

IMPACTOS DA APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE EFLUENTE DA BOVINOCULTURA NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E NOS ATRIBUTOS ESTRUTURAIS DE UM PLANOSSOLO

Lidiane Bastos Dorneles¹

<https://orcid.org/0009-0008-8154-6182>

Jéssica Etcheverria do Prado Hartwig²

<https://orcid.org/0009-0007-9296-0904>

Manoela Fernanda Husch³

<https://orcid.org/0009-0007-3550-8014>

Carlos Eduardo Schaedler⁴

<https://orcid.org/0000-0001-7287-360X>

Marcelo Peske Hartwig⁵

<https://orcid.org/0009-0008-9173-3301>

RESUMO

Este estudo avaliou atributos físicos, como densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica saturada (Kfs), e químicos, como matéria orgânica (MO), de um Planossolo franco-arenoso submetido à aplicação superficial de efluente da bovinocultura leiteira. O experimento foi conduzido entre 2024 e 2025, em uma área de 500 m², com amostragens em dois grupos, sendo o Grupo 1 correspondente à condição de referência, antes do início da aplicação de efluente, e o Grupo 2 sob manejo com aplicação superficial de efluente. A Ds apresentou valores médios de 1,67 g cm⁻³ no Grupo 1 e 1,57 g cm⁻³ no Grupo 2. O teor de MO reduziu de 3,99 para 2,97 g dm⁻³, com diferença significativa ($p = 0,0022$). A Kfs diminuiu de 0,326 para 0,111 cm h⁻¹, indicando tendência de redução após o início do manejo ($p = 0,1797$). A Kfs mostrou-se mais sensível às alterações superficiais do que a Ds e a MO isoladamente, indicando potencial como parâmetro funcional para o monitoramento da resposta hidráulica do solo à aplicação superficial de efluente da bovinocultura, nas condições avaliadas.

Palavras-chave

Condutividade Hidráulica; Matéria Orgânica; Planossolo; Efluente de Bovinocultura; Densidade do Solo.

Submetido em: 02/02/2026 – Aprovado em: 10/03/2026 – Publicado em: 10/03/2026

¹ Mestranda em Engenharia e Ciências Ambientais, Instituto Federal Sul-rio-grandense Campus Pelotas, RS, lbastodorneles@gmail.com.

² Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais, Instituto Federal Sul-rio-grandense Campus Pelotas, RS, jessicaetcheverriahartwig@gmail.com.

³ Mestranda em Engenharia e Ciências Ambientais, Instituto Federal Sul-rio-grandense Campus Pelotas, RS, manolahusch@gmail.com.

⁴ Professor Doutor, Instituto Federal Sul-rio-grandense Campus Pelotas, RS, carlosschaedler@ifsul.edu.br.

⁵ Professor Doutor, Instituto Federal Sul-rio-grandense Campus Pelotas, RS, marcelohartwig@ifsul.edu.br.



IMPACTS OF SURFACE APPLICATION OF CATTLE FARMING EFFLUENT ON HIDRAULIC CONDUCTIVITY AND STRUCTURAL ATTRIBUTES OF A PLANOSOL

ABSTRACT

This study evaluated physical attributes, such as soil bulk density (Ds) and saturated hydraulic conductivity (Kfs), and chemical attributes, such as soil organic matter (MO), of a sandy loam Planosol subjected to surface application of dairy cattle effluent. The experiment was conducted between 2024 and 2025 in a 500 m² experimental area, with sampling divided into two groups, where Group 1 represented the reference condition prior to effluent application and Group 2 corresponded to the period under surface effluent application. Mean Ds values were 1.67 g cm⁻³ in Group 1 and 1.57 g cm⁻³ in Group 2. Soil organic matter decreased from 3.99 to 2.97 g dm⁻³, with a significant difference ($p = 0.0022$). Saturated hydraulic conductivity decreased from 0.326 to 0.111 cm h⁻¹, indicating a consistent downward trend after effluent application ($p = 0.1797$). Kfs proved to be more sensitive to surface alterations than Ds and MO individually, indicating its potential as a functional parameter for monitoring soil hydraulic response to surface application of dairy effluent under the evaluated conditions.

Keywords

Saturated Hydraulic Conductivity; Soil Organic Matter; Planosols; Cattle Farming Effluent; Soil Bulk Density.

1 INTRODUÇÃO

A disposição superficial de efluentes da bovinocultura leiteira é prática comum em sistemas familiares por reduzir custos de fertilização e promover o reaproveitamento de água e nutrientes. Entretanto, quando realizada sem critérios técnicos, pode intensificar a mobilização de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica particulada, aumentando o risco de escoamento superficial, saturação do solo e contaminação de corpos hídricos e aquíferos rasos (Illarze *et al.*, 2024; Che *et al.*, 2023; De Silva *et al.*, 2023). Tais riscos tornam-se mais críticos em solos com drenagem imperfeita e horizonte subsuperficial denso, como os Planossolos presentes no sul do Brasil (Cunha e Silveira, 1996).

A condutividade hidráulica saturada (Kfs) é um atributo central para compreender a capacidade do solo em transmitir água sob saturação (Libardi, 2005) e, por integrar efeitos estruturais sensíveis ao manejo, tem sido destacada como indicador funcional para monitoramento hídrico (Ottoni *et al.*, 2024). No entanto, sua resposta é altamente variável no espaço e no tempo e pode ser influenciada por alterações discretas na estrutura superficial, como selamento ou deposição de sólidos (Kargas *et al.*, 2021; Popolizio *et al.*, 2022).

Diante desse contexto, o objetivo do presente trabalho foi analisar o comportamento da Kfs frente às variações da densidade do solo (Ds) e o teor de matéria orgânica (MO) em um Planossolo submetido a aplicação superficial de efluente de bovinocultura e avaliar o potencial da Kfs como parâmetro operacional de monitoramento em área vulnerável.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Efluentes agropecuários são reconhecidos como fontes de nutrientes e matéria orgânica com potencial para reciclagem produtiva, mas sua aplicação superficial pode alterar atributos físicos e químicos do solo quando não manejada adequadamente (Illarze *et al.*, 2024; De Silva *et al.*, 2023). A deposição de sólidos suspensos, a formação de biofilmes e a obstrução de poros superficiais podem reduzir a continuidade de macroporos, favorecer o selamento superficial e diminuir a infiltração, especialmente em solos já limitados por drenagem (Cherobim *et al.*, 2019; Illarze *et al.*, 2024).

Planossolos são caracterizados por horizonte superficial arenoso sobre horizonte subsuperficial denso e de baixa permeabilidade (Cunha e Silveira, 1996), o que resulta em drenagem imperfeita e recorrentes episódios de encharcamento após chuvas intensas. O hidromorfismo associado a esses solos favorece condições redutoras e restringe a circulação de água, tornando-os sensíveis a perturbações físicas superficiais (Santos *et al.*, 2018).

A literatura descreve que, em ambientes hidromórficos, pequenas alterações estruturais, como deposição de sólidos finos, pisoteio ou selamento superficial, podem reduzir significativamente a continuidade dos macroporos e diminuir a Kfs (Liu e Haynes, 2011). A baixa permeabilidade natural desses solos aumenta o risco de escoamento superficial de

soluções ricas em nutrientes e matéria orgânica, especialmente em áreas onde ocorre aplicação superficial de efluentes (Che *et al.*, 2023).

Além disso, Planossolos da Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul desenvolvem-se sobre sedimentos quaternários inconsolidados compostos por areias finas a franco-arenosas intercaladas com camadas argilosas de baixa permeabilidade (Cunha e Silveira, 1996; Silva e Rehbein, 2018).

Nesse contexto a Kfs integra os efeitos da continuidade de macroporos, conectividade de poros preferenciais e presença de crostas superficiais, constituindo indicador funcional da estrutura do solo (Gonçalves e Libardi, 2013). Tem sido amplamente empregada em avaliações de manejo do solo e da água por sua sensibilidade a alterações estruturais discretas, como compactação localizada, pisoteio e deposição de sólidos finos (Kargas *et al.*, 2021; Popolizio *et al.*, 2022).

A Ds e a MO exercem influência direta sobre a Kfs, uma vez que a Ds reflete o grau de compactação e os arranjos estruturais do solo, enquanto a MO está associada à estabilidade de agregados e à proteção física da matéria orgânica. A aplicação de efluentes pode aumentar os estoques de carbono, elevando os teores de MO, ou, sob condições de hidromorfismo, elevada umidade ou temperaturas elevadas, promover sua redução na camada superficial (Liu e Haynes, 2011; Silva, 2018; Nicoloso *et al.*, 2024).

Apesar da relevância desses atributos, ainda são escassos estudos que avaliam conjuntamente Ds, MO e Kfs em Planossolos submetidos à aplicação superficial de efluente bruto (Gupta *et al.*, 2024). Solos com hidromorfismo e horizonte subsuperficial denso são particularmente vulneráveis à redução da infiltração sob aplicações recorrentes de efluentes, o que evidencia a necessidade de análises integradas como a proposta neste estudo.

3 METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de pesquisa quantitativa aplicada. O experimento foi conduzido no Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul), Campus Visconde da Graça (CAVG), em Pelotas, na região sul do Rio Grande do Sul na coordenada 31°42' S; 52°18' W. O local está inserido em zona periurbana caracterizada pela convivência de usos agropecuários e urbanos (De Sousa, 2025). O mapa de localização e a disposição da área experimental em relação à ocupação do entorno e aos elementos sensíveis encontra-se apresentada na Figura 1.

Figura 1. Mapa de localização da área experimental destinada à avaliação dos impactos da aplicação de efluente da bovinocultura sobre atributos do solo. O mapa destaca o local de estudo (vermelho) e elementos relevantes do entorno, incluindo o Cemitério São Lucas, áreas residenciais, açude e instalações do CAVG, em um raio de 500 metros. Imagem elaborada no QGIS 3.40LTR, Datum SIRGAS 2000, escala 1:3.500.

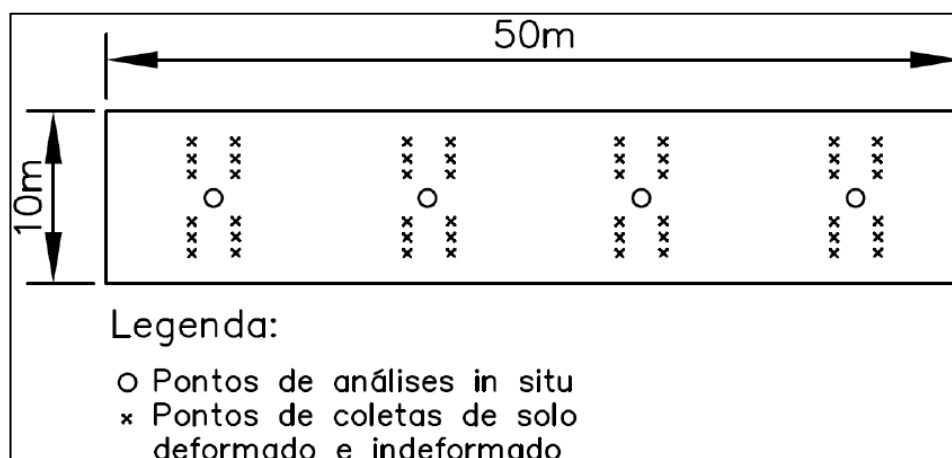


Fonte: Elaborado pelos autores.

O local encontra-se em pousio e é utilizado para aplicação superficial de efluente bruto da bovinocultura de leite do campus. O relevo é plano e há recorrência de saturação superficial após chuvas. O clima é subtropical úmido (Cfa), com precipitação média anual de cerca de 1400 mm. O solo é classificado como Planossolo Glei Pouco Húmico, com horizonte superficial franco-arenoso e horizonte subsuperficial denso e de baixa permeabilidade.

A área total onde o experimento foi realizado possui cerca de 3 hectares. Contudo, para reduzir a interferência da variabilidade natural do solo sobre os atributos físicos e químicos analisados, delimitou-se uma parcela experimental de 50 m × 10 m, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Diagrama esquemático da área experimental (50 m × 10 m) com a disposição dos pontos de coleta de amostras e das avaliações *in situ*.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as análises de Ds e MO, em cada campanha de coleta foram amostrados três pontos, com coleta de amostras indeformadas e deformadas. Para a determinação da condutividade hidráulica saturada, foi realizado um ensaio por campanha, em função do maior tempo necessário para a execução de cada medição em campo.

3.1. Manejo do efluente

O efluente utilizado corresponde ao efluente bruto gerado pela leitaria do campus CAVG, composto por água de lavagem das instalações, dejetos animais e material orgânico em suspensão. Após armazenamento temporário em tanque com capacidade aproximada de 20 m³, onde o efluente permanece por período médio de 5 a 7 dias, o material é aplicado superficialmente por meio de espalhador de esterco em uma área de aproximadamente 500 m², em média uma vez por semana, com volume aproximado de 5 m³ por operação.

A frequência e o volume das aplicações são ajustados conforme a umidade do solo, a disponibilidade de efluente e a previsão meteorológica, adotando-se como critério operacional a não realização de aplicações quando há previsão de chuva nos cinco dias subsequentes. O uso do espalhador permite melhor distribuição da fração sólida do efluente sobre a superfície do solo. A definição do volume aplicado seguiu a prática operacional adotada no campus e foi considerada compatível, em termos de ordem de grandeza, com valores reportados para aplicações de efluente de bovinocultura leiteira em sistemas de fertirrigação (Tasca *et al.*, 2021). Ressalta-se, entretanto, que no presente estudo o efluente foi aplicado de forma superficial e sem diluição, de modo que a referência foi utilizada apenas como parâmetro comparativo de magnitude, com ajuste às condições locais, sem caráter de recomendação agrônômica.

3.2. Campanha de campo e cronograma amostral

As coletas foram realizadas entre fevereiro de 2024 e maio de 2025. A primeira campanha caracterizou o Grupo 1, correspondente à condição de referência sem aplicação de efluente, enquanto as campanhas subsequentes compuseram o Grupo 2, conduzido sob manejo com aplicação de efluente.

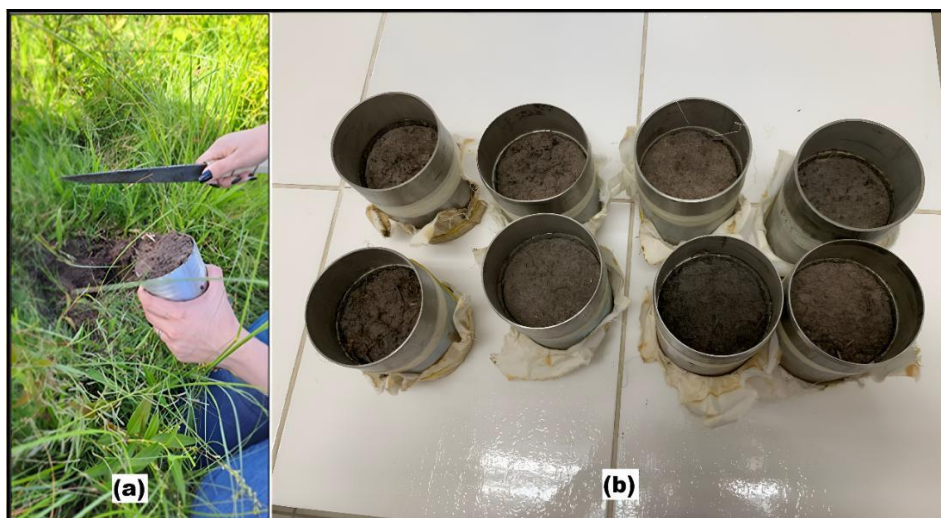
O planejamento experimental previa intervalos regulares de aproximadamente 45 dias entre as coletas e análises. No entanto, adversidades climatológicas impediram a manutenção desse cronograma ao longo do período experimental.

Chuvas intensas, alagamentos, alertas de tempo severo e, posteriormente, uma onda de calor com temperaturas superiores a 40 °C inviabilizaram algumas coletas programadas, resultando em intervalos irregulares. Essas limitações refletem a elevada vulnerabilidade hidrológica da área de estudo.

3.3. Determinação da densidade do solo (D_s)

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 2017). Antes da amostragem, com uma balança de precisão, foram analisados os pesos dos anéis e as dimensões internas (altura e diâmetro) dos mesmos foram aferidas com o auxílio de um paquímetro para os cálculos dos volumes internos de cada anel. Em campo, os anéis foram inseridos cuidadosamente no solo para preservar a estrutura indeformada. Após a extração da amostra, o excesso nas bordas foi aparado com uma lâmina cortante (Figura 3a). Posteriormente, cada cilindro foi identificado e vedado com papel-alumínio para evitar perdas de material. A Figura 3b apresenta o conjunto de amostras indeformadas destinadas à determinação da densidade do solo.

Figura 3. (a) Coleta de amostra indeformada com anel volumétrico no campo e (b) amostras de solo indeformado utilizados para obtenção da densidade do solo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Antes do início da aplicação do efluente, foram coletadas 12 amostras indeformadas, caracterizando a condição de referência, denominada Grupo 1. As coletas foram realizadas em quatro pontos fixos do local de estudo, com amostragens repetidas ao longo das campanhas de campo.

Ao longo de 2024, foram coletadas outras 32 amostras indeformadas nos mesmos pontos, já sob influência do manejo com aplicação de efluente, compondo o Grupo 2. Assim, o conjunto amostral totalizou 44 amostras indeformadas. As coletas foram realizadas utilizando anéis volumétricos de aço inoxidável com bordas cortantes, modelo Kopecky.

Para o tratamento dos dados, as amostras de cada grupo foram organizadas por ponto amostral e por data de coleta, sendo posteriormente calculadas médias representativas, resultando em quatro valores para o Grupo 1 e oito para o Grupo 2. Esse procedimento permitiu reduzir a variabilidade espacial local e viabilizar a comparação direta entre os valores de densidade do solo (D_s) e condutividade hidráulica saturada (K_{fs}).

O procedimento laboratorial seguiu a seguinte sequência: saturação das amostras, pesagem na condição úmida, secagem em estufa a 105 °C por 24 h e nova pesagem para a determinação da densidade do solo, conforme descrito na Equação 1 (EMBRAPA, 2017).

$$D_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (1)$$

A densidade do solo (D_s), expressa em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, foi obtida pela razão entre a massa seca da amostra a 105 °C (m_s , em g) e o volume do anel ou cilindro utilizado na coleta (V_t , em cm^3).

3.4. Determinação da matéria orgânica (MO)

As amostras deformadas utilizadas para a determinação do teor de matéria orgânica do solo (MO) seguiram o mesmo delineamento amostral adotado para a determinação da densidade do solo (D_s). Essa estratégia metodológica foi empregada com o objetivo de reduzir a variabilidade local e permitir a comparação direta entre os valores de MO e de K_{fs} .

O teor de MO foi determinado pelo método de Walkley–Black, baseado na oxidação úmida do carbono orgânico por dicromato de potássio em meio sulfúrico, seguida de titulação com sulfato ferroso (van Raij *et al.*, 2001).

Aproximadamente 1 g de solo de cada amostra foi transferido para frascos Erlenmeyer de 250 mL, aos quais foram adicionados 10 mL de solução de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ e 20 mL de H_2SO_4 concentrado. Após dez minutos de reação, foram adicionados 100 mL de água destilada e três gotas de solução indicadora de fenantrolina.

Em seguida, as amostras foram tituladas com solução de FeSO_4 0,5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ até a mudança de coloração de verde musgo para marrom tijolo. Para cada conjunto de análises foi preparado uma prova em branco reagente sem solo. A diferença entre o volume de titulante gasto na amostra em branco (V_{pb}) e na amostra titulada (V_a) foi usada para o cálculo do teor

de matéria orgânica do solo (MO), conforme adaptação de van Raij *et al.* (2001), descrita pela Equação 2.

$$MO = \frac{(V_{pb} - V_a) * CFe^{2+} * 0,003 * 1,33 * 1,724 * 1000}{V_{solo}} \quad (2)$$

O teor de MO é expresso em g.dm⁻³; V_{pb} e V_a correspondem, respectivamente, aos volumes de titulante no branco e na amostra (mL); CFe²⁺ representa a concentração da solução titulante (mol.L⁻¹); e V_{solo} refere-se ao volume de solo utilizado (cm³).

As análises incluíram amostras do solo em condição inicial, anteriores à aplicação superficial recorrente de efluente de bovinocultura, bem como amostras coletadas após o início do manejo com efluente, permitindo a comparação dos teores de MO antes e após a aplicação. O procedimento analítico está ilustrado na Figura 4.

Figura 4. (a) Pesagem do sulfato ferroso para preparo da solução; (b) diluição e preparo final para a titulação da solução; (c) preparação das amostras de solo para análise de MO; (d) homogeneização e preparo das soluções para o método Walkley-Black.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.5. Determinação da condutividade hidráulica saturada (Kfs)

A condutividade hidráulica saturada do solo (Kfs) foi determinada em campo com o permeâmetro de Guelph em regime de carga constante, seguindo o método clássico de Reynolds e Elrick (1985) e a aplicação operacional descrita por Ribeiro *et al.* (2009).

Os ensaios foram conduzidos com carga única, utilizando furos cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 15 cm de profundidade e carga hidráulica de 9 cm. As leituras foram registradas após a estabilização da vazão, e a vazão média Q foi utilizada no cálculo da Kfs com base na Equação 3, conforme Ribeiro *et al.* (2009), adaptada de Elrick *et al.* (1989).

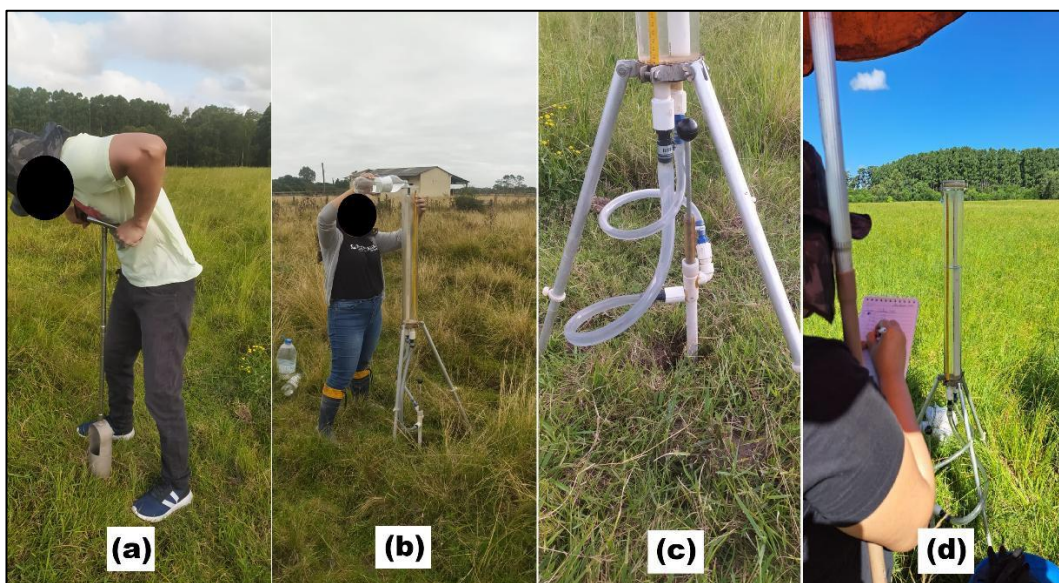
$$Kfs = \frac{C.Q}{2.\pi.H^2 + C.\pi.a^2 + \alpha*} \quad (3)$$

A condutividade hidráulica de campo saturada (Kfs), expressa em cm.h⁻¹, foi estimada pela Equação 3, na qual o fator de forma C depende da razão entre a carga hidráulica aplicada

e o diâmetro do furo, bem como das propriedades físicas do solo. A variável Q corresponde à vazão infiltrada ($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), H representa a carga hidráulica aplicada (cm) e a é o diâmetro do furo (cm). O termo α^* é um parâmetro adicional ajustado conforme o tipo de solo, refletindo seu comportamento estrutural e hidráulico.

A malha de monitoramento foi estruturada para avaliar duas condições experimentais. O Grupo 1, composto pelos pontos G1.1 a G1.4 e monitorado entre janeiro e março de 2024, representou a condição de referência sem aplicação de efluente. O Grupo 2 correspondeu aos mesmos pontos sob aplicação superficial de efluente, com medições realizadas entre junho de 2024 e maio de 2025 (G2.1 a G2.8). A ampliação prevista do número de coletas foi limitada por eventos climáticos extremos, resultando em oito amostras sob manejo. Os valores de K_f s obtidos no Grupo 1 serviram como referência direta para comparação com as etapas subsequentes, permitindo avaliar os efeitos da aplicação recorrente sobre o comportamento hidráulico do solo. As etapas de instalação do permeâmetro e coleta das leituras encontram-se ilustradas na Figura 5.

Figura 5. (a) Abertura do poço. (b) Inserção de água no reservatório do permeâmetro de Guelph. (c) Ajuste da carga hidráulica. (d) Aferição do tempo e volume de água escoados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.6. Avaliação estatística dos dados

A escolha dos testes estatísticos considerou o tamanho amostral, a distribuição dos dados e a natureza comparativa entre as condições de referência e manejo. As análises adotaram nível de significância de 5%. A normalidade foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, com $p > 0,05$. Na ausência de normalidade, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Quando a normalidade foi confirmada, avaliou-se a homogeneidade das variâncias pelo teste F de Fisher, com $p > 0,05$. Se as variâncias não foram homogêneas, utilizou-se o teste t de Welch. Se foram homogêneas, utilizou-se o teste t de Student.

4 RESULTADOS

Os valores de densidade do solo, matéria orgânica e condutividade hidráulica saturada obtidos na condição inicial, sem aplicação de efluente (Grupo 1), e sob aplicação de efluente (Grupo 2) encontram-se apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Valores de DS, MO e Kfs na condição inicial, sem aplicação de efluente (Grupo 1).

Ponto	Kfs (cm/h)	DS (g/cm ³)	MO (g/dm ³)
G1.1	0,295	1,66	3,67
G1.2	0,734	1,48	4,41
G1.3	0,264	1,79	3,94
G1.4	0,012	1,75	3,92
Média	0,326	1,67	3,99

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Valores de DS, MO e Kfs sob aplicação superficial de efluente bruto de bovinocultura (Grupo 2).

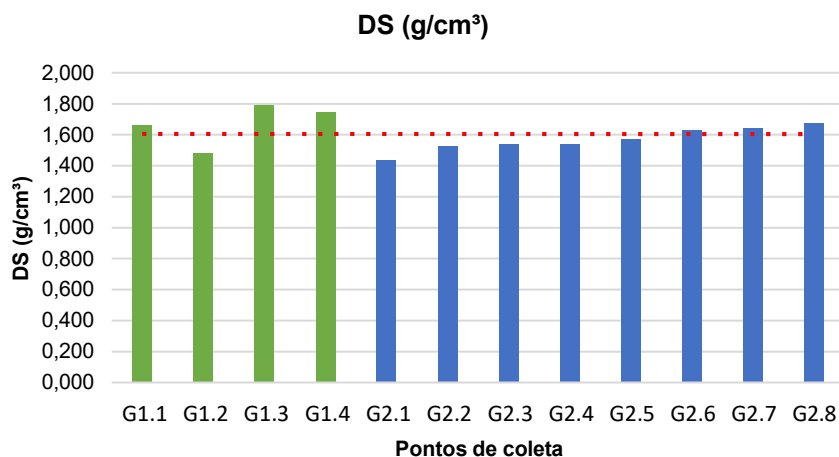
Ponto	Kfs (cm/h)	DS (g/cm ³)	MO (g/dm ³)
G2.1	0,039	1,44	3,44
G2.2	0,539	1,53	2,51
G2.3	0,158	1,54	2,37
G2.4	0,004	1,54	3,1
G2.5	0,015	1,57	2,9
G2.6	0,111	1,63	3,26
G2.7	0,02	1,65	3,35
G2.8	0,004	1,68	2,83
Média	0,111	1,57	2,97

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores de DS apresentaram baixa variação entre os grupos, mantendo-se próximos ao valor médio entre 1,67 g cm⁻³ (Grupo 1) e 1,57 g cm⁻³ (Grupo 2) ao longo das campanhas (Figura 6).

A comparação estatística entre os Grupos 1 e 2 não indicou diferença significativa ($p = 0,1989$), evidenciando que o manejo com aplicação de efluente não promoveu alterações detectáveis na densidade do solo no período avaliado.

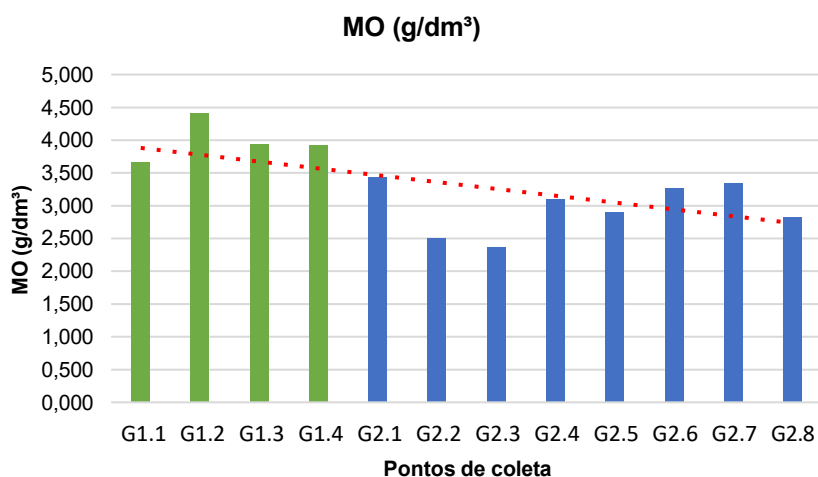
Figura 6 - DS nos pontos amostrais dos Grupos 1 (condição de referência) e 2 (sob aplicação de efluente). As barras representam os valores individuais medidos e a linha tracejada indica a tendência geral.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O teor de matéria orgânica apresentou redução após o início da aplicação do efluente, com valores médios de $3,99 \text{ g dm}^{-3}$ no Grupo 1 e $2,97 \text{ g dm}^{-3}$ no Grupo 2. Essa diferença foi estatisticamente significativa, conforme indicado pelo teste de Mann-Whitney ($p = 0,0022$). A distribuição dos valores individuais e a tendência geral de decréscimo ao longo das campanhas estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7- Teores de MO nos pontos amostrais dos Grupos 1 (condição de referência) e 2 (sob aplicação de efluente). A linha tracejada indica a tendência geral de redução ao longo do período experimental.

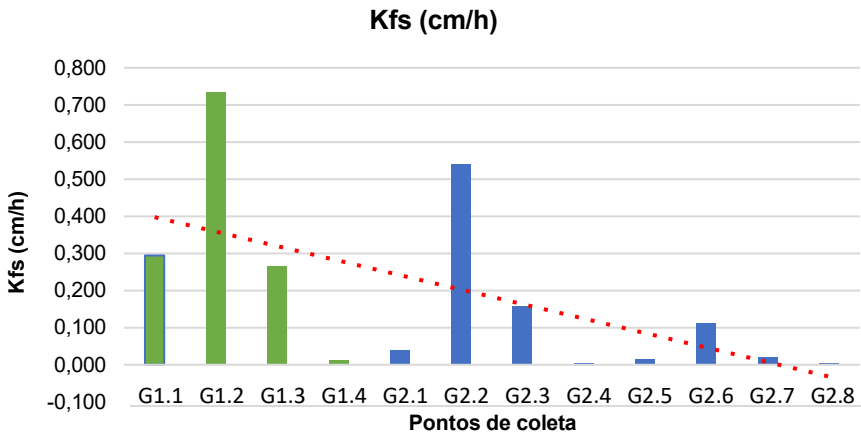


Fonte: Elaborado pelos autores.

A condutividade hidráulica saturada apresentou valores médios de $0,326 \text{ cm h}^{-1}$ no Grupo 1 e $0,111 \text{ cm h}^{-1}$ no Grupo 2. Embora a diferença entre os grupos não tenha sido

estatisticamente significativa ao nível de 5% ($p = 0,1797$), os dados individuais indicaram tendência consistente de redução da Kfs após o início da aplicação do efluente, conforme evidenciado pela linha de tendência apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Kfs nos pontos amostrais dos Grupos 1 (condição de referência) e 2 (sob aplicação de efluente). A linha tracejada indica a tendência geral de redução ao longo do período experimental.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 3 apresenta a síntese dos testes estatísticos aplicados aos atributos avaliados, incluindo os testes de normalidade, os testes comparativos entre os grupos, os valores de p e a indicação de diferença estatisticamente significativa.

Tabela 3 - Síntese dos testes estatísticos aplicados aos atributos do solo avaliados nos Grupos 1 e 2.

Atributo	Teste de normalidade	Teste comparativo	p-valor	Diferença significativa
Ds	Shapiro-Wilk	t de Student	0,1989	Não
MO	Shapiro-Wilk	Mann-Whitney	0,0022	Sim
Kfs	Shapiro-Wilk	t de Welch	0,1797	Não

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que os teores de MO apresentou diferença significativa entre os grupos, enquanto DS e Kfs saturada não apresentaram distinção ao nível de significância de 5%.

5 DISCUSSÃO

A ausência de diferença estatística significativa na densidade do solo indica que a aplicação superficial de efluente não promoveu compactação adicional mensurável da camada superficial ao longo do período avaliado. Em Planossolos, entretanto, a limitação hidráulica está fortemente associada à presença do horizonte subsuperficial denso, que controla a percolação vertical da água independentemente de variações discretas na densidade da

camada superficial (Santos *et al.*, 2018). Assim, alterações na dinâmica da infiltração podem ocorrer mesmo sem mudanças detectáveis em Ds.

A redução significativa do teor de matéria orgânica sugere que, nas condições do experimento, o aporte de carbono pelo efluente bruto não foi suficiente para compensar perdas associadas à mineralização acelerada e à remoção de partículas finas durante eventos de saturação superficial. Ambientes hidromórficos favorecem condições redutoras e elevada atividade microbiana, o que pode intensificar a decomposição da fração orgânica mais lábil e reduzir a estabilidade estrutural da superfície do solo (Silva, 2018; Liu e Haynes, 2011).

Embora as análises estatísticas não tenham apresentado distinção entre os grupos para a Kfs, os dados apresentaram tendência consistente de redução ao longo do período experimental, evidenciada pela análise gráfica. Essa resposta, ainda que não estatisticamente significativa, é coerente com a diminuição do teor de matéria orgânica e com processos físicos associados à disposição superficial de efluentes, como deposição de sólidos em suspensão, formação de selamento superficial e reorganização estrutural da camada superior do solo, os quais afetam diretamente a continuidade dos macroporos (Cherobim *et al.*, 2019; Illarze *et al.*, 2024).

A ausência de distinção estatística para Kfs deve ser interpretada considerando-se o número limitado de pontos amostrais e as restrições operacionais impostas pelas condições climáticas extremas durante o período de monitoramento, que reduziram a frequência e a regularidade das campanhas de campo. Nessas condições, a capacidade de detecção estatística de diferenças entre grupos é reduzida, mesmo quando há tendência física consistente nos dados.

Em Planossolos, pequenas perturbações superficiais podem resultar em reduções expressivas da infiltração devido à limitação imposta pelo horizonte B plânico, que atua como barreira hidráulica. Assim, alterações na camada superficial tendem a se refletir diretamente na Kfs, mesmo quando não há mudanças expressivas em atributos estruturais globais, como a densidade do solo (Santos *et al.*, 2018).

Dessa forma, os resultados indicam que a Kfs responde de maneira integrada às alterações físicas associadas ao manejo com efluente, evidenciadas pela redução da matéria orgânica, configurando-se como um parâmetro funcional sensível para o monitoramento da resposta hidráulica do solo em áreas com drenagem naturalmente limitada, especialmente quando avaliada de forma conjunta com a MO.

6 CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que a Kfs apresentou tendência consistente de redução após o início das aplicações de efluente, mesmo sem alterações detectáveis na DS. A diminuição do teor de matéria orgânica sugere perda de estabilidade estrutural superficial, favorecendo processos de selamento e contribuindo para a redução da infiltração, ainda que essas alterações não tenham sido plenamente captadas pelos testes estatísticos em função do número limitado de amostras.

De forma integrada, os achados indicam que a aplicação recorrente de efluente pode intensificar limitações hidráulicas já características de Planossolos, especialmente em ambientes de relevo plano e drenagem naturalmente restrita. Nesse contexto, a Kfs mostrou-se uma variável funcional adequada para o monitoramento da resposta hidráulica do solo, por refletir alterações superficiais relevantes mesmo quando outros atributos físicos permanecem relativamente estáveis.

Pesquisas futuras que incluam a caracterização do efluente, a ampliação do número de pontos amostrais para a determinação da condutividade hidráulica saturada e a análise de outros atributos físicos e químicos do solo poderão aprofundar a compreensão da relação entre composição do efluente, processos de selamento superficial e variações da Kfs, ampliando o poder estatístico das análises e a robustez das avaliações em Planossolos sob diferentes condições de manejo.

REFERÊNCIAS

- BAIA, C. C.; SANTOS, J. R.; OLIVEIRA, R. S.; SOUZA, L. F. Microbiological contamination of urban groundwater in the Brazilian Western Amazon. **Water**, [S.l.], v. 14, n. 24, p. 4023, 2022. Disponível em: [bit.ly/4iH4YPE](https://doi.org/10.3390/w14244023). Acesso em: 15 jan. 2026.
- CHE, X.; WANG, Y.; ZHANG, H.; LI, J. Repeated applications of farm dairy effluent treated with poly-ferric sulphate did not adversely affect soil phosphorus availability, P fractions and pasture response: a 4-year field plot study. **Journal of Soils and Sediments**, [S.l.], v. 23, n. 6, p. 2482-2493, 2023. Disponível em: [bit.ly/49KYavP](https://doi.org/10.1007/s11368-023-04444-4). Acesso em: 15 jan. 2026.
- CHEROBIM, V. F.; ZIEMER, J.; HORN, R.; KROENER, E. Soil surface sealing by liquid dairy manure as analysed by X-ray computed tomography. **Agricultural Water Management**, [S.l.], v. 213, p. 742-748, 2019. Disponível em: [bit.ly/4sRNXGP](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.07.014). Acesso em: 15 jan. 2026.
- CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Pelotas**. Pelotas: Embrapa-CPACT, 1996.
- DE SILVA, S.; PERERA, S.; KUMAR, M.; JAYASINGHE, G. Land application of industrial wastes: impacts on soil quality, biota, and human health. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.l.], v. 30, n. 26, p. 67974-67996, 2023. Disponível em: [bit.ly/4r2RNey](https://doi.org/10.1007/s11368-023-04444-4). Acesso em: 15 jan. 2026.
- DE SOUSA, M. N. F. A.; ARAÚJO, L. R.; SILVA, E. R.; LIMA, A. C. Mapping groundwater contamination risk in a periurban watershed in northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], p. 105687, 2025. Disponível em: [bit.ly/4qWlJsz](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2025.105687). Acesso em: 15 jan. 2026.
- ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Groundwater Monitoring & Remediation**, [S.l.], v. 9, n. 3, p. 184-193, 1989. Disponível em: [bit.ly/4pLHY3A](https://doi.org/10.1002/gm.330090303). Acesso em: 15 jan. 2026.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 37, p. 1174–1184, 2013. Disponível em: [bit.ly/4jL43xK](https://doi.org/10.1590/S0034-73452013000500007). Acesso em: 16 jan. 2026.

GUPTA, S. K.; KUMAR, M.; SRIVASTAVA, A. K. Hydraulic conductivity of soils: a comprehensive review of the impacts of chemicals, soil salinity, organic matter, and land use. In: **IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE**, 2024, [S.l.]. **Proceedings [...]**. Bristol: IOP Publishing, 2024. p. 012032. Disponível em: [bit.ly/4jMP5XV](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1203/1/012032). Acesso em: 16 jan. 2026.

ILLARZE, G.; PÉREZ, M.; FERNÁNDEZ, R.; GARCÍA, S. Effect of untreated and stabilized dairy effluent applications on soil fertility and associated health risks. **Agrociencia Uruguay**, Montevideo, v. 28, n. NSPE1, 2024. Disponível em: [bit.ly/3LMsluC](https://doi.org/10.33044/agrociencia.1234). Acesso em: 16 jan. 2026

KARGAS, G.; LONDRA, P. A.; SOTIRAKOGLU, K. Saturated hydraulic conductivity measurements in a loam soil covered by native vegetation: spatial and temporal variability in the upper soil layer. **Geosciences**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 105, 2021. Disponível em: [bit.ly/3Zmxi4](https://doi.org/10.3390/geosciences11020105). Acesso em: 15 jan. 2026.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: Edusp, 2005.

LIU, Y. Y.; HAYNES, R. J. Origin, nature, and treatment of effluents from dairy and meat processing factories and the effects of their irrigation on the quality of agricultural soils. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [S.l.], v. 41, n. 17, p. 1531-1599, 2011. Disponível em: [bit.ly/4pPah0V](https://doi.org/10.1080/10407079.2011.600000). Acesso em: 15 jan. 2026.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; LANZANOVA, M. E. **Uso agrícola de resíduos orgânicos: aspectos agrônômicos e ambientais**. Brasília, DF: Embrapa, 2024.

OTTONI, M. V.; GOMES, L. C.; SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A. Saturated hydraulic conductivity and steady-state infiltration rate database for Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 49, p. e0240003, 2025. Disponível em: [bit.ly/3NphRSA](https://doi.org/10.1590/S0034-73452025000100003). Acesso em: 15 jan. 2026.

POPOLIZIO, S.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M. Investigating the spatial structure of soil hydraulic properties in a long-term field experiment using the BEST methodology. **Agronomy**, [S.l.], v. 12, n. 11, p. 2873, 2022. Disponível em: [bit.ly/4sPnmdq](https://doi.org/10.3390/agr12112873). Acesso em: 15 jan. 2026.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, [S.l.], v. 140, p. 292-302, 1985. Disponível em: [bit.ly/49qlno7](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0008-9899(1985)140:3(292)). Acesso em: 15 jan. 2026.

RIBEIRO, G. F.; PEREIRA, S. Y.; IWASHITA, F. Estudo comparativo entre métodos de cálculo da condutividade hidráulica através de ensaios com permeâmetro de Guelph. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, 2009.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, E.; REHBEIN, A. R. Análise e Mapeamento Geomorfológico da Área de Influência da Planície Costeira de Pelotas (Rio Grande do Sul, Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**,

São Paulo, v. 19, n. 3, p. 567–585, 2018. Disponível em: bit.ly/4pFclPv . Acesso em: 16 jan. 2026.

SILVA, L. F. **Pedogênese e classificação de Planossolos em diferentes regiões fisiográficas do Rio Grande do Sul**. 2018. 150 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

TASCA, M. C. B.; BERALDO, R. L.; ANDREAZZI, M. A.; SANTOS, J. M. G. dos. Manejo dos dejetos na bovinocultura de leite na fazenda Unicesumar. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA DA UNICESUMAR, 12., 2021, Maringá. Anais [...]. Maringá: Unicesumar, 2021. Disponível em: bit.ly/4qX2fE2 . Acesso em: 16 jan. 2026

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, SP: Instituto Agrônômico, 2001.