

Alterações químicas, biológicas e mobilidade de metais pesados no solo tratado com lodo de curtume compostado e cultivado com milho

Chemical, biological changes and mobility of heavy metals in soil treated with composted tannery sludge and cultivated with corn

Erivan Araújo Felipe¹; Francisco Sérgio Ribeiro dos Santos²; Wemerson Leonardo Cruz da Silva³; Lourenço Oliveira dos Santos⁴; Mateus Guimarães da Silva⁵; Teogenes Senna de Oliveira⁶; Adriana de Oliveira Sousa Leite⁷; Maria Eugenia Ortiz Escobar⁸

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Ciências do Solo, Fortaleza/CE, Brasil. Email: erivanfeliipe@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9360-7845>

² Instituição Federal do Maranhão, Capus Codó, Codó/MA, Brasil. Email: sergio.c.pn20@hotmail.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4190-0318>

³ Universidade Federal da Paraíba, DSER, Areia/PB, Brasil. Email: wemersonleonardo39@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2069-9555>

⁴ Universidade Federal da Paraíba, DSER, Areia/PB, Brasil. Email: lourencoprofissional4@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2937-0375>

⁵ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Ciências do Solo, Fortaleza/CE, Brasil. Email: mateusgui14@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6534-4512>

⁶ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Ciência do Solo, Viçosa/MG, Brasil. Email: teo@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9904-6708>

⁷ Universidade de Fortaleza, UNIFOR, Fortaleza/CE, Brasil. Email: dricaoliver@unifor.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2787-4395>

⁸ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Ciências do Solo, Fortaleza/CE, Brasil. Email: mariaeugenia@ufc.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7530-3338>

Resumo: O aumento da geração de resíduos industriais, em especial o lodo de curtume, impõe desafios ambientais devido ao seu conteúdo de matéria orgânica e à presença de metais pesados. A compostagem desse resíduo tem sido apontada como alternativa capaz de reduzir riscos e ampliar seu potencial de uso agrícola. Nessa perspectiva, o estudo buscou avaliar de que modo o lodo de curtume compostado influencia os teores de metais pesados, os atributos químicos e microbiológicos do solo, além do desenvolvimento da cultura do milho e da dinâmica desses metais em diferentes frações do solo. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em vasos, sob delineamento inteiramente casualizado, utilizando seis doses de LCC (0 a 40 Mg ha⁻¹). As análises abrangeram parâmetros químicos e biológicos do solo, fracionamento de metais e biometria da planta. Observou-se que o LCC promoveu aumento do pH, da soma de bases, da matéria orgânica e da atividade microbiana, o que se refletiu em maior crescimento e acúmulo de fitomassa do milho. Apesar do acréscimo nos teores de metais, estes permaneceram abaixo dos níveis de risco e apresentaram baixa mobilidade, indicando viabilidade agrônômica do resíduo quando manejado com monitoramento adequado.

Palavras-chave: Resíduo industrial; Atributos do solo; Extração sequencial de metais pesados.

Abstract: The increase in industrial waste generation, especially tannery sludge, poses environmental challenges due to its organic matter content and the presence of heavy metals. Composting this waste has been pointed out as an alternative capable of reducing risks and expanding its potential for agricultural use. From this perspective, the study aimed to evaluate how composted tannery sludge (CTS) influences heavy metal levels, as well as the chemical and microbiological attributes of the soil, in addition to the development of maize (*Zea mays* L.) and the dynamics of these metals in different soil fractions. The experiment was conducted in a greenhouse, in pots, under a completely randomized design, using six doses of CTS (0 to 40 Mg ha⁻¹). The analyses covered soil chemical and biological parameters, metal fractionation, and plant biometrics. It was observed that CTS promoted an increase in pH, base saturation, organic matter, and microbial activity, which resulted in greater growth and biomass accumulation of maize. Despite the increase in metal levels, they remained below risk thresholds and showed low mobility, indicating the agronomic feasibility of the residue when managed with proper monitoring.

Keywords: Industrial waste; Soil attributes; Sequential extraction of heavy metals.

Recebido: 15/09/2025; Aceito: 24/02/2026; Publicado: 12/03/2026.

1. Introdução

O crescimento populacional e a intensificação das atividades urbanas e industriais têm ampliado a geração de resíduos sólidos, como lodo de esgoto, lixo urbano e resíduos de curtume. Esses materiais podem conter nutrientes úteis à agricultura, mas também contaminantes de elevada preocupação ambiental, como metais pesados e compostos orgânicos recalcitrantes (Hariyani *et al.*, 2025). A destinação inadequada desses resíduos compromete a qualidade do solo, da água e da biota, dificultando seu aproveitamento sustentável.

Entre os resíduos industriais, o lodo de curtume se destaca pelo elevado volume e pela complexidade de sua composição, resultante do uso de sais de cromo no processo de curtimento (Kong *et al.*, 2020; Misganaw; Akenaw; Getu, 2024). Esse resíduo é rico em matéria orgânica e nutrientes, mas apresenta teores significativos de metais pesados, especialmente cromo, que configuram tanto riscos ambientais quanto potencial de uso agrícola (Xu; Wu, 2022).

A compostagem tem sido apontada como alternativa promissora para a estabilização do lodo de curtume, pois promove a degradação da matéria orgânica, reduz patógenos e fitotoxicidade, e gera substâncias húmicas capazes de complexar metais pesados, diminuindo sua mobilidade e biodisponibilidade (Perdigão; Marques; Pereira, 2022).

Nos solos tropicais, marcados por acidez elevada, baixa saturação por bases e reduzido teor de matéria orgânica, a aplicação de resíduos compostados pode corrigir limitações químicas, aumentar a retenção de água e melhorar a estrutura do solo. Entretanto, o risco de acúmulo de metais pesados e sua possível entrada na cadeia trófica exigem monitoramento criterioso (Sousa *et al.*, 2022). Além disso, a adição de compostos orgânicos pode estimular a diversidade e atividade microbiana, mas a presença de metais pode alterar a resposta das comunidades do solo, dependendo da forma química e da dose aplicada (Guo; Liu; Wu, 2022).

O milho (*Zea mays* L.), cultura de elevada importância econômica e alta exigência nutricional, é sensível às alterações químicas e biológicas do solo, constituindo espécie indicadora adequada para avaliar efeitos agrônômicos e ambientais da aplicação de lodo compostado (Ademe; Guda; Lemma, 2020).

Partiu-se da hipótese de que a compostagem do lodo de curtume reduz a toxicidade dos metais pesados, melhora a fertilidade e a atividade microbiana do solo e favorece o desenvolvimento do milho. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação do lodo de curtume compostado sobre: (a) teores de metais pesados e atributos químicos e microbiológicos do solo; (b) desenvolvimento da cultura do milho; e (c) dinâmica dos metais pesados e suas interações com os atributos do solo.

2. Metodologia

O solo foi coletado em área de mata nativa da Fazenda Experimental Raposa, pertencente à Universidade Federal do Ceará, localizada no município de Maracanaú—CE (3°50'66" S; 38°38'38" W), classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2011).

Foram coletadas 16 subamostras deformadas na camada de 0–20 cm, utilizando trado holandês, as quais foram homogeneizadas para a obtenção de quatro amostras compostas. As análises físico-químicas do solo foram realizadas segundo a metodologia descrita pela EMBRAPA (2011), contemplando os seguintes atributos químicos: pH em água, condutividade elétrica, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), acidez potencial (H^+ + Al), alumínio trocável (Al^{3+}), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, saturação por alumínio, fósforo disponível, carbono orgânico, nitrogênio total, matéria orgânica e relação C/N. A caracterização física incluiu a determinação da granulometria (areia total, areia fina, silte e argila) e a classificação textural do solo (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo da área experimental da Fazenda Raposa na profundidade de 0-20 cm.

Características químicas		Características físicas (g kg^{-1})	
pH	4,70	Areia	461,00
CE (dS m^{-1})	0,24	Areia Fina	318,00
Ca^{2+} (cmolc dm^{-3})	0,90	Silte	143,00
Mg^{2+} (cmolc dm^{-3})	0,90	Argila	78,00
Na^+ (cmolc dm^{-3})	0,07	Argila natural	24,00

		Composição textural
K ⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,19	Franco arenoso
H + Al (cmolc dm ⁻³)	3,30	
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,40	
S (cmolc dm ⁻³)	2,10	
T (cmolc dm ⁻³)	5,40	
V(%)	39,00	
M(%)	40,00	
PST	1,00	
C (g kg ⁻¹)	2,88	
N (g kg ⁻¹)	0,27	
MO (g kg ⁻¹)	4,97	
C/N	11,00	
P (g kg ⁻¹)	4,00	

Fonte: Autores (2025).

2.1 Instalação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em duas etapas: (i) compostagem do lodo de curtume por 110 dias em sistema fechado e (ii) incorporação do composto ao solo e cultivo do milho por 60 dias. A pilha foi composta por lodo de curtume, esterco bovino e bagaço de cana, em proporção volumétrica de 1:1:3, respectivamente (Silva, 2012), previamente triturados para aumentar a área de ação microbiana. Os materiais foram acondicionados em tambores de 109 L com furos laterais para aeração e revolvidos semanalmente. Ao final, amostras de quatro pontos de cada pilha foram analisadas quanto aos atributos físico-químicos.

As parcelas consistiram em vasos de polietileno com 10 dm³ de solo, em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e quatro repetições (24 unidades). Os tratamentos foram: T0 = 0,0; T1 = 2,0; T2 = 5,0; T3 = 10,0; T4 = 20,0; e T5 = 40,0 Mg ha⁻¹ de LCC. O plantio ocorreu 10 dias após a incorporação do LCC, por semeadura direta de milho híbrido AG 1051 (4 sementes/vaso). Os vasos foram irrigados com água deionizada a 85% da capacidade de campo. Após a emergência, realizou-se o desbaste, mantendo uma plântula/vaso. Sessenta dias após a semeadura, no início da fase reprodutiva, as plantas foram coletadas e separadas em parte aérea e raízes.

2.2 Análise de metais pesados e dos atributos químicos do LCC do solo após a aplicação do LCC

A digestão pseudototal dos metais pesados foi realizada conforme o método 3051A (Florian; Barnes; Knapp, 1998), utilizando 0,5 g de solo utilizando 0,5 g de solo por amostra, analisada em quatro repetições analíticas (quadruplicata), bem como amostra de referência certificada (NIST SRM 2709). As amostras foram tratadas com 9 mL de HNO₃ e 3 mL de HCl concentrado em tubos de teflon, em forno micro-ondas fechado (1.000 W; pré-aquecimento 5 min; 175 ± 5 °C por 10 min). Os extratos foram resfriados, filtrados (faixa azul), aferidos a 50 mL com água ultrapura e armazenados em frascos plásticos.

O fracionamento químico dos metais seguiu o método proposto por Tessier, Campbell e Bisson (1979), obtendo-se as frações trocável, carbonática, oxidica e orgânica. A determinação dos Metais maganês(Mn), ferro (Fe), zinco (Zn) e cobre (Cu) foi realizada por espectrometria de emissão óptica com plasmas indutivamente acoplado (ICP-OES), enquanto cromo (Cr), chumbo (Pb) e níquel (Ni) foram determinados por espectrometria de absorção atômica (EAA). A utilização de duas técnicas instrumentais foi definida em função dos limites de detecção de cada método e das concentrações esperadas dos metais nas amostras.

As análises foram realizadas utilizando um espectrômetro ICP-OES modelo ICP-OES modelo 8300, da marca Perkin Elmer, e um espectrômetro de absorção atômica modelo Varian 220FS, da marca Varian, para a determinação de micronutrientes e metais, e um espectrômetro de absorção atômica modelo Agilent 240FS, da marca Agilent, para a determinação de K, Na, Ca, Al e Mg. As análises dos atributos químicos do solo, pH, condutividade elétrica, carbono

orgânico total, soma de bases, matéria orgânica, cálcio, magnésio, potássio, nitrogênio, fósforo e razão de adsorção de sódio, após a incorporação do lodo de curtume compostado, antes e após o cultivo do milho, foram realizadas conforme a metodologia descrita pela EMBRAPA (2011).

2.3 Análises da planta

Os dados biométricos da cultura do milho como altura e massa seca da parte aérea e da raiz foram obtidos após 60 dias da emergência das plantas (Figura A-D). Para tanto, as plantas foram cortadas ao nível do solo e, em seguida, lavadas em água corrente e enxaguadas com água destilada com o objetivo de evitar o desenvolvimento de agentes saprofíticos. Posteriormente, essas amostras foram colocadas em sacos de papel e então submetidas à secagem em estufa de circulação forçada com temperatura controlada (65 - 70 °C) até peso constante e, por ultimo, pesadas para obtenção da massa seca.

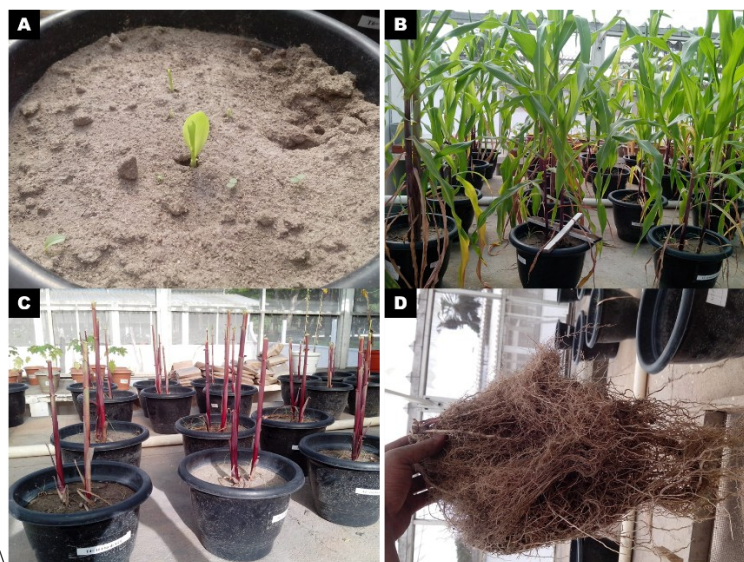


Figura 1 – Sequência do cultivo e do fracionamento das plantas de milho (Zea mays L.) para obtenção das diferentes partes vegetais. (A) Emergência das plântulas cinco dias após o plantio. (B) Plantas aos 30 dias de cultivo em vasos, no momento anterior às coletas. (C) Caules após a remoção das folhas. (D) Sistema radicular isolado após a separação do caule e das folhas.

Fonte: Autores (2025).

2.4 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à regressão para avaliar a influência das doses de LCC nos metais pesados, atributos químicos, biológicos e no crescimento do milho. A correlação de Pearson ($p < 0,05$) foi aplicada para verificar a adequação das variáveis à Análise Fatorial (AF). Em seguida, empregou-se AF por componentes principais, com dados normalizados (média = 0; variância = 1). Foram extraídos fatores com autovalores $> 1,0$ e rotação Varimax, considerando cargas fatoriais $\geq 0,60$ como significativas.

O banco de dados foi estruturado no Microsoft Access® (2024) e Excel® (2024), enquanto as análises de variância e multivariada foram realizadas no RStudio® (2025.05.1+513) e STATISTICA® (v.13.3.721) (Hilbe, 2007; Lee, 2021).

3. Resultados e discussão

3.1 Análise química do resíduo

Os resultados da análise química do lodo de curtume compostado aplicado ao solo são apresentados na Tabela 2 e correspondem à média $\pm$ desvio-padrão de quatro repetições analíticas (quadruplicata).

Os teores de Cr, Cu, Zn, Ni, Fe, Pb e Mn encontraram-se abaixo dos valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas (VRQs), caracterizando uma condição de não contaminação, conforme a Resolução CONAMA nº 420/2009. Nesse sentido, os metais presentes no resíduo não apresentaram níveis de toxicidade que inviabilizem seu uso agrícola, indicando que o lodo de curtume compostado pode ser uma alternativa para melhoria da fertilidade, da biota e da estrutura física do solo. Entretanto, recomenda-se cautela quanto a aplicações sucessivas do resíduo, uma vez que o uso contínuo pode promover o acúmulo gradual de metais no solo ao longo do tempo (Laik *et al.*, 2025).

Tabela 2 – Análise química do lodo de curtume (LC) e do lodo de curtume compostado (LCC) após 110 dias de compostagem. .

Parâmetros	Limite de quantificação	Resultados LC (mg kg ⁻¹)	Resultados LCC (mg kg ⁻¹)
Cálcio	0,1	1.203,5	1.305,5
COT	0,1	7.039,5	7.255,6
Chumbo	1,0	< 1	< 1
Cobre	1,0	3,0	2,0
Cromo	1,0	9,0	5,0
Ferro Solúvel	1,0	11,0	9,0
Fósforo	0,1	< 1	< 0,1
Magnésio	0,1	2.019,5	1.285,0
Manganês	1,0	4,0	3,0
Níquel	1,0	2,0	2,0
Nitrogênio	0,1	274,1	170,6
pH	0,1	7,2	6,8
Potássio	1,0	17,0	24,0
Zinco	1,0	29,0	31,0

COT – carbono orgânico total; LC – lodo de curtume; LCC – lodo de curtume compostado. Os valores correspondem à média ± desvio-padrão de quatro repetições analíticas (n = 4). Para a realização das análises foram seguidas as diretrizes gerais do “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 20th Edition.

Fonte: Autores (2025).

Altos teores de COT, N, P, Ca, Fe e Mg favoreceram a atividade microbiana, enquanto o pH próximo à neutralidade manteve os metais em formas estáveis e indisponíveis, condição essencial ao desenvolvimento do milho (Delibacak; Ongun, 2016). Após 60 dias da aplicação do LCC, observaram-se efeitos significativos do pH e da SB em função das doses (Tabela 3). A dose de 40 Mg ha⁻¹ apresentou os maiores valores, atribuídos à mineralização do carbono e produção de OH⁻, que elevou as concentrações de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ (Meena *et al.*, 2019). A dissolução de hidróxidos e carbonatos, oriundos do processo de curtimento, também contribuiu para o aumento do pH, reduzindo a atividade de H⁺ e elevando a SB e a CTC, o que limita a mobilidade e disponibilidade de metais (Berilli *et al.*, 2015; Araujo *et al.*, 2020; Delibacak; Ongun, 2016).

Tabela 3 – Atributos químicos do solo após 60 dias da aplicação de doses de lodo de curtume compostado (LCC). .

Doses lodo de curtume compostado (LCC)	pH	CE	SB	K	CTC	RAS	N	P	COT	MOS
.....Mg ha ⁻¹		(ds/m)	cmolcdm ⁻³						g kg ⁻¹	
o Mg ha ⁻¹	5,7b	0,5d	2,7de	0,07a	2,8a	0,59c	0,8c	3,7f	7,2e	12,4d
2 Mg ha ⁻¹	6,0bc	0,6cd	3,1cd	0,07a	2,9a	0,67bc	1,3b	5,0ef	9,0cd	15,6c
5 Mg ha ⁻¹	6,2ab	0,7c	2,9cd	0,06a	3,0a	0,7ab	1,4b	5,6e	8,9d	15,4c
10 Mg ha ⁻¹	6,2ab	0,6cd	3,2bc	0,07a	3,0a	0,74ab	1,5b	7,7d	10,2bc	17,6b
20 Mg ha ⁻¹	6,3ab	0,7c	3,5ab	0,07a	3,1a	0,76ab	1,6b	10,6c	10,3b	17,8b
40 Mg ha ⁻¹	6,5a	0,8b	3,9a	0,08a	3,2a	0,79a	2,4a	16,9b	12,4a	21,4a

Valores seguidos pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). pH em água; CE = condutividade elétrica ($dS\ m^{-1}$); SB = soma de bases ($cmolc\ dm^{-3}$); K = potássio trocável ($cmolc\ dm^{-3}$); CTC = capacidade de troca catiônica ($cmolc\ dm^{-3}$); RAS = razão de adsorção de sódio; N = nitrogênio total ($g\ kg^{-1}$); P = fósforo disponível ($g\ kg^{-1}$); COT = carbono orgânico total ($g\ kg^{-1}$); MOS = matéria orgânica do solo ($g\ kg^{-1}$).

Fonte: Autores (2025).

O LCC contribuiu para o aumento da MOS e do COT conforme o acréscimo das doses (Tabela 3), efeito atribuído à decomposição microbiana dos compostos orgânicos presentes no resíduo (Araujo *et al.*, 2020). A maior concentração de N foi observada na dose de $40\ Mg\ ha^{-1}$ (Tabela 3). O aumento do pH favoreceu o desenvolvimento de bactérias e fungos, intensificando a decomposição da matéria orgânica e a liberação de N (Sousa *et al.*, 2017). Além disso, a baixa relação C/N do resíduo facilitou a mineralização do N, tornando-o mais disponível à biomassa microbiana (Silva *et al.*, 2022).

A aplicação de LCC também elevou os teores de P, possivelmente pela mineralização da MO ou pelo efeito acumulativo das doses (Tabela 3). Contudo, esses valores ainda foram inferiores às concentrações adequadas para o desenvolvimento das culturas, corroborando estudos que apontam baixas concentrações de P no lodo de curtume e a necessidade de suplementação externa (Silva *et al.*, 2022).

Para o K, não houve incremento significativo (Tabela 3), devido às baixas concentrações no resíduo (Haroun; Idris; Omar, 2009) e à imobilização na biomassa microbiana, visto que esse elemento se restringe à fração orgânica viva e não integra compostos orgânicos estáveis (Novais *et al.*, 2007).

A aplicação do LCC promoveu um aumento gradual nos valores de RAS, especialmente nas maiores doses (Tabela 3); contudo, esses valores permaneceram baixos e dentro de faixas consideradas seguras para uso agrícola, não caracterizando risco imediato de sodicidade. A CE também apresentou elevação discreta com o aumento das doses, mantendo-se em níveis reduzidos. Ainda assim, recomenda-se monitoramento contínuo em aplicações sucessivas, a fim de evitar o acúmulo de sais no solo, conforme relatado em outros estudos (Bilal Hussain *et al.*, 2024; Sousa *et al.*, 2022).

3.2 Análise de metais pesados

O controle de qualidade das análises foi realizado utilizando a amostra de solo com valores certificados (NIST SRM 2709 San Joaquin soil) para metais pesados (Stahl *et al.*, 2016). Os valores de recuperação de metais pesados para a solubilização pseudototal das amostras variaram de 38 a 78% (Tabela 4), os quais se encontram dentro da faixa admissível para a maioria dos metais quando comparados com os valores recuperados e, sobretudo, quando comparados aos valores lixiviado, 64 a 90% (Paye *et al.*, 2010).

Tabela 4 – Faixa de concentração e teor médio de metais pesados certificados (NIST SRM 2709 San Joaquin soil) pela US Department of Commerce utilizados nas análises pelo método USEPA (3051 A).

Metal / Elemento	Valor determinado	Valor Certificado (NIST) ¹	Recuperação (determinado) ²	Recuperado por lixiviado ³	Recuperado base lixiviado ⁴
	 mg kg ⁻¹		%	%	%
Mn	419,70	538 ± 17,00	78	87	90
Cr	49,70	130 ± 4	38	61	62
Fe	21470,70	35000 ± 1100	61	86	71
Ni	50,40	88 ± 5,00	57	89	64
Pb	11,60	19,8 ± 0,5	59	69	84
Zn	78,70	106 ± 3,00	74	94	79
Cu	24,16	34,6 ± 0,7	70	92	76

(1) NIST: National Institute of Standards and Tecnology. (2) % Recuperação (determinado) = (valor determinado/valor certificado) × 100. (3) % Recuperação por lixiviado = (mediana lixiviado (NIST)/valor certificado) × 100. (4) % Recuperação (determinado) base lixiviado = (recuperação determinado/recuperação por lixiviado) × 100. ND = valores não determinados pelo NIST (2002).

Fonte: Autores (2025).

Na Figura 2 observam-se os efeitos das doses de LCC nos teores de metais pesados no solo após 60 dias. A regressão indicou efeito significativo do resíduo, com aumento de Cu ($8,0\text{--}16,3\text{ mg kg}^{-1}$) e Cr ($4,6\text{--}25,9\text{ mg kg}^{-1}$) na dose de 40 Mg ha^{-1} (Figura 1A). Esse acréscimo decorre dos sais de curtimento liberados na decomposição, embora a MO do resíduo possa imobilizar metais via complexos estáveis com OH^- e COOH^- ou organometálicos insolúveis, reduzindo mobilidade e fitotoxicidade (Gao *et al.*, 2023). pH e carbonatos elevados também restringem Cr, exceto em solos ricos em MnO_2 , onde pode ocorrer oxidação e aumento da mobilidade (Dhal *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2021).

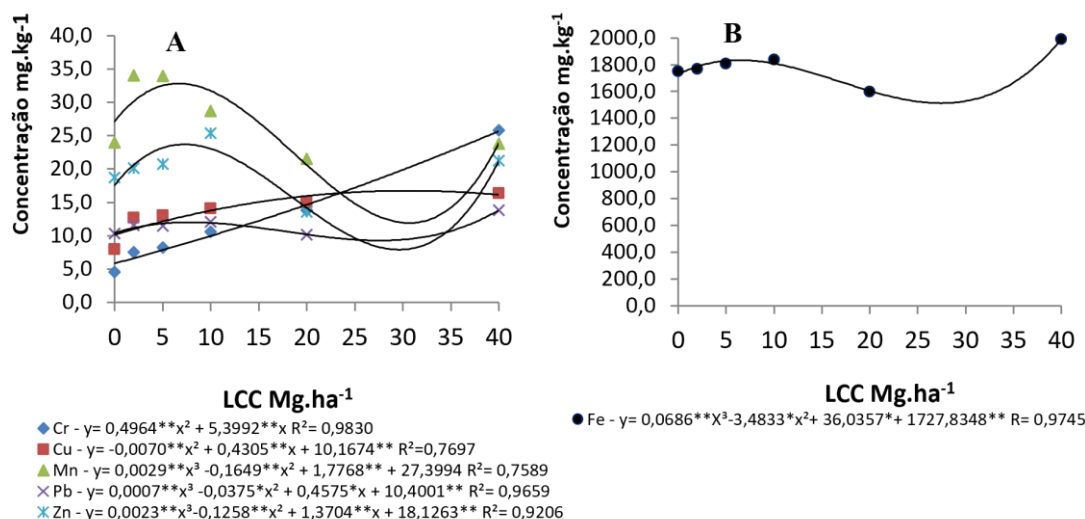
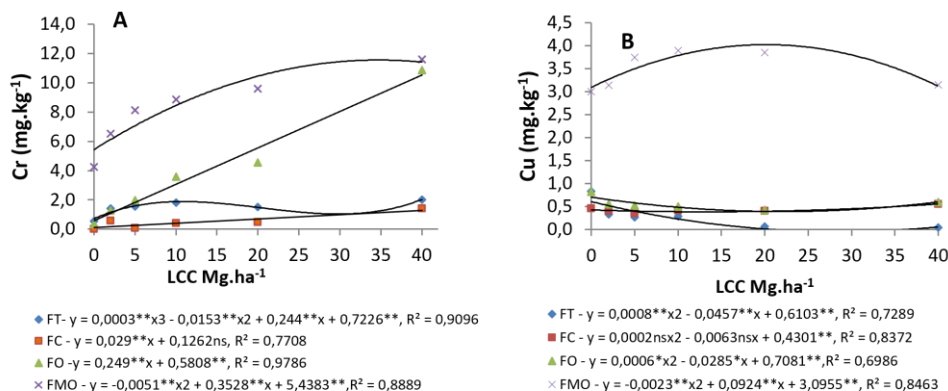


Figura 2 – Concentrações dos teores semitotais dos metais após 60 dias da aplicação de lodo de curtume compostado (LCC).

Fonte: Autores (2025).

O LCC elevou Mn, Zn e Pb nas doses de 2 e 5 Mg ha^{-1} , mas reduziu-os com 20 Mg ha^{-1} (Figura 1A). As variações estão ligadas à decomposição da MO, que aumenta disponibilidade, e à lixiviação, que reduz teores (Hashem *et al.*, 2021). Na dose de 40 Mg ha^{-1} , Mn, Zn, Pb (Figura 2A) e Fe (Figura 2B) aumentaram, provavelmente por estarem ligados à MO ativa/passiva, reduzindo disponibilidade na solução do solo (Gao *et al.*, 2023).

Após 60 dias, o fracionamento sequencial mostrou que Cr concentrou-se sobretudo na fração orgânica, mas cresceu também na oxidica com maior LCC (Figura 3A). Na dose de 40 Mg ha^{-1} , houve acréscimos médios de 60% (orgânica) e 90% (oxidica) frente ao controle, indicando complexação por ácidos orgânicos em pH $5,0\text{--}8,0$, mantendo o Cr estável e pouco solúvel (Fendorf, 1995; Xu *et al.*, 2020).



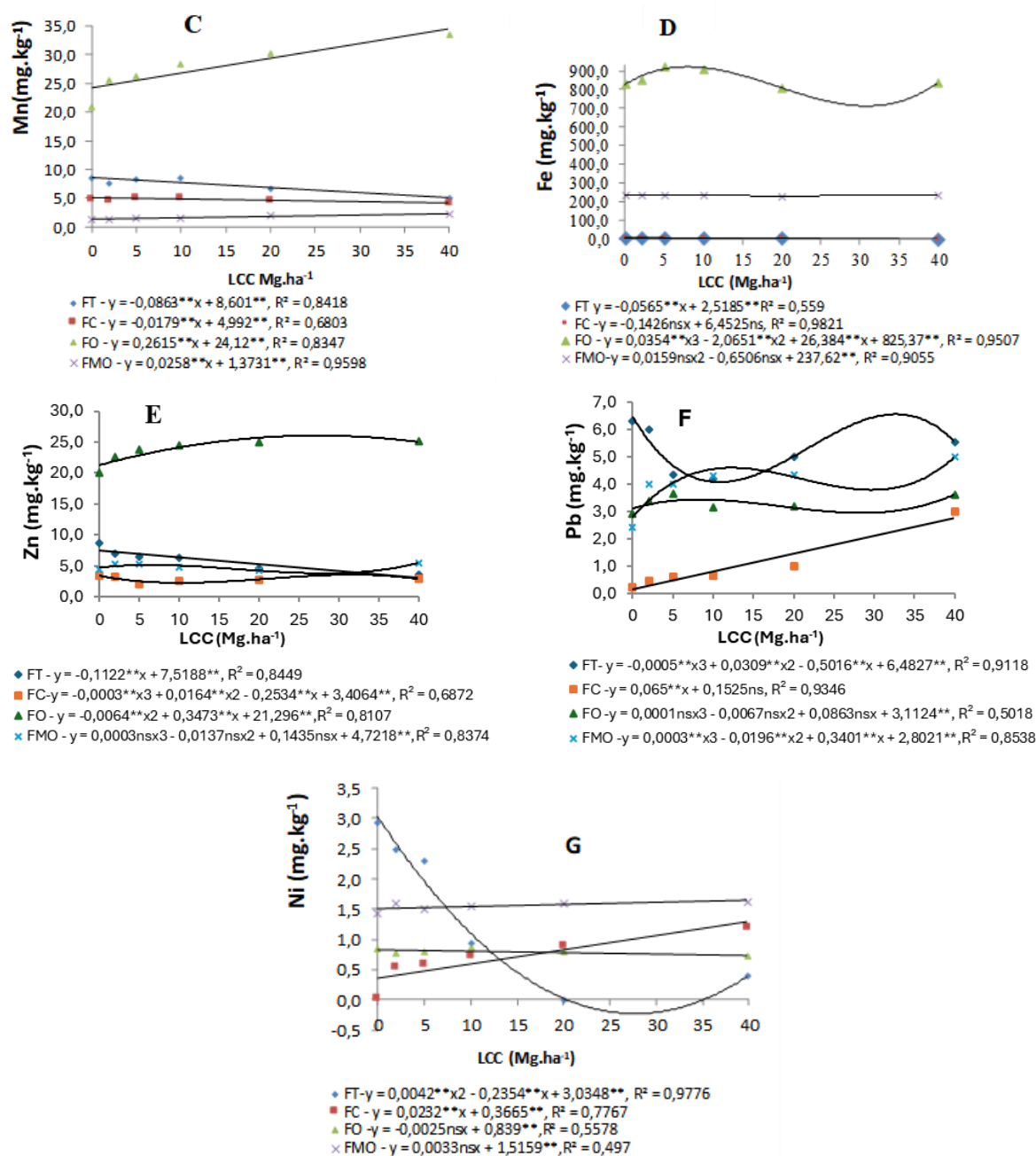


Figura 3 – Teor de Cr, Cu, Mn, Fe e Zn nas frações do solo: troçável (F1), carbonática (F2), ligado aos óxidos (F3) e ligado a matéria orgânica (F4) no solo.

Fonte: Autores (2025).

O Cu concentrou-se na fração orgânica (Figura 3B), evidenciando sua afinidade por substâncias húmicas (Dede *et al.*, 2023). pH baixo aumenta sua disponibilidade por maior ligação com OH⁻ e COO⁻, regulada por argila e CTC (Liu *et al.*, 2016). Baixa contribuição nas frações troçável, carbonática e oxidíca decorre da competição por sítios de adsorção e da forte ligação do Cu à MO durante a compostagem (Escobar *et al.*, 2024). Contudo, complexos solúveis podem aumentar a fração móvel dependendo da qualidade da MO (Arenas-Lago *et al.*, 2014).

Mn, Fe e Zn concentraram-se na fração oxidica (Figuras 3C–E), indicando baixa solubilidade e menor risco de toxidez (Dede *et al.*, 2023; CONAMA, 2009). Burt *et al.* (2003) também relataram que Mn e Fe derivam de minerais naturais, não apenas da atividade antrópica. Já as baixas concentrações nas frações trocável e orgânica refletem a instabilidade dos complexos formados. O Zn, por sua afinidade com Fe e Mn (Wydro *et al.*, 2021), concentrou-se nos óxidos. Entretanto, os valores ficaram abaixo dos limites de contaminação (20–110 mg kg⁻¹; média 90 mg kg⁻¹), visto que o LCC continha apenas 31 mg kg⁻¹ (Tabela 2).

O LCC também aumentou Pb e Ni na fração carbonática, mas pouco influenciou nas demais (Figuras 3F e G), exceto para Ni trocável, que reduziu até zero com 20 Mg ha⁻¹, devido ao aumento de pH e MO, intensificando a competição por sítios de adsorção (Santos *et al.*, 2014). Apesar disso, a presença de Pb e Ni em frações carbonáticas é preocupante, pois a acidificação pode aumentar sua mobilidade e toxidez. A baixa contribuição nas frações oxidica e orgânica deve-se à baixa afinidade desses metais (Kashem; Singh; Kawai, 2006).

3.3 Análise dos atributos biológicos do solo

Após 60 dias da aplicação dos tratamentos, observa-se, pela análise de regressão, que a adição do resíduo aumentou de forma significativa tanto com o carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) quanto a Respiração biológica do solo (RBS), contribuindo com o acréscimo da biota do solo (Figura 4).

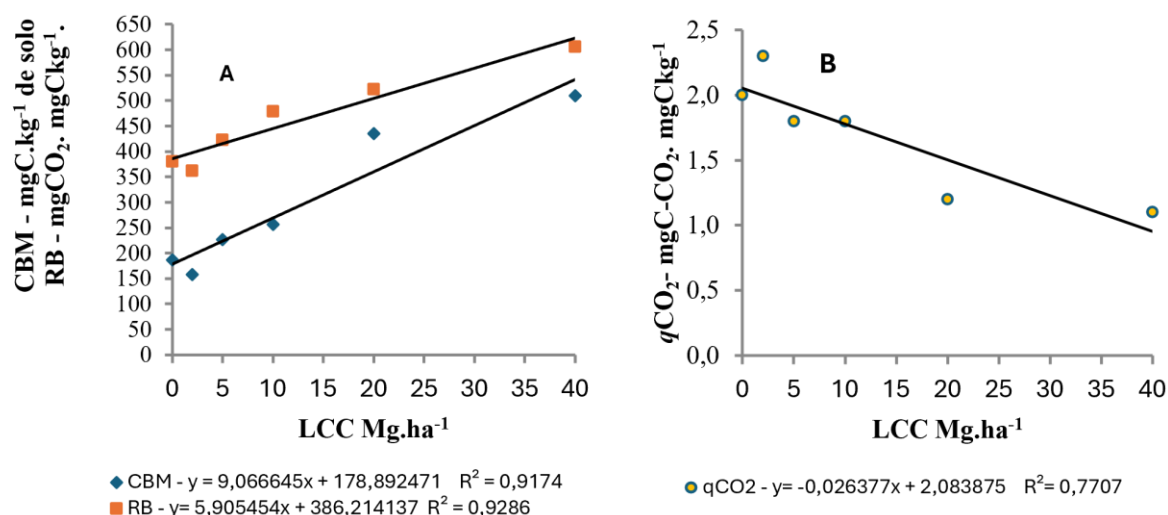


Figura 4 – Indicadores biológicos do solo após 60 dias da aplicação de lodo de curtume compostado (LCC) com as seguintes concentrações do resíduo 0, 2, 5, 10, 20 e 40 Mg.ha⁻¹. CBM - Carbono da biomassa microbiana do solo, RBS – Respiração biológica do solo e qCO_2 – Quociente metabólico do solo.

Fonte: Autores (2025).

Após a aplicação do LCC observou-se estímulo no crescimento da biomassa microbiana (Figura 4A), devido ao aporte de C e N prontamente disponíveis, melhorando as condições nutricionais dos microrganismos e favorecendo seu crescimento. Resultados semelhantes foram relatados por Lin *et al.* (2022), que associaram o aumento do CBM à mineralização da matéria orgânica e à persistência do resíduo no solo.

Na dose de 2 Mg ha⁻¹ houve redução do CBM e da RBS em relação ao controle, mas os valores aumentaram a partir de 5 Mg ha⁻¹ (Figura 4A). O acréscimo de MO favorece a complexação de metais, reduzindo sua disponibilidade e permitindo maior atividade microbiana na decomposição do resíduo (Souza; Miranda; Oliveira, 2009).

O quociente metabólico (qCO_2) decresceu com as doses crescentes de LCC (Figura 4B), indicando ausência de efeito adverso após 60 dias e manutenção da eficiência microbiana na ciclagem da MO. Segundo Lin *et al.* (2022), baixos valores de qCO_2 refletem menor estresse da comunidade microbiana e ausência de toxicidade.

3.4 Análise biométrica da planta de milho

As diferentes concentrações do LCC no solo contribuíram de forma significativa no desenvolvimento da cultura do milho, tanto na altura como na massa seca da parte aérea e da raiz (Figura 5A e 5B).

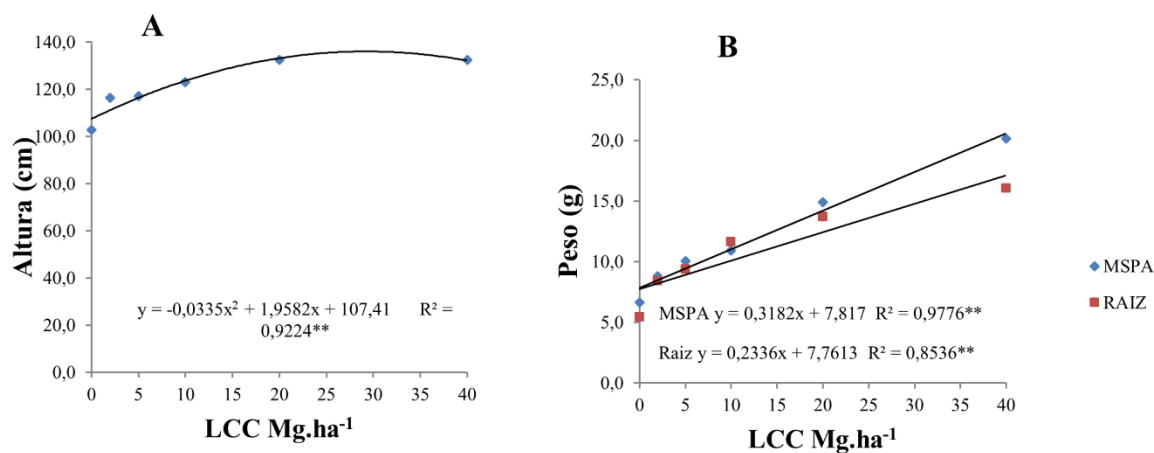


Figura 5 – Desenvolvimento da cultura do milho após 60 dias de aplicação de lodo de curtume compostado (LCC).
Fonte: Autores (2025).

A análise de regressão indicou que na média dos tratamentos com LCC, a altura do milho foi superior nos tratamentos de 20 Mg ha⁻¹ (132,4 cm) e 40 Mg ha⁻¹ (132,3 cm) (Figura 5), sendo estatisticamente semelhantes e superiores aos demais tratamentos, evidenciando o benefício da aplicação de altas doses de LCC para o desenvolvimento da cultura do milho.

Para as variáveis massa seca da parte aérea e raiz (Figura 5B), percebeu-se um aumento significativo com o aumento das doses do LCC, em que a dose de 40 Mg ha⁻¹ foi o promotor do maior valor para essas características. As melhores condições do solo, tanto nas características químicas quanto biológicas proporcionadas pelo acréscimo da matéria orgânica, propiciaram uma melhor ciclagem dos nutrientes e aumento da atividade dos microrganismos que a degradam, disponibilizando os elementos essenciais para o desenvolvimento do milho (Elsalam *et al.*, 2021). Portanto, o melhor desenvolvimento da cultura do milho pode ser atribuído à maior estabilização do N no composto ao promover uma lenta disponibilidade desse elemento, evitando sua perda e aumentando sua eficiência na absorção pela cultura, refletindo diretamente na maior produção de matéria seca (Sousa *et al.*, 2018).

Mesmo com o aumento dos metais pesados em função das crescentes doses de LCC, nenhum dos metais estudados mostrou-se tóxico e não influenciou na biométrica da planta de milho, encontrando-se dentro dos limites permitidos para uso na agricultura, sendo permitida a aplicação de forma aceitável e segura. Em vista disto, esses resultados mostram o potencial do resíduo como fertilizante para a cultura do milho, principalmente devido à presença do N, que é o principal elemento que participa da síntese de compostos orgânicos da estrutura vegetal e é responsável pelas características ligadas ao crescimento das plantas (Aline *et al.*, 2016).

3.5 Estatística multivariada

A adequação da matriz de dados para a análise multivariada foi avaliada a partir das correlações entre as variáveis, considerando atributos químicos do solo (pH, COT, MOS, SB, CTC, CE e RAS), teores de metais pesados (Cu, Cr, Mn, Fe, Zn e Pb) e atributos biológicos (RBS, BMS e qCO₂), obtidos nas amostras de solo após a aplicação do lodo de curtume compostado (LCC). As correlações foram determinadas pelo coeficiente de Pearson, aplicado a variáveis quantitativas contínuas com distribuição aproximadamente normal ($p < 0,05$), cuja matriz completa é apresentada como material suplementar.

Em seguida, os dados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA), utilizando o critério de autovalores maiores que 1 para a extração dos componentes. A PCA permitiu identificar três componentes principais, os quais explicaram conjuntamente 83,66% da variância total dos dados (Tabela 5), evidenciando padrões de associação entre os atributos químicos, biológicos e os teores de metais no solo.

Tabela 5 – Eixos fatoriais para atributos químicos e biológicos do solo e teores de metais pesados para as amostras de solos após aplicação do LCC com suas respectivas cargas fatoriais, autovalores, variância total e variância acumulada.

Variável	Componentes ⁽¹⁾		
	1	2	3
	Cargas fatoriais ⁽²⁾		
Cr	-0,51	0,82	-0,07
Cu	0,07	0,95	-0,12
Mn	0,13	-0,52	-0,72
Fe	-0,41	-0,41	-0,67
Pb	-0,56	0,17	-0,55
Zn	0,39	0,48	-0,63
pH	0,29	0,92	-0,16
COT	-0,95	0,03	-0,06
CTC	-0,45	-0,27	-0,42
MOS	-0,96	-0,03	-0,07
SB	-0,29	0,89	-0,09
CE	-0,84	-0,46	-0,08
RAS	-0,85	0,09	-0,11
RBS	-0,93	0,15	0,08
BMS	-0,93	0,13	0,29
qCO ₂	0,84	-0,12	-0,44
Autovalores	7,18	4,25	1,96
Variância total (%)	44,85	26,57	12,25
Variância acumulada (%)	44,85	71,42	83,66

(1) Eixos fatoriais pelo método Varimax. (2) Cargas fatoriais $\geq 0,60$ foram consideradas significantes para fins de interpretação.

Fonte: Autores (2025).

A matriz de componentes mostrou que o CP1 correlacionou positivamente MOS, COT, RBS, BMS, RAS e CE, e negativamente qCO₂, explicando 44,85% da variância. Essa relação indica que atributos microbiológicos são influenciados pela fertilidade do solo (Wang *et al.*, 2024). A adição de resíduo orgânico elevou a MO, estimulando a atividade microbiana, a liberação de nutrientes e a fertilidade (Rashid *et al.*, 2018). A baixa correlação com os metais deve-se à baixa concentração destes no LCC ou ao efeito de cátions trocáveis (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), que saturam cargas da MO e reduzem a adsorção de metais (Zanello; Melo; Wowk, 2009). A correlação negativa com qCO₂ reflete o aumento de RBS e BMS e os baixos teores de metais, resultando em menor estresse microbiano.

O CP2 agrupou Cu, Cr, pH e SB, responsáveis por 26,57% da variância. A associação está ligada ao efeito do pH na liberação de cargas e maior retenção de cátions metálicos. A elevação do pH aumenta a SB pela desprotonação de grupos ácidos da MO e dos OH⁻ dos argilominerais, formando compostos insolúveis com metais e favorecendo sua complexação (Kabata-Pendias, 2010). Assim, o LCC eleva MO e pH (Araujo *et al.*, 2020), reduzindo a disponibilidade de Cr e Cu no solo e sua absorção pelo milho.

O CP3 apresentou alta carga para Mn, Fe, Zn e Pb, explicando 12,25% da variância. Embora o aporte desses metais pelo LCC seja baixo, a correlação decorre da afinidade geoquímica e da associação com óxidos/hidróxidos de Fe e Mn (Goldschmidt, 1958; Dede *et al.*, 2023). Assim, Zn e Pb mobilizados pelo resíduo podem ser posteriormente incorporados a esses minerais. Em longo prazo, o uso contínuo de LCC pode resultar em acúmulo desses metais no solo.

4. Considerações finais

A adição do LCC no solo contribui para o aumento dos metais pesados no solo, porém, suas concentrações estão abaixo dos valores máximos permitidos para uso na agricultura, definidos pela CONAMA. Logo, pode-se utilizar na agricultura sem restrições em curto prazo, devendo-se tomar cuidados com sucessivas aplicações, devido à possibilidade de, a longo prazo, aumentar os teores de metais no solo.

Os metais Cr, Cu e Ni apresentaram, de modo geral, maior associação com a fração orgânica do solo, o que sugere menor biodisponibilidade imediata na solução do solo, em função da formação de complexos estáveis com a matéria orgânica. O Mn, o Fe e o Zn mostraram maior associação com a fração oxidada, comportamento amplamente relatado na literatura e relacionado à forte afinidade desses elementos por óxidos e hidróxidos de Fe e Mn, reduzindo sua mobilidade sob condições normais de pH.

Embora o chumbo (Pb) seja considerado geoquimicamente pouco móvel em solos, os resultados indicaram sua distribuição em múltiplas frações, incluindo a orgânica, oxidada e, em menor proporção, a fração trocável. Esse comportamento não caracteriza alta mobilidade intrínseca, mas reflete a sensibilidade do Pb às condições do solo, especialmente às variações de pH, teor de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, conforme observado em estudos semelhantes.

As correlações observadas entre os teores de metais e os atributos químicos e biológicos do solo apresentaram, em sua maioria, baixa magnitude, indicando ausência de relações lineares fortes entre essas variáveis nas condições avaliadas. Essa inferência foi baseada nos coeficientes de correlação e nos padrões identificados pela Análise de Componentes Principais. Ressalta-se que análises estatísticas mais robustas, como a análise de redundância (RDA), poderiam aprofundar a compreensão dessas relações em estudos futuros.

De forma integrada, os resultados não permitem classificar a aplicação do LCC de maneira dicotômica como “uso seguro” ou “uso arriscado”. O que se delineia é uma zona de viabilidade agrônômica, condicionada ao uso de doses adequadas, ao acompanhamento temporal dos atributos do solo e à interpretação conjunta dos aspectos químicos, biológicos e produtivos. Nessas condições, o LCC mostrou potencial para melhorar a qualidade do solo e o desenvolvimento do milho, sem evidências de toxicidade no período avaliado.

Referências

- ADEME, Y. A.; GUDA, S. T.; LEMMA, A. B. Contribution of organic inputs to maize productivity in the Eastern African region: A quantitative synthesis. *Agriculture and Natural Resources - formerly Kasetsart Journal (Natural Science)*, [s. l.], v. 054, n. 1, 2020.
- AHMED, M. J.; TAHER, M. A.; REZA, M. A. A. Solid Waste Generation, Composition and Potentiality of Waste-to-Resource Recovery in Sylhet City Corporation, Bangladesh. *Green Building & Construction Economics*, [s. l.], p. 306–322, 2023.
- ALINE, S. D. L. R. *et al.* The use of tannery sludge vermicomposting in corn crop irrigated with sewage treated wastewater. *African Journal of Agricultural Research*, [s. l.], v. 11, n. 33, p. 3162–3168, 2016.
- ALLUÉ, J. *et al.* Fractionation of chromium in tannery sludge-amended soil and its availability to fenugreek plants. *Journal of Soils and Sediments*, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 697–702, 2013.
- ARAUJO, A. S. F. *et al.* Long-term effect of composted tannery sludge on soil chemical and biological parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], v. 27, n. 33, p. 41885–41892, 2020.
- ARENAS-LAGO, D. *et al.* Sequential extraction of heavy metals in soils from a copper mine: Distribution in geochemical fractions. *Geoderma*, [s. l.], v. 230–231, p. 108–118, 2014.
- BERILLI, S. S. *et al.* Chromium levels in conilon coffee seedlings developed in substrate with tannery sludge as alternative manure. *Coffee Science*, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 320–328, 2015.
- BILAL HUSSAIN, M. *et al.* Vanillic acid alleviates chromium toxicity in spinach (*Spinacia oleracea* L.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants irrigated with different levels of tannery wastewater. *Pakistan Journal of Botany*, [s. l.], v. 56, n. 5, 2024.

- BURT, R. *et al.* Major and Trace Elements of Selected Pedons in the USA. *Journal of Environmental Quality*, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 2109–2121, 2003.
- CONAMA, C. N. D. M. A. *Resolução no 420/2009, de 28 dezembro de 2009*. 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acrs.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.
- DA SILVA, W. R. *et al.* The Stabilization Method of Sewage Sludge Affects Soil Microbial Attributes and Boosts Soil P Content and Maize Yield in a Sludge-Amended Soil in the Field. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 1267–1276, 2022.
- DE SOUSA, R. S. *et al.* Time-dependent effect of composted tannery sludge on the chemical and microbial properties of soil. *Ecotoxicology*, [s. l.], v. 26, n. 10, p. 1366–1377, 2017.
- DEDE, G. *et al.* Investigation of heavy metal and micro-macro element speciation in biomass ash enriched sewage sludge compost. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 344, p. 118330, 2023.
- DELIBACAK, S.; ONGUN, A. R. Influence of treated sewage sludge applications on corn and succeeding wheat yield and on some properties of sandy clay soil. *Turkish Journal of Field Crops*, [s. l.], v. 21, n. 1, 2016.
- DHAL, B. *et al.* Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, [s. l.], v. 250–251, p. 272–291, 2013.
- ELSALAM, H. E. A. *et al.* Effect of Sewage Sludge Compost Usage on Corn and Faba Bean Growth, Carbon and Nitrogen Forms in Plants and Soil. *Agronomy*, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 628, 2021.
- EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 2011.
- ESCOBAR, M. *et al.* Effect of thermal treatment of illite on the bioavailability of copper and zinc in the aerobic composting of pig manure with corn straw. *Frontiers in Microbiology*, [s. l.], v. 15, p. 1411251, 2024..
- FENDORF, S. E. Surface reactions of chromium in soils and waters. *Geoderma*, v. 67, n. 1-2, p. 55-71, 1995.
- FLORIAN, D.; BARNES, R. M.; KNAPP, G. Comparison of microwave-assisted acid leaching techniques for the determination of heavy metals in sediments, soils, and sludges. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, [s. l.], v. 362, n. 7, p. 558–565, 1998.
- GAO, J. *et al.* Organic amendments for in situ immobilization of heavy metals in soil: A review. *Chemosphere*, [s. l.], v. 335, p. 139088, 2023.
- GOLDSCHMIDT, V. M. *Geochemistry*. London: Oxford University Press, 1958.
- GUO, H.; LIU, H.; WU, S. Immobilization pathways of heavy metals in composting: Interactions of microbial community and functional gene under varying C/N ratios and bulking agents. *Journal of Hazardous Materials*, [s. l.], v. 426, p. 128103, 2022.
- HARIYANI, D. *et al.* A literature review on waste management treatment and control techniques. *Sustainable Futures*, [s. l.], v. 9, p. 100728, 2025.
- HAROUN, M.; IDRIS, A.; OMAR, S. Analysis of heavy metals during composting of the tannery sludge using physicochemical and spectroscopic techniques. *Journal of Hazardous Materials*, [s. l.], v. 165, n. 1, p. 111–119, 2009.
- HASHEM, Md. A. *et al.* Tannery Liming Sludge in Compost Production: Sustainable Waste Management. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 9305-9314, 2023.
- HILBE, J. M. *Statistica 7. The American Statistician*, [s. l.], v. 61, p. 91–94, 2007.
- KABATA-PENDIAS, A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4. ed. Florida: Boca Raton, CRC Press, 2010.

- KASHEM, M. A.; SINGH, B. R.; KAWAI, S. Mobility and distribution of cadmium, nickel and zinc in contaminated soil profiles from Bangladesh. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, [s. l.], v. 77, n. 2, p. 187–198, 2006.
- KONG, X. *et al.* Leaching Behaviors of Chromium(III) and Ammonium-Nitrogen from a Tannery Sludge in North China: Comparison of Batch and Column Investigations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [s. l.], v. 17, n. 16, p. 6003, 2020.
- LAIK, R. *et al.* Enhancing Soil Health in Rice Cultivation: Optimized Zn Application and Crop Residue Management in Calcareous Soils. *Sustainability*, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 489, 2025.
- LEE, M. Data analysis with RStudio: An easygoing introduction by FranzKronthaler and SilkeZöllnerBerlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, DE, 2021. pp. 131. *Biometrics*, [s. l.], v. 77, n. 4, p. 1502–1503, 2021.
- LIN, Z. *et al.* Effects on soil nitrogen and plant production from land applying three types of biosolids to an agricultural field for three consecutive years. *Soil and Tillage Research*, [s. l.], v. 223, p. 105458, 2022.
- LIU, Z. *et al.* The effect of municipal sludge compost on the mobility and bioavailability of Cd in a sierozem-wheat system in an arid region northwest of China. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], v. 23, n. 20, p. 20232–20242, 2016.
- MEENA, M. D. *et al.* Municipal solid waste (MSW): Strategies to improve salt affected soil sustainability: A review. *Waste Management*, [s. l.], v. 84, p. 38–53, 2019.
- MISGANAW, A.; AKENAW, B.; GETU, S. Determination of the level of chromium (III) and comparison of chemical precipitating agents to recover and reuse it from tannery waste water. *Desalination and Water Treatment*, [s. l.], v. 317, p. 100150, 2024.
- NOVAIS, R. F. *et al.* *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2007.
- PAYE, H. de S. *et al.* Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], v. 34, p. 2041-2051, 2010.
- PERDIGÃO, A.; MARQUES, F.; PEREIRA, J. L. S. Effect of Different Tannery Sludge Composts on the Production of Ryegrass: A Pot Experiment. *The Open Agriculture Journal*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. e187433152207270, 2022.
- RASHID, I. *et al.* Effect of humic and fulvic acid transformation on cadmium availability to wheat cultivars in sewage sludge amended soil. *Environmental Science and Pollution Research*, [s. l.], v. 25, n. 16, p. 16071–16079, 2018.
- SANTOS, J. L. *et al.* Chromium, Cadmium, Nickel, and Lead in a Tropical Soil after 3 Years of Consecutive Applications of Composted Tannery Sludge. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, [s. l.], v. 45, n. 12, p. 1658-1666, 2014..
- SILVA, M. D. M. *Atributos biológicos de neossolo e produtividade do feijão caupi após três anos de aplicações consecutivas de lodo de curtume compostado*. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Piauí, Teresina-PI, 2012.
- SOUSA, A. E. C. *et al.* Produtividade do meloeiro sob lâmina de irrigação e adubação potássica. *Engenharia Agrícola*, [s. l.], v. 30, p. 271-278, 2010.
- SOUSA, R. S. D. *et al.* Chromium accumulation in maize and cowpea after successive applications of composted tannery sludge. *Acta Scientiarum. Agronomy*, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 35361, 2018.
- SOUSA, R. S. de *et al.* Physical soil properties after seven years of composted tannery-sludge application. *Acta Scientiarum. Agronomy*, [s. l.], v. 45, p. e60748, 2022.
- SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F., *et al.* (Org.) *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

-
- STAHL, M. O. *et al.* River bank geomorphology controls groundwater arsenic concentrations in aquifers adjacent to the Red River, Hanoi Vietnam. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 52, n. 8, p. 6321–6334, 2016.
- TESSIER, A.; CAMPBELL, P. G. C.; BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, [s. l.], v. 51, n. 7, p. 844–851, 1979.
- WANG, D. *et al.* Remediation of Cr(VI)-contaminated soil using combined chemical leaching and reduction techniques based on hexavalent chromium speciation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, [s. l.], v. 208, p. 111734, 2021.
- WANG, L. *et al.* Long-term organic fertilization reshapes the communities of bacteria and fungi and enhances the activities of C- and P-cycling enzymes in calcareous alluvial soil. *Applied Soil Ecology*, [s. l.], v. 194, p. 105204, 2024.
- WAQAS, M. *et al.* Composting processes for agricultural waste management: a comprehensive review. *Processes*, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 731, 2023.
- WYDRO, U. *et al.* Heavy Metals Behavior in Soil/Plant System after Sewage Sludge Application. *Energies*, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1584, 2021.
- XU, K.; WU, C. S. Research Progress on the Land Application of Tannery Sludge. *Journal of Environmental Informatics Letters*, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 12–19, 2022.
- XU, T. *et al.* Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium(III). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, [s. l.], v. 195, p. 110459, 2020.
- ZANELLO, S.; MELO, V. D. F.; WOWK, G. I. T. H. Mineralogia e teores de cromo, níquel, cobre, zinco e chumbo nos solos no entorno do aterro sanitário da Caximba em Curitiba-PR. *Scientia Agraria*, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 051, 2009.