

BIODISPONIBILIDADE DE FERRO EM SOLO DEGRADADO TRATADO COM BIOCARVÃO OBTIDO POR CO-PIRÓLISE

John Lenon Vasconcelos Fonteles¹, José Lucas Martins Melo², Francisca Gleiciane da Silva³,
Rafaela Batista Magalhães³, Rafael Santiago da Costa⁴, Mirian Cristina Gomes Costa⁵

RESUMO: O biocarvão pode melhorar as propriedades físico-químicas de solos degradados. Dentre as alterações químicas, ele pode afetar significativamente o pH, o que está relacionado com biodisponibilidade de ferro (Fe) no solo. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de doses de biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto e poda de cajueiro (B-LP), o efeito de doses somente de lodo de esgoto (LE) e da matéria prima do biocarvão: mistura de LE e resíduo de poda de cajueiro (LP), na biodisponibilidade de Fe. O solo utilizado foi proveniente do Núcleo de Desertificação de Irauçuba (CE), que apresenta condições de degradação decorrente do superpastejo. O B-LP foi produzido por pirólise a 500 °C na proporção 1:1 (g/g). O delineamento aplicado foi o inteiramente aleatorizado, em fatorial 3 x 4 com quatro repetições e um controle. A biodisponibilidade de Fe em B-LP, LE e LP foram estatisticamente iguais ao controle, com B-LP apresentando a menor biodisponibilidade. Os valores de pH do solo para LE e LP foram estatisticamente inferiores ao B-LP. A aplicação de LE e LP aumentaram o Fe biodisponível ($\cong 22,6 \text{ mg kg}^{-1}$) e B-LP apresentou menor quantidade de Fe biodisponível. Portanto, a incorporação de B-LP diminuiu a biodisponibilidade de Fe para plantas.

PALAVRAS-CHAVE: lodo de esgoto, condicionador de solo, manejo sustentável do solo.

IRON BIOAVAILABILITY IN DEGRADED SOIL AMENDED WITH BIOCHAR OBTAINED BY CO-PYROLYSIS

ABSTRACT: Biochar can improve the physico-chemical properties of degraded soils. Among the chemical changes, it can significantly affect soil pH, which is closely related to the

¹ Doutorando, Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, CE, fone: +55 (85) 999699008, email: lenonce@gmail.com.

² Doutorando, Departamento de Ciência do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

³ Pós-Doutoranda, Departamento de Ciência do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

⁴ Doutor, Cagece, Fortaleza, CE.

⁵ Professora Doutora, Departamento de Ciência do Solo, UFC, Fortaleza, CE.

bioavailability of iron (Fe) in soil. The objective of this study was to evaluate the effect of different doses of biochar produced from sewage sludge and cashew pruning residues (B-LP), the effect of sewage sludge alone (LE), and the biochar feedstock—i.e., the mixture of LE and cashew pruning residue (LP)—on Fe bioavailability. The soil used was collected from the Desertification Nucleus of Irauçuba (CE), a region characterized by degradation caused by overgrazing. The B-LP was produced by pyrolysis at 500 °C using a 1:1 (g/g) ratio. The experimental design was completely randomized in a 3 × 4 factorial scheme with four replicates and one control treatment. Fe bioavailability in the B-LP, LE, and LP treatments was statistically similar to the control, with B-LP showing the lowest bioavailability. Soil pH values in the LE and LP treatments were statistically lower than those in B-LP. The application of LE and LP increased bioavailable Fe (~22.6 mg kg⁻¹), while B-LP resulted in a lower amount of bioavailable Fe. Therefore, the incorporation of B-LP reduced Fe bioavailability to plants.

KEYWORDS: sewage sludge, soil conditioner, sustainable soil management.

INTRODUÇÃO

O ferro (Fe) é um nutriente essencial para vários processos fundamentais nas plantas (Liang, 2022; Murgia et al., 2022). Contudo, em altas concentrações no solo ele pode ocasionar redução no crescimento e afetar o desenvolvimento de plantas (Li et al., 2023). Dentre os fatores que influenciam a biodisponibilidade de Fe do solo, destaca-se o pH. Condições alcalinas estão relacionadas na presença de Fe na sua forma reduzida (Paper et al., 2021).

A degradação do solo causa perdas econômicas e ambientais significativas em razão a diminuição dos serviços ecossistêmicos (LI et al., 2025), como a redução da matéria orgânica, fertilidade e desequilíbrio dos nutrientes, como o Fe; além da acidificação do solo (Jin et al., 2022).

Atualmente uma estratégia que sido utilizada para recuperar a qualidade de solos degradados, é a aplicação de condicionadores como biocarvão – material carbonáceo obtido por pirólise ou co-pirólise sob elevadas temperaturas (400–1200 °C) na ausência de oxigênio. Na co-pirólise duas ou mais biomassas são utilizadas com a finalidade de produzir um biocarvão de melhor qualidade que o obtido via pirolise tradicional (Rathnayake et al., 2022)

No solo, o biocarvão pode imobilizar elementos potencialmente tóxicos e modificar a biodisponibilidade de alguns micronutrientes, como o Fe (Xu et al., 2022). Nesse contexto, a hipótese testada é de que a aplicação de doses de biocarvão reduz a biodisponibilidade de Fe

do solo, e esse efeito é maior em comparação com as biomassas não carbonizadas. Com isso, objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes doses de biocarvão obtido da co-pirolise de lodo de esgoto e poda de cajueiro, na biodisponibilidade de Fe, e comparação com o efeito da aplicação de doses somente de lodo de esgoto (LE); e da biomassa precursora do biocarvão: mistura de LE e resíduo de poda de cajueiro (LP).

MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado foi classificado como Planossolo Nátrico, proveniente do Núcleo de Desertificação de Irauçuba (CE), que apresenta condições de degradação causada pela pecuária extensiva e superpastejo. A caracterização do solo está apresentada no estudo realizado por Barbosa et al. (2024).

O LE para produzir o biocarvão foi proveniente de reator do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Alameda das Palmeiras, pertencente à Cagece (Companhia de Água e Esgoto do Ceará). O B-LP usado foi produzido por pirólise a 500 °C na proporção 1:1 (massa/massa) da mistura entre LE e resíduo de poda, mesma proporção foi utilizada para LP. Plantas de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth) - espécie florestal nativa da Caatinga, foi escolhida como planta indicadora no estudo.

A caracterização do B-LP foi apresentada por Barbosa et al. (2024), sendo utilizados os mesmos métodos de determinação de Fe e pH do solo. O delineamento aplicado foi o inteiramente aleatorizado, em esquema fatorial 3 x 4 com quatro repetições e um tratamento controle. O primeiro fator de tratamento é constituído pelos resíduos orgânicos, B-LP, LE e LP. O segundo fator de tratamento foi formado por cinco doses dos resíduos orgânicos (RO), definidas com base nas doses de 0, 5, 10, 20 e 40 Mg ha⁻¹ de B-LP. As doses foram calculadas de modo a ofertar as mesmas quantidades de P proporcionadas pelas doses de B-LP.

Os dados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade, as médias comparadas pelo teste de Tukey (para o contraste RO) e Dunnet (para contraste entre RO e controle), e regressão univariada para o efeito de doses. O software R foi utilizado em sua interface de desenvolvimento interativa (IDE) RStudio, com pacote ExpDes.pt.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos não diferiam estatisticamente em relação controle, contudo o tratamento B-LP apresentou menor biodisponibilidade de Fe (Figura 1B). As regressões para LE e LP não se ajustaram aos modelos matemáticos testados. O tratamento B-LP, ajustou-se ao modelo quadrático com ponto de mínimo próximo a maior dose aplicada (40 Mg ha⁻¹), resultado na menor disponibilidade de Fe (7,05 mg kg⁻¹).

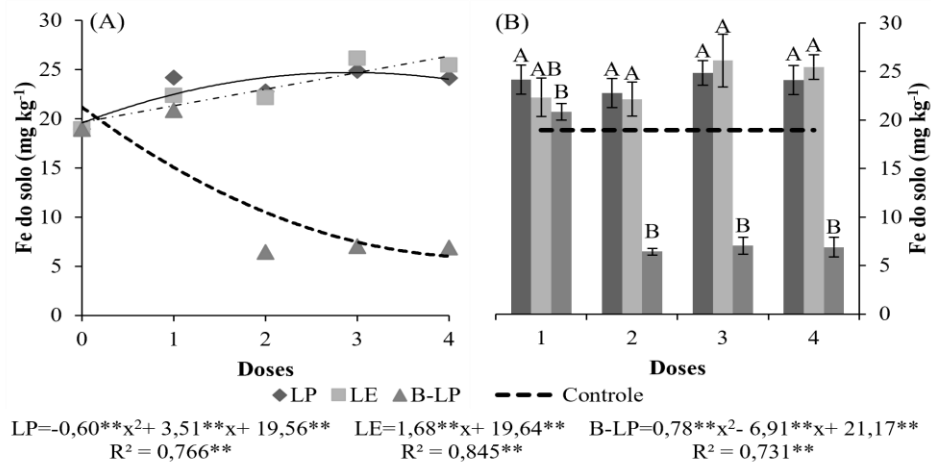


Figura 1- pH do solo (mg kg⁻¹) em função da interação dos resíduos orgânicos e doses aplicadas. (A) Regressão do Fe do solo com interação resíduos dentro das doses. (B) Teste de média Tukey da interação de doses dentro dos resíduos no Fe do solo.

Os valores da regressão do pH para os tratamentos LE e LP foram estaticamente inferiores (pH < 4,4) ao B-LP (pH > 4,8) (figura 2). O tratamento LP teve comportamento linear decrescente com o aumento das doses aplicadas, enquanto o tratamento LE teve comportamento quadrático, ponto de mínimo em 45,2 Mg ha⁻¹ de LE. O B-LP apresentou comportamento linear crescente em com aumento do pH a medida que as doses dos RO aumentaram.

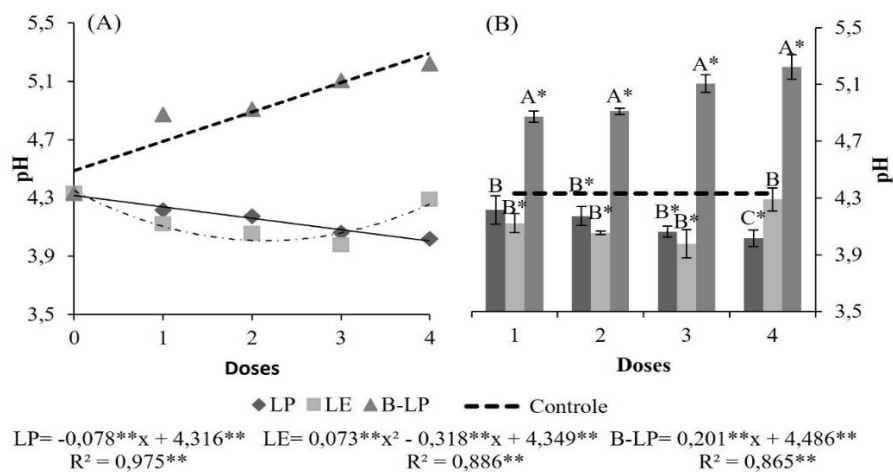


Figura 2- pH do solo em função da interação dos resíduos orgânicos e doses aplicadas. (A) Regressão do pH do solo com interação resíduos dentro das doses. (B) Teste de média Tukey e Dunnnett da interação de doses dentro dos resíduos no pH do solo.

As doses de LE e LP apresentaram maiores valores de Fe disponível ($\cong 22,6 \text{ mg kg}^{-1}$), concomitantemente possuem os menores valores de pH ($\text{pH} < 4,4$). Esse resultado é indicativo de que a incorporação de resíduos orgânicos com características ácidas, como LE ($\text{pH}=6,3$) e LP ($\text{pH}=4,5$), podem aumentar a geração de cargas positivas (Shan et al., 2021) e a disponibilidade do Fe, que em elevadas teores no solo podem se tornar tóxicos para plantas (Liang, 2022). No B-LP, o teor Fe disponível foi menor na dose 2 (10 Mg ha^{-1}), equivalente a $\cong 6,8 \text{ mg kg}^{-1}$, ao mesmo tempo que apresentou valores de pH crescentes ($\text{pH}>4,9$). O B-LP além de maior $\text{pH}=9,1$, ele apresenta maior quantidade de grupos funcionais orgânicos em sua superfície, o que pode promover a desprotonação, e geração de cargas negativas no solo, responsáveis por a disponibilidade de Fe; o que, com aplicações a longo prazo pode causar deficiência de Fe no solo (Xu et al., 2022).

CONCLUSÕES

O biocarvão de lodo de esgoto e resíduo de poda de cajueiro aumentou o pH do solo, consequentemente diminuiu a biodisponibilidade de Fe, nas doses a partir de 10 Mg ha^{-1} . O lodo de esgoto e a mistura (lodo e poda de cajueiro) aumentaram a biodisponibilidade de Fe no solo comparado ao biocarvão.

AGRADECIMENTOS

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (processo 0122017200); a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) (processo 06670855/2021); à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro (Código de Financiamento 001) processos 88887.753195/2022-00 e 88887.964797/2024-00; ao projeto Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical – INCTAGriS (CNPq/FUNCAP/CAPES), processos 406570/2022-1 (CNPq) e INCT-35960-62747.65.95/51 (FUNCAP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, F. L. A., Santos, J. M. R., Mota, J. C. A., Costa, M. C. G., Araujo, A. S. F., Garcia, K. G. V., Almeida, M. S., Nascimento, Í. V., Medeiros, E. V., Ferreira, O. P., Souza Filho, A. G., Fregolente, L. G., Sousa, H. H. F., Borges, W. L., & Pereira, A. P. de A. (2024). Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil. **Scientific Reports**, 14(1), 26065. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77368-9>
- Jin, Q., Wang, C., Sardans, J., Vancov, T., Fang, Y., Wu, L., Huang, X., Gargallo-Garriga, A., Peñuelas, J., & Wang, W. (2022). **Effect of soil degradation on the carbon concentration and retention of nitrogen and phosphorus across Chinese rice paddy fields**. *CATENA*, 209, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105810>
- Li, M., Watanabe, S., Gao, F., & Dubos, C. (2023). Iron Nutrition in Plants: Towards a New Paradigm? **Plants**, 12(2), 384. <https://doi.org/10.3390/plants12020384>
- LI, R., HU, W., JIA, Z., LIU, H., ZHANG, C., HUANG, B., YANG, S., ZHAO, Y., ZHAO, Y., SHUKLA, M. K., & TABOADA, M. A. (2025). Soil degradation: A global threat to sustainable use of black soils. **Pedosphere**, 35(1), 264–279. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.06.011>
- Liang, G. (2022). Iron uptake, signaling, and sensing in plants. **Plant Communications**, 3(5), 100349. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100349>
- Murgia, I., Marzorati, F., Vigani, G., & Morandini, P. (2022). Plant iron nutrition: the long road from soil to seeds. **Journal of Experimental Botany**, 73(6), 1809–1824. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab531>
- Paper, J. M., Flynn, T. M., Boyanov, M. I., Kemner, K. M., Haller, B. R., Crank, K., Lower, A., Jin, Q., & Kirk, M. F. (2021). Influences of pH and substrate supply on the ratio of iron to sulfate reduction. **Geobiology**, 19(4), 405–420. <https://doi.org/10.1111/gbi.12444>
- Rathnayake, N., Patel, S., Halder, P., Aktar, S., Pazferreiro, J., Sharma, A., Surapaneni, A., & Shah, K. (2022). Co-pyrolysis of biosolids with alum sludge: Effect of temperature and mixing ratio on product properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 163, 105488. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105488>

Shan, Y., Lv, M., Zuo, W., Tang, Z., Ding, C., Yu, Z., Shen, Z., Gu, C., & Bai, Y. (2021). Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. **Scientific Reports**, 11(1), 1402. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>

Xu, Q., Xu, Q., Zhu, H., Li, H., Yin, W., Feng, K., Wang, S., & Wang, X. (2022). Does biochar application in heavy metal-contaminated soils affect soil micronutrient dynamics? **Chemosphere**, 290, 133349. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133349>