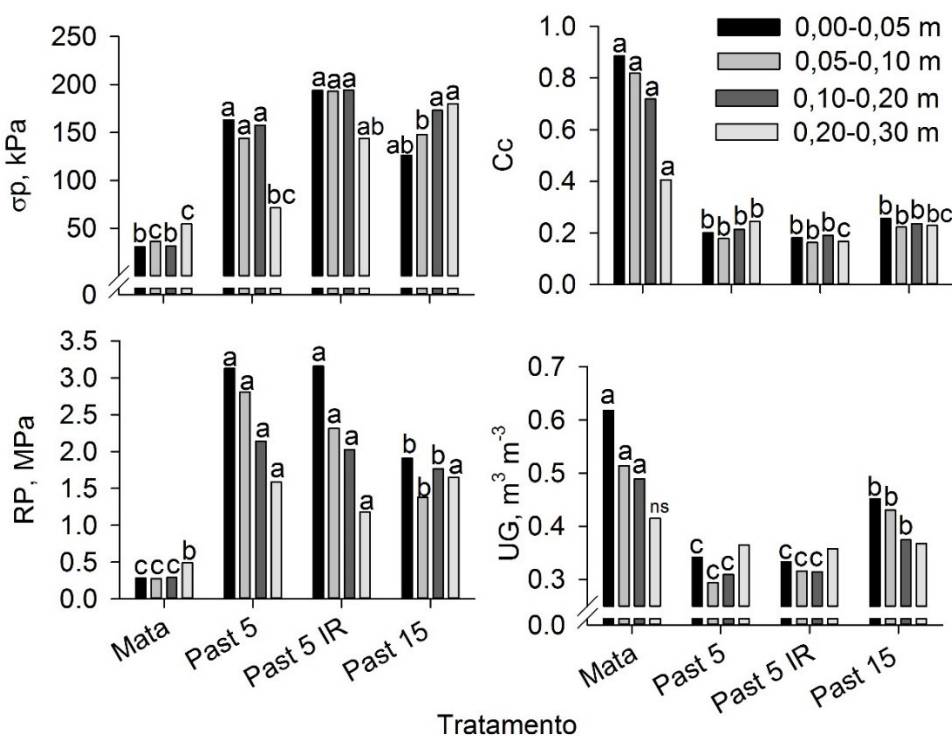
macroporos e maior teor de carbono orgânico, os quais conferem maior elasticidade à estrutura do solo.

O aumento da resistência do solo à penetração observado nas áreas sob pastejo também é corroborado por Wu *et al.*, (2025), que registraram incrementos de RP superiores a 100% em sistemas de pastagem em relação ao solo de floresta nativa. Segundo os autores, valores de RP variando entre 3,0 e 4,0 MPa foram observados em áreas manejadas, enquanto os solos de floresta apresentaram valores inferiores a 2,0 MPa, evidenciando níveis potencialmente restritivos ao crescimento radicular.

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou comportamento semelhante ao da densidade do solo, com valores mais elevados nas áreas de pastejo, especialmente nas camadas superficiais, podendo atingir níveis potencialmente restritivos ao crescimento radicular, conforme limites descritos na literatura (KAISER *et al.*, 2009; WU, *et al.*, 2024). A umidade gravimétrica apresentou variação limitada entre os sistemas, indicando que as diferenças observadas em RP e σ_p estão associadas predominantemente à condição estrutural do solo, e não apenas ao conteúdo de água.

Resultados semelhantes foram relatados por Pun *et al.* (2024) e Wu *et al.* (2024), que observaram maiores valores de σ_p e menores valores de Cc em solos submetidos ao pastejo, em comparação a áreas não perturbadas.

FIGURA 2: Médias referentes à pressão de preconsolidação (A), índice de compressão (B), resistência do solo à penetração (C); umidade gravimétrica (D). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5 % de probabilidade de erro.



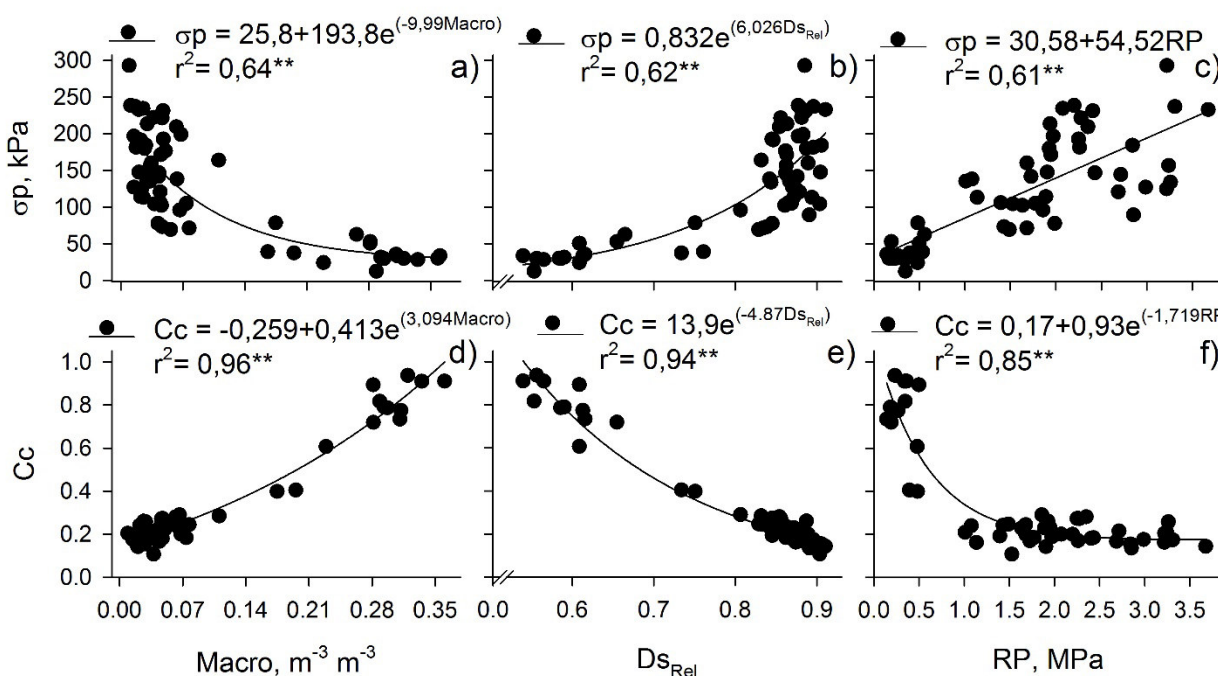
As relações funcionais apresentadas na Figura 3 evidenciam forte interdependência entre os atributos físicos e mecânicos do solo. Observa-se relação negativa exponencial entre a pressão de preconsolidação (σ_p) e a macroporosidade, indicando que a redução do volume de macroporos resulta em maior capacidade de suporte de carga do solo, consequência direta da compactação estrutural.

Relações positivas entre σ_p e densidade relativa (D_{sRel}), bem como entre σ_p e resistência à penetração (RP), reforçam o uso desses atributos como indicadores consistentes do estado de compactação do solo. De forma complementar, o índice de compressão (C_c) apresentou relação positiva com a macroporosidade e negativa com D_{sRel} e RP, demonstrando que solos mais porosos e menos compactados são mais suscetíveis à deformação quando submetidos a cargas externas.

Os elevados coeficientes de determinação observados nas regressões confirmam a forte dependência entre os atributos analisados, validando o uso integrado de indicadores físicos e mecânicos para a avaliação da qualidade estrutural do solo sob diferentes sistemas de uso.

Embora a aplicação de dejetos líquidos de suínos tenha contribuído de forma gradual para atributos relacionados à matéria orgânica do solo, ela não foi suficiente para neutralizar, no curto prazo, a compactação induzida pelo pisoteio animal. Esse resultado indica que o aporte de resíduos orgânicos, isoladamente, não reverte a degradação física causada pelo tráfego animal, especialmente em elevadas taxas de lotação e em condições de maior umidade do solo.

FIGURA 3. Relação entre a pressão de preconsolidação (a; b; c) e índice de compressão (d; e; f) com macroporosidade (a; d) densidade relativa do solo (b; e) e resistência do solo à penetração (c; f), em três sistemas de uso do solo.



A Figura 3 evidencia de forma clara a interdependência funcional entre os atributos físicos e mecânicos do solo, destacando relações consistentes entre pressão de preconsolidação, macroporosidade, densidade relativa e resistência à penetração. Essas relações confirmam que indicadores mecânicos capturam de

maneira eficiente as alterações estruturais induzidas pelo pastejo, validando seu uso integrado no diagnóstico da qualidade física do solo em sistemas de pastagem.

Os resultados obtidos evidenciam que o pastejo rotacionado, embora represente avanço em relação ao sistema de pastejo contínuo, não elimina completamente os efeitos do pisoteio animal sobre a estrutura do solo. Mesmo em manejo controlado, observou-se aumento da compactação superficial, indicando que a intensidade de uso e a carga animal exercem influência direta sobre os indicadores físicos da qualidade do solo (SANTOS *et al.*, 2022; ISHAQ *et al.*, 2025).

A aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS) apresentou efeitos moderados sobre a qualidade física do solo, especialmente quando considerada em conjunto com o tempo de manejo e a forma de aplicação. O aporte contínuo de resíduos orgânicos é reconhecido por favorecer o acúmulo de matéria orgânica, a agregação do solo e a estabilidade estrutural, sobretudo em sistemas sem revolvimento (SANTOS *et al.*, 2022; BOITT *et al.*, 2022; SHAKOOR *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2024; GWENGU *et al.*, 2025).

De forma semelhante ao observado neste estudo, Wu, *et al.*, (2025) concluíram que a adoção de sistemas de manejo agrícola promoveu aumentos expressivos na densidade do solo e na resistência à penetração, independentemente da aplicação de dejetos líquidos de suínos. Esses autores destacam que os efeitos do tráfego e do manejo superaram, no curto e médio prazo, os potenciais benefícios físicos associados à adição de resíduos orgânicos, reforçando que o aumento percentual da compactação é predominantemente controlado pela intensidade de uso do solo.

Entretanto, a literatura indica que melhorias significativas na qualidade física do solo associadas à aplicação de resíduos orgânicos tendem a se tornar evidentes apenas após períodos superiores a 10 anos de manejo contínuo (SANTOS *et al.*, 2022; SHAKOOR *et al.*, 2022). Nesse sentido, os resultados observados no sistema Past 15 sugerem um processo gradual de reorganização estrutural do solo, enquanto nas áreas com menor tempo de manejo (Past 5 e Past 5 IR) os efeitos ainda são incipientes.

Em cenários de maior variabilidade climática, caracterizados por eventos extremos mais frequentes, a manutenção da qualidade física do solo torna-se ainda mais crítica para a resiliência dos sistemas produtivos (FERON *et al.*, 2024). Assim, os resultados reforçam a necessidade de estratégias integradas de manejo que considerem a carga animal, o tempo de uso e o manejo adequado de resíduos orgânicos para garantir a sustentabilidade de sistemas pastorais intensivos.

Do ponto de vista do manejo, os resultados indicam que o pastejo rotacionado mitiga, mas não elimina, os efeitos da compactação do solo em sistemas pastorais intensivos. Assim, estratégias de manejo devem integrar o controle da carga animal, a restrição do pastejo em períodos de elevada umidade do solo e o planejamento de longo prazo, de modo a favorecer a recuperação estrutural. O monitoramento de indicadores como densidade relativa e resistência à penetração pode atuar como ferramenta de alerta precoce para a degradação física do solo.

CONCLUSÕES

Os indicadores físicos e mecânicos do solo evidenciaram de forma inequívoca que o pastejo rotacionado promove alterações estruturais significativas em um Cambissolo Háplico, especialmente nas camadas superficiais. O aumento da densidade do solo, da densidade relativa e da resistência à penetração confirma o

efeito cumulativo do pisoteio animal, indicando que o pastejo rotacionado reduz, mas não elimina, a degradação física do solo.

A área sob pastejo há 15 anos apresentou sinais de maior estabilização estrutural em comparação às áreas com menor tempo de manejo, indicando que o tempo é um fator determinante na reorganização da estrutura do solo após o revolvimento inicial. A aplicação de dejetos líquidos de suínos contribuiu de forma gradual para a melhoria da qualidade física, com efeitos mais evidentes associados ao manejo de médio e longo prazo, embora não tenha sido suficiente para neutralizar completamente os efeitos da compactação induzida pelo pastejo.

Os resultados reforçam que a sustentabilidade de sistemas pastorais intensivos depende da integração entre manejo adequado da carga animal, tempo de uso e práticas de fertilização orgânica, especialmente em cenários de maior variabilidade climática. Assim, estratégias de manejo que considerem os limites físicos do solo são essenciais para a manutenção da qualidade estrutural e da produtividade das pastagens.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Agronomia Agricultura e Ambiente e à Granja Ortigara, em especial Adelar e Éldo José Ortigara por cederem a área de estudo para o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANTONELI, V.; BEDNARZ, J. A.; JESUS, F. C.; THOMAZ, E. L.; CERDÀ, A. Effect of rotational grazing on soil quality and animal productivity. **Land**, v. 14, n. 8, p. 1617, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land14081617>

ANTONELI, V.; MOSELE, A. C.; BEDNARZ, J. A.; PULIDO-FERNÁNDEZ, M.; LOZANO-PARRA, J.; *et al.* Effects of applying liquid swine manure on soil quality and yield production in tropical soybean crops (Paraná, Brazil). **Sustainability**, v. 11, n. 14, p. 3898, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11143898>

BOITT, G.; SCHMITT, D. E.; GATIBONI, L. C.; WAKELIN, S. A.; BLACK, A.; *et al.* The fate of pig slurry phosphorus applied to a sandy loam soil. **Geoderma**, v. 417, p. 115849, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115849>

CHEN, Y.; FENG, X.; ZHAO, X.; HAO, X.; TONG, L.; *et al.* Biochar application enhances soil quality by improving soil physical structure under particular water and salt conditions in arid region of Northwest China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 24, n. 8, p. 3242–3263, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.12.014>

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P. A soil management assessment framework for tropical soils. **Soil and Tillage**

Research, v. 212, p. 105019, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>

CHERUBIN, M. R.; PINHEIRO JUNIOR, C. R.; SOUZA, L. N.; CANISARES, L. P.; CERRI, C. E. P. Exploring soil health research in Brazil: a critical analysis of national challenges, opportunities, and priorities. **Land Use Policy**, v. 157, p. 107677, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107677>

CHERUBIN, M. R.; SCHIEDECK, G.; SPERATTI, A. B.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil health and sustainability. *Nature Reviews* **Earth & Environment**, v. 2, p. 404–420, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00149-z>

CICHELERO, L. H.; SILVA, D. M.; BOHRER, R. E. G.; SILVA, D. A. A.; REDIN, M.; *et al.* Doses de dejetos líquidos de suínos e seu efeito na germinação de sementes de soja, trigo e milho. **Investigación Agraria**, v. 25, n. 1, p. 11–18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2023.junio.2501724>

CRUZ, C. D. **Programa Genes: biometria**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>

FERON, S.; CORDERO, R. R.; DAMIANI, A.; MACDONELL, S.; PIZARRO, J.; *et al.* South America is becoming warmer, drier, and more flammable. **Communications Earth & Environment**, v. 5, p. 501, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01654-7>

FERREIRA, W. G.; BENEDET, L.; TRAPP, T.; LIMA, P. A.; MULLER JÚNIOR, V.; *et al.* Soil aggregation and physical and chemical attributes in a Typic Hapludult fertilized with mineral fertilizer and swine manure. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 10, p. 1–17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2021.1896960.1051>

FLOR-ENTINO, R. W.; NICOLOSO, R. S.; BRUNETTO, G.; CERETTA, C. A.; LOURENZI, C. R. Impact of long-term surface application of swine slurry on soil physical quality and water infiltration capacity. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 60, e2301, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782301>

GIACOMINI, S. J.; AITA, C. Emissão de dióxido de carbono após aplicação de dejetos líquidos e cama sobreposta de suínos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 107–114, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100014>

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; GOULART, R. Z.; FONTANELA, E. Suplemento Excel para modelar a curva de compressão do solo. In: **Congresso**

Latinoamericano de la ciencia del suelo, 20.; Congreso peruano de la ciencia del suelo, 16., 2014, Cusco. Anais... Cusco: [s.n.], 2014.

GWENGU, A.; CHIKUVIRE, T. J.; MUCHENJE, V. The potential of pig slurry application on pasture production. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, p. 1–15, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02657-9>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

ISHAQ, H. K.; AHMED, S.; KHAN, M. A. Soil quality under rotational and conventional grazing in pastures. **Journal of Environmental Management**, v. 360, p. 121658, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121658>

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; PETEAN, A. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento radicular de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1599–1608, 2009.

LIU, Q.; WANG, X.; WU, Y.; LAN, T.; LIU, F.; *et al.* Improved yield by optimizing carbon, nitrogen metabolism and hormone balance in apical kernels under low nitrogen conditions using the low nitrogen-tolerant maize variety. **Field Crops Research**, v. 310, p. 109358, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109358>

NICOLOSO, R. S.; LOURENZI, C. R.; BRUNETTO, G. (eds.). **Gestão dos resíduos da produção animal: reciclagem como fertilizante e qualidade do solo**. Brasília, DF: Embrapa; Concórdia, SC: Sbera, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves>

ORTIGARA, C.; KAYSER, M.; GATIBONI, L. C.; BAYER, C.; ANGHINONI, I. Physical soil quality of a sandy loam soil under no-tillage and pig slurry application. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 19–27, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.006>

PUN, I.; SMITH, K.; RICCI, P.; MISSELBROOK, T. H. Measuring and modelling the impact of outdoor pigs on soil structure. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 1, e13029, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/sum.13029>

RAUBER, L. P.; ANDRADE, A. P.; FRIEDERICHS, A.; MAFRA, Á. L.; BARETTA, D.; *et al.* Soil physical indicators of management systems with successive applications of pig slurry and poultry litter. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 4, p. 354–359, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0453>

RODRIGUES, A. M. S.; LIMA, A. Y. V.; SILVA, D. F.; MENILLO, R. B.; CIPRIANI, H. N.; CHERUBIN, M. R. Soil health multifunctionality of biological products in agriculture: overview and research perspectives. **Experimental Agriculture**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0014479725100173>

SANTOS, C.; LOSS, A.; COMIN, J. J.; LOURENZI, C. R.; KURTZ, C.; *et al.* Aggregation index and carbon and nitrogen contents in soil aggregates under pig slurry application. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 320, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020320>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHEID, D. L.; SILVA, R. F.; SILVA, V. R.; DA ROS, C. O.; PINTO, M. A. B.; *et al.* Changes in soil chemical and physical properties in pasture fertilised with liquid swine manure. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 5, e20190017, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0017>

SHAKOOR, A.; SHAHZAD, S. M.; CHATTERJEE, N.; ARSHAD, M.; TAREEN, W. H.; *et al.* Seven years of pig slurry fertilization: impacts on soil properties. **Scientific Reports**, v. 12, p. 16581, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21175-y>

SILVA, R. G.; MENEZES, J. F. S.; BERTI, M. P. S.; OLIVEIRA, A. M.; MOSCONI NETO, I.; *et al.* Phosphorus extractors in soil under no-tillage system with 19 years of swine manure applications. **Heliyon**, v. 10, e23598, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23598>

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573–581, 1998.

WU, G.; LI, X.; ZHANG, Y. Impact of grazing Tibetan pigs on soil quality. **Agriculture**, v. 14, n. 11, p. 2096, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14112096>

WU, Z.; ZHANG, Y.; FAN, Y.; WANG, C.; LI, B.; *et al.* Decadal manure substitution reshapes microbial communities to drive plant and microbial carbon accumulation in soil carbon fractions. **Geoderma**, v. 463, p. 117581, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117581>

YOST, J. L.; SCHMIDT, A. M.; KOELSCH, R.; SCHOTT, L. R. Effect of swine manure on soil health properties: a systematic review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, n. 2, p. 450–486, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20359>

ZHANG, Y.; LIU, X.; WANG, J.; LI, Z.; ZHOU, J.; *et al.* Long-term manure application reshapes soil microbial communities and enhances soil multifunctionality. **Geoderma**, v. 455, p. 116086, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116086>