



Cobre e zinco extraíveis por Mehlich-1 e Mehlich-3 em dois solos do Cerrado manejados com dejetos líquidos de suínos

João Carlos ARRUDA-OLIVEIRA ^{*1,4}, Josimar Brito SILVA ^{2,4}, Emerson Silva MIRANDA ³,
Henrique Ferreira ARAUJO ⁴, Renata Vilalba REIS ⁴, Jholian Maicon RIBEIRO-SANTOS ⁴,
Josias do Espírito Santo CORINGA ⁵, Oscarlina Lúcia Santos WEBER ⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Juína, MT, Brasil.

² Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

⁴ Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

*E-mail: oliveira.joao@ifmt.edu.br

Submetido em: 10/05/2026; Aceito em: 19/10/2026; Publicado em: 27/10/2026.

RESUMO: O objetivo foi comparar os teores de cobre (Cu) e zinco (Zn) extraídos pelos extratores Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), sua variação em profundidade e a associação entre os extratores, em dois solos do Cerrado mato-grossense com texturas contrastantes: franco-arenosa (Lucas do Rio Verde, com 10 anos de aplicação de dejetos líquidos de suínos - DLS) e arenosa (Nova Mutum, com 5 anos de aplicação de DLS). As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,00–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m, em quatro parcelas de 15 ha, totalizando 60 ha por área experimental ($n = 4$ parcelas por solo), em uma única gleba por local. As comparações pareadas entre os extratores, em cada profundidade, foram realizadas pelo teste de Wilcoxon para amostras pareadas, bicaudal. A variação vertical dos teores foi avaliada pelo teste de Friedman ($p < 0,05$), e a associação entre os métodos foi analisada por meio da correlação de Spearman. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre M1 e M3 para Cu ou Zn em nenhuma das profundidades ou em qualquer dos solos (p variando de 0,125 a 0,875). No entanto, diferenças descritivas pronunciadas foram observadas, especialmente para Zn: M1 extraiu teores numericamente superiores em ambos os solos. Para Cu, M3 apresentou valores numericamente maiores que M1 no solo arenoso, enquanto M1 foi numericamente superior a M3 no solo franco-arenoso nas camadas de 0,00–0,05 e 0,05–0,10 m. Foi detectado efeito da profundidade apenas para o teor de Zn extraído por M1 no solo arenoso ($p = 0,005$), com medianas de $2,730 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0,00–0,05 m e de $0,350 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0,10–0,20 m. Os teores obtidos pelos métodos M1 e M3 apresentaram correlações positivas de Spearman para Cu ($\rho = 0,685$) e Zn ($\rho = 0,740$), considerando-se o conjunto dos dois solos ($n = 24$ pares; $p < 0,001$). Considerando o tamanho amostral de $n = 4$, a ausência de diferenças estatisticamente significativas não demonstra equivalência entre os métodos. A correlação observada indica associação entre os extratores, mas não permite concluir que sejam diretamente substituíveis sem calibração agrônoma.

Palavras-chave: efluentes suínos; micronutrientes; métodos de extração; solos arenosos.

Copper and zinc extractable by Mehlich-1 and Mehlich-3 in two Cerrado soils managed with liquid swine manure

ABSTRACT: The objective was to compare copper (Cu) and zinc (Zn) levels extracted by Mehlich-1 (M1) and Mehlich-3 (M3), their variation with depth, and the association between the extractants, in two Cerrado soils from Mato Grosso with contrasting textures: sandy loam (Lucas do Rio Verde, 10 years of liquid swine manure - LSM application) and sandy (Nova Mutum, 5 years of LSM). Soil was sampled at depths of 0.00–0.05, 0.05–0.10, and 0.10–0.20 m in four 15-ha plots within a 60-ha field per site ($n = 4$ plots per soil), in a single field per site. Paired comparisons between extractants at each depth used two-sided paired Wilcoxon signed-rank tests, vertical variation used Friedman tests ($p < 0.05$), and the association between methods used Spearman correlation. M1 and M3 did not differ statistically for Cu or Zn at any depth or soil (p from 0.125 to 0.875). However, pronounced descriptive differences were observed, particularly for Zn: M1 extracted numerically higher values in both soils. For Cu, M3 showed numerically higher values than M1 in the sandy soil, whereas M1 was numerically higher than M3 in the sandy loam soil at 0.00–0.05 and 0.05–0.10 m. A depth effect was detected only for M1-extracted Zn in the sandy soil ($p = 0.005$; medians of 2.730 mg dm^{-3} at 0.00–0.05 m and 0.350 mg dm^{-3} at 0.10–0.20 m). M1 and M3 showed positive Spearman correlations for Cu ($\rho = 0.685$) and Zn ($\rho = 0.740$) ($n = 24$ pairs, two soils pooled; $p < 0.001$). With $n = 4$, the absence of

significant differences does not demonstrate equivalence. The correlation indicates association between methods but does not allow direct substitution without agronomic calibration.

Keywords: pig effluents; micronutrients; extraction methods; sandy soils.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da suinocultura intensiva no estado de Mato Grosso gera, anualmente, cerca de 9,9 milhões de m³ de dejetos líquidos de suínos (DLS) (ARRUDA-OLIVEIRA et al., 2024). A aplicação do DLS em solos agrícolas é uma prática consagrada para a reciclagem de nutrientes e a melhoria dos atributos físicos e químicos do solo (SILVA et al., 2025). Contudo, a elevada suplementação de cobre (Cu) e zinco (Zn) na dieta animal para fins promotores de crescimento resulta em expressiva excreção desses metais (BROOM et al., 2021; DALTO et al., 2023). O aporte contínuo de DLS pode promover o acúmulo desses micronutrientes na camada superficial do solo, o que acarreta riscos de contaminação do sistema solo-água, os quais variam em função da dose acumulada, do tempo de aplicação, das propriedades edáficas e da proximidade de recursos hídricos (TIECHER et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2020; ZHANG et al., 2026).

O monitoramento adequado desse acúmulo requer métodos analíticos capazes de quantificar os teores químicos extraídos de Cu e Zn. Cabe ressaltar que os extratores químicos não medem diretamente a disponibilidade efetiva para as plantas, que depende de processos fisiológicos e de absorção, mas sim os pools químicos extraíveis associados a frações lábeis e potencialmente disponíveis do solo (ANTONANGELO et al., 2022; KORZENIOWSKA et al., 2025). No Brasil, o extrator Mehlich-1 (M1) é o método de rotina mais difundido, atuando predominantemente por dissolução ácida (H₂SO₄ + HCl; pH ≈ 1,2) e por troca iônica (SILVA et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2017). Por outro lado, o extrator Mehlich-3 (M3) tem sido proposto como alternativa multi-elementar, combinando ácidos fracos com o agente quelante EDTA (Mehlich, 1984; Sandhu et al., 2023), que apresenta alta afinidade por metais complexados à matéria orgânica do solo (MO).

Em solos tropicais altamente intemperizados submetidos à aplicação de DLS, a alteração da dinâmica dos metais é complexa: enquanto o Cu apresenta forte tendência a formar complexos organominerais estáveis com a MO adicionada via efluente (SCHONINGER et al., 2012), o Zn tende a se associar preferencialmente a sítios minerais e óxidos de Fe e Al (MENEZES et al., 2010). Apesar do acúmulo relatado desses elementos em áreas sob DLS, permanecem escassas as informações comparativas sobre os teores de Cu e Zn extraídos por M1 e M3 em solos de textura grosseira (arenosa e franco-arenosa) do Cerrado, nos quais a baixa capacidade de troca catiônica mineral contrasta com o incremento de carbono orgânico derivado dos dejetos.

Nesse contexto, fundamenta-se a hipótese de que: (i) o extrator Mehlich-3 extrai maiores teores de Cu do que o Mehlich-1 devido à ação complexante do EDTA sobre as frações orgânicas enriquecidas pelo DLS; e (ii) o extrator Mehlich-1 extrai maiores teores de Zn devido à sua elevada acidez mineral, capaz de solubilizar formas associadas à matriz mineral do solo.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi comparar os teores de Cu e Zn extraídos pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, bem como sua variação em profundidade e a associação entre os métodos, em dois solos do Cerrado mato-grossense caracterizados por diferentes texturas e históricos de aplicação de dejetos líquidos de suínos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização ambiental e dos solos

O estudo foi conduzido em áreas agrícolas comerciais de produção localizadas nos municípios de Lucas do Rio Verde (12° 44' 14,4" S; 56° 08' 46,7" O) e Nova Mutum (13° 44' 47,3" S; 56° 03' 58,0" O), ambos inseridos no bioma Cerrado, na região médio-norte do estado de Mato Grosso, Brasil. O clima regional é classificado como tropical com inverno seco (Aw), segundo a classificação de Köppen-Geiger adaptada para o Brasil por Alvares et al. (2013), com precipitação média anual entre 1.750 e 2.200 mm e temperatura média anual entre 24,0 e 27,5 °C. A vegetação nativa do tipo Cerradão foi originalmente convertida para o cultivo da gramínea forrageira *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Os solos das áreas avaliadas foram classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e correlacionados aos sistemas internacionais World Reference Base (WRB) e Soil Taxonomy. Em Lucas do Rio Verde, o solo é um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Ferralsol na WRB e Oxisol na Soil Taxonomy), de textura franco-arenosa, submetido ao manejo com dejetos líquidos de suínos (DLS) por um período estimado de 10 anos. Em Nova Mutum, o solo corresponde a um Neossolo Quartzarênico Órtico (Arenosol na WRB e Quartzipsamment na Soil Taxonomy), de textura arenosa, manejado com DLS por um período estimado de 5 anos.

Por se tratar de áreas comerciais de produção agrícola, ressalta-se que não se dispõe do registro detalhado quanto ao histórico de manejo das áreas, tais como os volumes exatos aplicados, a frequência das fertirrigações, a composição químico-física de cada lote de efluente e as doses acumuladas de Cu e Zn ao longo dos anos. As características químicas e granulométricas iniciais dos solos, estratificadas nas profundidades discretas de amostragem (0,00–0,05 m; 0,05–0,10 m e 0,10–0,20 m), foram determinadas segundo as metodologias de Teixeira et al. (2017) e são apresentadas na Tabela 1.

2.2. Delineamento experimental e amostragem de solo

Adotou-se um delineamento observacional de amostragem em áreas agrícolas comerciais de produção. Em cada município, selecionou-se uma gleba uniforme de 60 ha manejada com DLS, dividida em quatro parcelas contíguas de 15 ha cada, consideradas unidades experimentais (n = 4 por solo). Como as parcelas pertencem a uma única gleba em cada município, as inferências se restringem aos dois municípios amostrados.

As coletas de solo foram realizadas entre novembro de 2019 e fevereiro de 2020. Em cada parcela de 15 ha, foram coletadas subamostras simples de solo em cinco pontos aleatórios, seguindo um caminhar em zigue-zague, nas profundidades de 0,00–0,05 m, 0,05–0,10 m e 0,10–0,20 m. As cinco subamostras de cada parcela e camada foram homogeneizadas em baldes plásticos para constituir uma amostra composta por unidade experimental e profundidade, totalizando quatro amostras compostas independentes por camada em cada solo (n = 4). As mesmas parcelas foram amostradas em todas as três profundidades. Cada amostra composta foi analisada em duplicata pelo extrator. Os resultados são expressos em base de solo seco.

Tabela 1. Características químicas e granulométricas dos solos, estratificadas em profundidade, de textura franco-arenosa (FA) e arenosa (A), nos municípios de Lucas do Rio Verde e Nova Mutum, Mato Grosso, respectivamente, em áreas sob aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS)

Table 1. Chemical and granulometric characteristics of soils, stratified by depth, with sandy loam (FA) and sandy (A) textures in the Mato Grosso municipalities of Lucas do Rio Verde and Nova Mutum, respectively, in areas under liquid swine manure (LSM) application

Atributos do solo	FA			A		
	Profundidade (m)					
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20
pH H ₂ O ⁽¹⁾	5,43	5,40	5,35	6,03	6,08	6,05
P ⁽²⁾	52,00	31,84	20,66	17,71	12,06	7,92
K ⁽³⁾	103,50	75,00	67,00	85,75	74,25	54,00
Ca ⁽⁴⁾	1,52	1,01	0,51	1,86	1,37	0,95
Mg ⁽⁴⁾	0,33	0,20	0,13	0,63	0,42	0,28
Al ⁽⁴⁾	0,11	0,19	0,34	0,02	0,03	0,03
H+Al ⁽⁵⁾	5,03	4,66	4,26	2,89	2,72	2,56
CTC ⁽⁶⁾	7,14	6,06	5,07	5,60	4,70	3,93
V ⁽⁷⁾	29,60	23,13	16,00	48,39	42,13	34,83
Matéria orgânica ⁽⁸⁾	29,42	22,57	19,50	19,46	16,86	13,82
Argila ⁽⁹⁾	156,38	147,90	156,37	64,77	64,72	64,76
Silte ⁽⁹⁾	59,43	59,36	59,44	26,12	26,10	26,12
Areia ⁽⁹⁾	784,19	792,75	784,19	909,11	909,19	909,12

⁽¹⁾ por potenciometria; ⁽²⁾ extraído pelo método Mehlich-1 e determinado por colorimetria (mg dm⁻³); ⁽³⁾ extraído pelo método Mehlich-1 e determinado por fotometria de chama (mg dm⁻³); ⁽⁴⁾ extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação (cmolc dm⁻³); ⁽⁵⁾ determinado por extração com acetato de cálcio e titulação (cmolc dm⁻³); ⁽⁶⁾ calculado como a soma das bases trocáveis e da acidez potencial (cmolc dm⁻³); ⁽⁷⁾ calculado como a porcentagem da capacidade de troca catiônica ocupada por bases trocáveis (%); ⁽⁸⁾ determinado pelo método de combustão a seco em mufla (g kg⁻¹); ⁽⁹⁾ determinado pelo método da pipeta (g kg⁻¹).

⁽¹⁾ by potentiometry; ⁽²⁾ extracted by Mehlich-1 and determined by colorimetry (mg dm⁻³); ⁽³⁾ extracted by Mehlich-1 and determined by flame photometry (mg dm⁻³); ⁽⁴⁾ extracted with 1 mol L⁻¹ KCl and determined by titration (cmolc dm⁻³); ⁽⁵⁾ determined by calcium acetate extraction and titration (cmolc dm⁻³); ⁽⁶⁾ calculated as the sum of exchangeable bases and potential acidity (cmolc dm⁻³); ⁽⁷⁾ calculated as the percentage of cation exchange capacity occupied by exchangeable bases (%); ⁽⁸⁾ determined by the dry combustion method in a muffle furnace (g kg⁻¹); ⁽⁹⁾ determined by the pipette method (g kg⁻¹).

Após a amostragem, o material foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante, destorroado e passado em peneira de malha de 2,0 mm para obtenção da fração terra fina seca em estufa (TFSE), conforme padronizado por Teixeira et al. (2017).

2.3. Determinação dos teores de Cu e Zn extraíveis com Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3)

Os teores de Cu e Zn foram extraídos utilizando o extrator Mehlich-1 (H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1978), conforme a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), e o extrator Mehlich-3 (CH₃COOH 0,2 mol L⁻¹ + NH₄NO₃ 0,25 mol L⁻¹ + NH₄F 0,015 mol L⁻¹ + HNO₃ 0,013 mol L⁻¹ + EDTA 0,001 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1984), conforme Silva (2009), utilizando alíquotas da mesma amostra composta. Os teores de Cu e Zn nos extratos foram posteriormente determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

2.4. Análise estatística dos dados e declaração do uso de inteligência artificial

Em razão do pequeno tamanho amostral (n = 4) e da natureza pareada das observações (uma vez que M1 e M3 foram aplicados a alíquotas idênticas da mesma amostra), a comparação dos teores extraídos por M1 e M3 em cada camada individual foi realizada por meio do teste não paramétrico de Wilcoxon pareado bilateral (p < 0,05).

A avaliação da variação vertical dos teores de Cu e Zn entre as três profundidades (0,00–0,05; 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m), isoladamente para cada solo e extrator, foi efetuada pelo teste de Friedman (p < 0,05), adotando-se a parcela como bloco, pois as três profundidades foram amostradas na mesma parcela e, portanto, não são independentes. Os

valores de p do teste de Friedman foram obtidos por permutação exata (4 blocos), com correção de empates, conforme indicado nas notas das Tabelas 2 e 3. A magnitude do grau de associação entre os teores extraídos pelos dois métodos foi determinada pelo coeficiente de correlação de postos de Spearman (p < 0,05). Os resultados foram expressos em termos de medidas não paramétricas de posição (Mediana) e de dispersão (Intervalo Interquartil, Q1–Q3).

Para n = 4 pares, os valores de p do teste de Wilcoxon foram calculados de forma exata. A correlação de Spearman foi calculada com os dois solos agrupados (n = 24 pares) e, separadamente, para cada solo (n = 12 pares). Como os pares de uma mesma parcela em diferentes profundidades não são independentes, o número efetivo de observações independentes é menor que o número de pares, e os valores de p da correlação são aproximados e potencialmente otimistas. Todas as rotinas estatísticas foram processadas na linguagem R, no ambiente RStudio (R CORE TEAM, 2026).

Ferramentas de inteligência artificial generativa foram empregadas exclusivamente como suporte ao desenvolvimento, à estruturação e à validação dos scripts computacionais em linguagem R no ambiente RStudio, bem como à tradução, à revisão gramatical e ao refinamento estilístico do texto para a língua inglesa. A verificação das rotinas de código, a validação de todas as saídas numéricas e a responsabilidade científica integral pelas conclusões apresentadas cabem estritamente aos autores.

3. RESULTADOS

A comparação pareada entre os extratores Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) pelo teste de Wilcoxon não indicou diferença estatisticamente significativa nos teores de cobre

(Cu) extraídos em nenhuma das profundidades avaliadas (0,00–0,05; 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m), tanto no solo franco-arenoso ($p = 0,125$; 0,375 e 0,875, respectivamente) quanto no solo arenoso ($p = 0,125$ para todas as camadas) (Tabela 2).

Para o Cu no solo franco-arenoso, não foi detectado efeito de profundidade (M1: $p = 0,069$; M3: $p = 0,102$; Tabela 2), embora as medianas tenham sido maiores em 0,00–0,05 m. Para o zinco (Zn), as comparações pareadas pelo teste de Wilcoxon também não indicaram diferença estatisticamente significativa entre os extratores M1 e M3 em todas as profundidades isoladas no solo franco-arenoso ($p = 0,250$ em 0,00–0,05 m e $p = 0,125$ nas demais camadas) e no solo arenoso ($p = 0,125$ em todas as camadas) (Tabela 3).

Contudo, as medianas de Zn extraído por M1 foram numericamente muito superiores às de M3 em todas as profundidades e solos, variando de 3,445 a 8,460 mg dm⁻³ (M1) versus 0,070 a 0,350 mg dm⁻³ (M3) no solo franco-arenoso, e de 0,350 a 2,730 mg dm⁻³ (M1) versus 0,000 a 0,045 mg dm⁻³ (M3) no solo arenoso.

Em relação à distribuição no perfil do solo, o teste de Friedman indicou que os teores de Zn não variaram significativamente com a profundidade no solo franco-arenoso para M1 ($p = 0,273$) e M3 ($p = 0,125$), nem no solo arenoso para M3 ($p = 0,111$). A única estratificação vertical estatisticamente significativa foi observada para o Zn extraído por M1 no solo arenoso ($p = 0,005$), caracterizada por um decréscimo progressivo da camada superficial (0,00–0,05 m) em direção à subsuperficial (0,10–0,20 m) (Tabela 3).

Apesar da ausência de diferenças significativas nas comparações pareadas por camada individual, a análise de correlação de postos de Spearman indicou associação positiva entre os teores de M1 e M3 ($n = 24$ pares; Cu: $\rho = 0,685$; Zn: $\rho = 0,740$; $p < 0,001$). Os dois solos foram agrupados, e a correlação pode refletir diferenças entre os locais. Por solo ($n = 12$), apenas o Zn no solo arenoso foi significativo ($\rho = 0,649$; $p = 0,023$); os demais não foram (Cu, FA: $\rho = 0,367$, $p = 0,241$; Cu, A: $\rho = 0,203$, $p = 0,526$; Zn, FA: $\rho = 0,252$, $p = 0,429$).

Tabela 2. Teores de cobre (Cu) extraível pelos extratores Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), estratificados em profundidade, em solos de textura franco-arenosa (FA) e arenosa (A) sob aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS)

Table 2. Extractable copper (Cu) levels in Mehlich-1 (M1) and Mehlich-3 (M3) stratified by depth in sandy loam (FA) and sandy (A) texture soils under liquid swine manure (LSM) application

Classe de textura	Profundidade (m)	Teor de Cu extraível (mg dm ⁻³)		Valor de p ⁽¹⁾
		Mediana (Q1–Q3)		
		M1	M3	
FA	0,00-0,05	1,215 (1,142–1,285)	0,805 (0,785–0,857)	0,125
	0,05-0,10	1,035 (0,720–1,300)	0,765 (0,738–0,797)	0,375
	0,10-0,20	0,790 (0,570–0,923)	0,750 (0,725–0,750)	0,875
	Valor de p ⁽²⁾	0,069	0,102	-
A	0,00-0,05	0,130 (0,090–0,172)	0,680 (0,677–0,698)	0,125
	0,05-0,10	0,100 (0,045–0,188)	0,685 (0,675–0,690)	0,125
	0,10-0,20	0,030 (0,025–0,035)	0,680 (0,645–0,720)	0,125
	Valor de p ⁽²⁾	0,125	1,000	-

Os valores são apresentados como mediana (Q1–Q3). $n = 4$ parcelas por combinação. A significância estatística foi definida como $p < 0,05$. ⁽¹⁾ Teste de Wilcoxon pareado (bicaudal) para postos sinalizados, comparando M1 e M3 em cada profundidade. ⁽²⁾ Teste de Friedman, comparando as profundidades dentro de cada extrator e classe textural, utilizando a parcela como bloco. Valores de p do teste de Friedman obtidos por permutação exata, com correção de empates.

Values are presented as median (Q1–Q3). $n = 4$ plots per combination. Statistical significance was set at $p < 0,05$. ⁽¹⁾ Two-sided paired Wilcoxon signed-rank test comparing M1 and M3 at each depth. ⁽²⁾ Friedman test comparing depths within each extractor and textural class, using plot as the block. Friedman p-values obtained by exact permutation, with tie correction.

Tabela 3. Teores de zinco (Zn) extraível pelos extratores Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), estratificados em profundidade, em solos de textura franco-arenosa (FA) e arenosa (A) sob aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS)

Table 3. Extractable zinc (Zn) levels in Mehlich-1 (M1) and Mehlich-3 (M3) stratified by depth in sandy loam (FA) and sandy (A) texture soils under liquid swine manure (LSM) application

Classe de textura	Profundidade (m)	Teor de Zn extraível (mg dm ⁻³)		Valor de p ⁽¹⁾
		Mediana (Q1–Q3)		
		M1	M3	
FA	0,00-0,05	8,460 (5,525–9,857)	0,350 (0,228–0,588)	0,250
	0,05-0,10	5,675 (3,220–7,967)	0,255 (0,180–0,323)	0,125
	0,10-0,20	3,445 (1,832–4,697)	0,070 (0,038–0,135)	0,125
	Valor de p ⁽²⁾	0,273	0,125	-
A	0,00-0,05	2,730 (1,775–3,535)	0,045 (0,015–0,082)	0,125
	0,05-0,10	0,950 (0,598–1,265)	0,000 (0,000–0,007)	0,125
	0,10-0,20	0,350 (0,268–0,448)	0,000 (0,000–0,007)	0,125
	Valor de p ⁽²⁾	0,005	0,111	-

Os valores são apresentados como mediana (Q1–Q3). $n = 4$ parcelas por combinação. A significância estatística foi definida como $p < 0,05$. ⁽¹⁾ Teste de Wilcoxon pareado (bicaudal) para postos sinalizados, comparando M1 e M3 em cada profundidade. ⁽²⁾ Teste de Friedman, comparando as profundidades dentro de cada extrator e classe textural, utilizando a parcela como bloco.

Values are presented as median (Q1–Q3). $n = 4$ plots per combination. Statistical significance was set at $p < 0,05$. ⁽¹⁾ Two-sided paired Wilcoxon signed-rank test comparing M1 and M3 at each depth. ⁽²⁾ Friedman test comparing depths within each extractor and textural class, using plot as the block. Friedman p-values obtained by exact permutation, with tie correction.

4. DISCUSSÃO

O teste de Friedman não detectou diferenças estatisticamente significativas entre as profundidades na maioria das combinações (Tabelas 2 e 3). Com quatro parcelas, o poder é baixo, de modo que esse resultado não demonstra uma distribuição homogênea dos micronutrientes ao longo da camada de 0,00 a 0,20 m. De fato, as medianas diminuíram com a profundidade na maioria das combinações (por exemplo, Zn extraído por M1 no solo franco-arenoso, de 8,460 para 3,445 mg dm⁻³, e Cu extraído por M1, de 1,215 para 0,790 mg dm⁻³; Tabelas 2 e 3), o que indica tendência descritiva de acúmulo superficial.

O aporte continuado de dejetos líquido de suínos (DLS), efluente rico em cobre (Cu) e zinco (Zn) provenientes da suplementação mineral na dieta animal (Broom et al., 2021), pode ter contribuído para essa tendência. As aplicações sucessivas do efluente favorecem o aumento da matéria orgânica (MO) e a melhoria dos atributos químicos do solo (Silva et al., 2024), o que pode favorecer a formação de complexos organominerais que retêm os metais na camada superficial do solo (LOURENZI et al., 2016; CARVALHO et al., 2023; FLORENTINO et al., 2025).

A principal exceção de estratificação vertical significativa ao nível de 5% ocorreu para o Zn extraído por Mehlich-1 (M1) no solo de textura arenosa ($p = 0,005$; Tabela 3), caracterizada pelo acúmulo na camada superficial (0,00–0,05 m; mediana de 2,730 mg dm⁻³) e por um decréscimo expressivo em direção às camadas subsuperficiais (0,950 mg dm⁻³ em 0,05–0,10 m e 0,350 mg dm⁻³ em 0,10–0,20 m). Para o M3, nesse mesmo solo, não foi detectado efeito de profundidade ($p = 0,111$).

Para o Cu no solo de textura franco-arenosa, não foi detectado efeito de profundidade para M1 ($p = 0,069$) nem para M3 ($p = 0,102$; Tabela 2). As maiores medianas concentraram-se na camada superficial de 0,00–0,05 m (1,215 mg dm⁻³ para M1 e 0,805 mg dm⁻³ para M3), reduzindo-se na camada de 0,10–0,20 m (0,790 mg dm⁻³ para M1 e 0,750 mg dm⁻³ para M3). A tendência de retenção superficial pode estar relacionada ao maior teor de MO (23,83 g kg⁻¹) e argila (153,6 g kg⁻¹) no solo franco-arenoso de Lucas do Rio Verde (Tabela 1), os quais podem imobilizar o Cu na zona de aplicação (CARVALHO et al., 2023; SILVA et al., 2025). No solo arenoso, a distribuição do Cu no perfil não apresentou efeito de profundidade para M1 ($p = 0,125$) nem para M3 ($p = 1,000$; Tabela 2).

Nas comparações pareadas entre M1 e M3, pelo teste de Wilcoxon, em cada camada, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5% ($p = 0,125$ a $0,875$ para Cu, Tabela 2; $p = 0,125$ a $0,250$ para Zn, Tabela 3). É relevante observar que, para um tamanho amostral de quatro pares ($n = 4$), o menor p-valor bilateral exato do teste de Wilcoxon é $p = 0,125$, o que limita a rejeição da hipótese nula isoladamente por camada, e as diferenças observadas nas medianas devem ser tratadas como descritivas.

No solo franco-arenoso de Lucas do Rio Verde (argila de 153,6 g kg⁻¹ e MO de 23,83 g kg⁻¹; Tabela 1), o M1 apresentou medianas de Cu numericamente superiores às do M3 em 0,00–0,05 m (1,215 vs. 0,805 mg dm⁻³) e em 0,05–0,10 m (1,035 vs. 0,765 mg dm⁻³), com valores próximos em 0,10–0,20 m (0,790 vs. 0,750 mg dm⁻³; Tabela 2), sem diferença estatisticamente significativa em nenhuma camada

(a equivalência não foi testada). Em contrapartida, no solo arenoso de Nova Mutum, caracterizado por menor teor de argila (64,8 g kg⁻¹) e MO reduzida (16,71 g kg⁻¹) (Tabela 1), o M3 apresentou medianas numericamente maiores (diferença não confirmada estatisticamente) em todas as camadas (de 0,680 a 0,685 mg dm⁻³ para M3, contra 0,030 a 0,130 mg dm⁻³ para M1; Tabela 2).

Em solos com reduzida fração argilosa, a matéria orgânica aportada pelo DLS constitui o principal componente responsável pela retenção do Cu, ligando-o fortemente por meio de complexos de esfera interna com grupos funcionais orgânicos (SCHONINGER et al., 2012). A presença do agente quelante EDTA na solução do M3 confere-lhe elevada capacidade de desorganizar e complexar essas formas orgânicas (Antonangelo et al., 2022; Sandhu et al., 2023), enquanto a solução de ácidos minerais do M1 (H₂SO₄ + HCl) atua preferencialmente por dissolução e troca iônica simples, extraíndo menores teores de Cu de complexos organometálicos estáveis (SILVA et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2017). O solo arenoso tem menos MO e pH mais alto que o franco-arenoso (Tabela 1), e o maior teor de Cu extraído por M3 nele não é explicado apenas pela complexação orgânica. Limitações analíticas também devem ser consideradas.

Para o Zn, identificou-se um padrão oposto: o M1 apresentou teores numericamente superiores aos do M3 em todas as profundidades e em ambas as classes texturais (Tabela 3), com grandes diferenças absolutas. No solo franco-arenoso, as medianas do M1 variaram de 3,445 a 8,460 mg dm⁻³, enquanto as do M3 variaram de 0,070 a 0,350 mg dm⁻³. No solo arenoso, o M1 apresentou medianas de 0,350 a 2,730 mg dm⁻³, em contraste com os valores do M3, muito baixos e próximos de zero (0,000 a 0,045 mg dm⁻³; Tabela 3).

Essa tendência marcante pode estar associada aos mecanismos de fixação do Zn no solo, elemento que se associa preferencialmente a compartimentos inorgânicos e a fases minerais, como óxidos de Fe e Al, e a colóides da fração argila (MENEZES et al., 2010). Conforme a Tabela 1, a fração mineral (64,8 g kg⁻¹ de argila no solo arenoso e 153,6 g kg⁻¹ no franco-arenoso) fornece os sítios de adsorção inorgânicos. A elevada acidez mineral da solução do M1 (pH $\approx 1,2$) promove a dissolução parcial dessa matriz mineral, liberando grandes quantidades de Zn no extrato (SILVA et al., 2009). Em contrapartida, a acidez moderada do M3 (pH $\approx 2,5$) pode não ter poder de ataque suficiente para solubilizar o Zn retido na fração mineral refratária (ANTONANGELO et al., 2022; GÜRBÜZ, 2025).

Apesar das disparidades nas quantidades absolutas extraídas de Cu e Zn (Tabelas 2 e 3), a análise de correlação de postos de Spearman indicou associação positiva entre M1 e M3 (Cu: $\rho = 0,685$; Zn: $\rho = 0,740$), calculada com os dois solos agrupados ($n = 24$ pares). Esse agrupamento pode induzir correlação devido às diferenças entre os dois solos e entre as profundidades. Por solo ($n = 12$), apenas o Zn no solo arenoso apresentou correlação significativa ($\rho = 0,649$; $p = 0,023$), de modo que a associação entre os métodos não se sustentou para o Cu em nenhum dos solos nem para o Zn no solo franco-arenoso.

Contudo, a existência de correlação estatística significativa não implica equivalência numérica nem permite a substituição direta entre os métodos sem calibração prévia (ANTONANGELO et al., 2022; KORZENIOWSKA et al., 2025; SANDHU et al., 2023). Tendo em vista o forte viés

sistemático observado para o Zn, a adoção do M3, em substituição ao M1, em laboratórios de rotina do Cerrado depende do estabelecimento de equações de conversão regionais e da indispensável calibração agrônoma com base na absorção efetiva pelas culturas.

Por fim, aponta-se como limitação do estudo o confundimento experimental entre os fatores avaliados: o solo franco-arenoso (Lucas do Rio Verde) combina maior teor de argila e de MO com um histórico de 10 anos de DLS, enquanto o solo arenoso (Nova Mutum) associa menor teor de argila e de MO a 5 anos de DLS (Tabela 1). Consequentemente, o delineamento não permite isolar estatisticamente o efeito da classe textural daquele decorrente do tempo de manejo, devendo os resultados ser interpretados restritamente ao contexto dos locais estudados. Também são limitações o pequeno número de unidades ($n = 4$ parcelas de uma única gleba por local), a ausência de dados de doses e composição do DLS, de teores totais de Cu e Zn e de validação com plantas.

5. CONCLUSÕES

Os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 não diferiram estatisticamente para Cu ou Zn em nenhuma camada ou solo, mas houve diferenças descritivas marcantes. O M1 extraiu numericamente mais Zn em ambos os solos (hipótese ii), com medianas de 3,445 a 8,460 mg dm⁻³ contra 0,070 a 0,350 mg dm⁻³ do M3 no solo franco-arenoso, e de 0,350 a 2,730 mg dm⁻³ contra 0,000 a 0,045 mg dm⁻³ no solo arenoso. Para o Cu, o M3 foi numericamente superior apenas no solo arenoso, de modo que a hipótese (i) foi apoiada somente descritivamente e em um dos solos; no solo franco-arenoso, o M1 foi numericamente superior em 0,00–0,05 e 0,05–0,10 m. Com $n = 4$, a ausência de significância não demonstra equivalência entre os métodos.

Não foi detectado efeito de profundidade na maioria das combinações. A única diferença estatisticamente significativa entre profundidades ocorreu para o Zn extraído com Mehlich-1 no solo arenoso ($p = 0,005$).

Considerando os dois solos em conjunto, os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 apresentaram correlação de Spearman positiva e estatisticamente significativa ($p < 0,001$) para Cu e Zn; por solo, apenas o Zn no solo arenoso foi significativo ($p = 0,023$). Essa associação indica relação entre os métodos, mas não autoriza a substituição direta ou a intercambiabilidade entre eles sem calibração prévia.

O confundimento experimental entre a classe textural do solo, o local de amostragem e o histórico de aplicação do efluente impede isolar o efeito da textura, evidenciando a necessidade de pesquisas futuras conduzidas sob condições controladas e integradas à absorção efetiva de micronutrientes pelas plantas.

6. 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. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ANTONANGELO, J. A.; SOUZA, J. L. B.; WHITAKER, A.; ARNALL, B.; ZHANG, H. Evaluation of Mehlich-3 as a multi-element extractor for micronutrients and sulfur in a soil-ryegrass system amended with variable biochar

rates from two feedstocks. *Land*, v. 11, n. 11, e1979, 2022. <https://doi.org/10.3390/land11111979>

ARRUDA-OLIVEIRA, J. C.; SILVA, J. B.; MIRANDA, E. S.; RIBEIRO-SANTOS, J. M.; WEBER, O. L. S. Performance of Mehlich-1 and Mehlich-3 extractors in quantifying phosphorus in soils fertilized with liquid swine manure. *Bioagro*, v. 36, n. 2, p. 237-244, 2024. <https://doi.org/10.51372/bioagro362.11>

BROOM, L. J.; MONTEIRO, A.; PIÑÓN, A. Recent advances in understanding the influence of zinc, copper, and manganese on the gastrointestinal environment of pigs and poultry. *Animals*, v. 11, n. 5, e1276, 2021. <https://doi.org/10.3390/ani11051276>

CARVALHO, M. L.; MACIEL, V. F.; BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, T. O.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools - a literature review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 47, e20220130, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220130>

DALTO, D. B.; LAPOINTE, J.; MATTE, J. J. Swine nutrition and trace mineral supplementation: environmental impacts and physiological considerations. *Journal of Animal Science*, v. 101, e312, 2023. <https://doi.org/10.1093/jas/skad312>

FLORENTINO, R. W.; KUMMER, A. C. B.; BEDNARZ, J. A.; MARTINS, K. G. Influence of liquid swine slurry on soil quality and water infiltration. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 60, e2301, 2025. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782301>

GÜRBÜZ, M. A. Identification of multiple extraction methods to be used in extraction of macro and micronutrients of neutral and alkaline soils by a multi-criteria decision-making technique (TOPSIS). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 25, p. 4669–4686, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02422-y>

KORZENIOWSKA, J.; STANISLAWSKA-GLUBIAK, E.; LIPINSKI, W. Determination of soil micronutrient critical values using Mehlich 3 extractor for main field crops. *Agronomy*, v. 15, n. 11, e2661, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15112661>

LOURENZI, C. R.; SCHERER, E. E.; CERETTA, C. A.; TIECHER, T. L.; CANCIAN, A.; FERREIRA, P. A. A.; BRUNETTO, G. Atributos químicos de Latossolo após sucessivas aplicações de composto orgânico de dejetos líquido de suínos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 3, p. 233-242, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000300005>

MARTÍNEZ, E.; MARESMA, A.; BIAU, A.; BERENGUER, P.; CELA, S.; SANTIVERI, F.; MICHELENA, A.; LLOVERAS, J. Long-term effects of liquid swine manure on soil organic carbon and Cu/Zn levels in soil and maize. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 118, p. 193-205, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10093-7>

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 15, n. 12, p. 1409-1416, 1984. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>

MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 9, n. 6, p. 477-492, 1978. <https://doi.org/10.1080/00103627809366824>

- MENEZES, A. A.; DIAS, L. E.; NEVES, J. C. L.; SILVA, J. V. O. da. Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 417-424, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200015>
- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2026. <https://www.R-project.org/>
- SANDHU, A. K.; SHARMA, A.; KAUR, N.; ZOTARELLI, L.; MORGAN, K.; SHARMA, L. K. Evaluate the use of Mehlich-III compared to Mehlich-I as a soil test in Northeast Florida. **Farming System**, v. 1, n. 3, e100056, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100056>
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356p.
- SCHONINGER, E. L.; GATIBONI, L. C.; LINHARES, D. Método Mehlich 3 como substituinte ao HCl para extração de cobre e zinco em solos com alto teor de matéria orgânica do sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 42, n. 7, p. 1200-1203, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000700010>
- SILVA, F. C. da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- SILVA, M. A. G. da; MUNIZ, A. S.; NODA, A. Y.; MARCHETTI, M. E.; MATA, J. de D. V. da; LOURENTE, E. R. P. Metodologias e eficiência de extratores para zinco, cobre, ferro e manganês. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 537-545, 2009. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.736>
- SILVA, R. T. da; JESUS, W. A. de; SOARES, M. R. dos S.; BARROS, A. I.; WEBER, O. L. dos S. Efeito das doses de dejetos líquido de suínos nos atributos físicos, químicos e eletroquímicos em um Latossolo do Cerrado. **Química Nova**, v. 48, n. 1, e20250004, 2025. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20250004>
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574p.
- TIECHER, T. L.; CERETTA, C. A.; COMIN, J. J.; GIROTTO, E.; MIOTTO, A.; MORAES, M. P. de; BENEDET, L.; FERREIRA, P. A. A.; LORENZI, C. R.; COUTO, R. R.; BRUNETTO, G. Forms and accumulation of copper and zinc in a sandy typic hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep litter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 812-824, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300028>
- ZHANG, R.; LIAO, Z.; LIAN, W.; YUAN, H.; CHEN, Y.; WENG, L. Livestock manure fertilization as a 'source' or a 'sink' of soluble heavy metals in soil: Insights from geochemical modeling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 501, e140912, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140912>

Agradecimentos: À Associação dos Criadores de Suínos de Mato Grosso (ACRISMAT), pelo apoio institucional e logístico nas áreas comerciais; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas de estudo e auxílios à pesquisa; à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), pela infraestrutura laboratorial disponibilizada; e ao Grupo de Estudos de Resíduos e Matéria Orgânica do Solo (GERMOS-UFMT), pelo suporte técnico, pela colaboração e pelo apoio na condução das análises.

Contribuição dos autores: J.C.A.O.: conceituação, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, redação (versão original); J.B.S.: conceituação, aquisição de financiamento, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, administração ou supervisão, validação, redação (versão original), redação (revisão e edição); E.S.M.: redação (versão original), redação (revisão e edição); H.F.A.: redação (revisão e edição); R.V.R.: redação (revisão e edição); J.M.R.S.: redação (revisão e edição); J.E.S.C.: redação (revisão e edição); O.L.S.W.: conceituação, aquisição de financiamento, metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, administração ou supervisão, validação, redação (versão original), redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Disponibilidade de dados: Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis mediante solicitação fundamentada ao autor correspondente.

Conflito de Interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses. As entidades financiadoras não participaram do desenho do estudo, da coleta, análise ou interpretação dos dados, da redação do manuscrito ou da decisão de publicar os resultados.



Copyright: © 2026 pelos autores. Este artigo é de acesso aberto, distribuído sob os termos e condições da licença Creative Commons **Atribuição-NãoComercial (CC BY-NC)** (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).