XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/83

Efeito do envelhecimento nas propriedades físico-químicas de solo e mistura solo-biocarvão (2,5%) visando aplicação geotécnica

Jéssica Pelinsom Marques
Professora Doutora, Departamento de Geologia Ambiental e Aplicada, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), Brasil, jessica.pelinsom.marques@usp.br

Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues
Professora Associada, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil

RESUMO: Estudos anteriores indicam que misturas de solo do Vale do Ribeira (SP, Brasil) com biocarvão de resíduos de poda urbana são promissoras para uso em barreiras de proteção ambiental, porém os efeitos do envelhecimento dessas misturas ainda são pouco conhecidos. Este trabalho avaliou as variações de pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) de um solo representativo da região e de uma mistura contendo 2,5% (m/m) de biocarvão, após envelhecimento simulado em laboratório por sete ciclos de umedecimento e secagem. A mistura solo-biocarvão apresentou maiores valores de pH e CE e menores valores de Eh em comparação com o solo puro, associados às características alcalinas, redutoras e ao elevado teor de nutrientes do biocarvão. O envelhecimento exerceu maior influência sobre os parâmetros físico-químicos da mistura do que sobre o solo. O pH da mistura aumentou de 5,1 para 7,3; a CE de 51,7 µS cm^{-1} para 749,0 µS cm^{-1}; e o Eh reduziu de +309,2 mV para valores entre +142,3 e +281,6 mV. Essas alterações podem impactar o desempenho dos materiais como barreiras de proteção ambiental. Estudos futuros devem aprofundar os efeitos do envelhecimento na permeabilidade, lixiviação e riscos ambientais associados.

PALAVRAS-CHAVE: Barreiras de Proteção Ambiental, Ciclos de Umedecimento e Secagem, Vale do Ribeira, pH do Solo

ABSTRACT: Previous studies indicate that mixtures of soils from the Vale do Ribeira region (SP, Brazil) with biochar derived from urban pruning waste are promising for use in environmental protection barriers; however, the effects of aging on these mixtures remain poorly understood. This study evaluated variations in pH, redox potential (Eh), and electrical conductivity (EC) of a representative soil and a mixture containing 2.5% (w/w) biochar after laboratory-simulated aging through seven wet-dry cycles. The soil-biochar mixture showed higher pH and EC values and lower Eh values compared to the unamended soil, which are associated with the alkaline, reducing characteristics and high nutrient content of the biochar. Aging exerted a greater influence on the physicochemical parameters of the mixture than on those of the soil alone. The pH increased from 5.1 to 7.3, EC from 51.7 µS cm^{-1} to 749.0 µS cm^{-1}, and Eh decreased from +309.2 mV to values between +142.3 and +281.6 mV. These changes may affect the performance of the materials as environmental protection barriers. Further studies are needed to better understand aging effects on permeability, leaching, and associated environmental risks.

KEYWORDS: Environmental Protection Barriers, Wet-Dry Cycles, Ribeira Valley, Soil pH

1 INTRODUÇÃO

A contaminação de solo e água por metais e metaloides potencialmente tóxicos (MPT) é um problema de escala global. Elementos como níquel (Ni), chumbo (Pb), arsênio (As), cádmio (Cd), zinco (Zn) e cobre (Cu), apresentam alta toxicidade, capacidade de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia trófica, e podem causar impactos significativos à saúde humana (Yong e Mulligan, 2019; Marconi et al., 2026).

No Brasil, um dos principais exemplos de contaminação por MPT ocorre no município de Adrianópolis (PR), no Vale do Ribeira, onde resíduos do beneficiamento e da fundição da galena foram lançados diretamente

no rio Ribeira de Iguape por aproximadamente 50 anos, e dispostos diretamente na superfície do solo entre 1991 e 2006. Esses resíduos apresentavam elevadas concentrações de Pb, Cd, Zn, Cu e Ni, e diferentes trabalhos relataram a contaminação dos solos, sedimentos e corpos hídricos da região por tais metais (Cruz et al., 2019; Kasemodel e Rodrigues, 2022; Trevizani et al., 2023).

Diante desse histórico de contaminação, torna-se necessária a busca por alternativas para uma disposição mais adequada dos resíduos e a contenção e mitigação dos MPT. Trabalhos anteriores vêm investigando o uso de misturas de um argissolo da região do Vale do Ribeira com biocarvão de resíduos de poda urbana como alternativa para a construção de barreiras de proteção ambiental, como liners e camadas de cobertura de resíduos (Marques et al. 2024; Marques e Rodrigues, 2025). Essas pesquisas buscaram avaliar tanto o desempenho geotécnico, relacionado à impermeabilização e resistência mecânica, quanto a eficiência na imobilização de MPT, para proteção ambiental. Resultados obtidos por Marques e Rodrigues (2025) demonstraram que a adição de biocarvão de resíduos de poda urbana ao solo promoveu aumento da soma de bases trocáveis, do pH, da resistência à compressão simples e da capacidade de sorção de Pb, Cd e Zn. Isso indica que a combinação entre biocarvão e solos da região constitui uma alternativa promissora para aplicação em barreiras de proteção ambiental em áreas de disposição de resíduos de mineração ricos em MPT.

Entretanto, após sua aplicação ao solo, o biocarvão está sujeito a processos de envelhecimento associados a variações de temperatura, exposição à água da chuva, oxidação e degradação fotoquímica. Esses processos podem, ao longo do tempo, alterar propriedades importantes do material, como a área superficial específica, a morfologia da superfície, o pH, a capacidade de troca catiônica e o grau de aromaticidade, aspectos ainda pouco explorados na literatura (Li et al., 2019; Wang et al., 2020). O monitoramento do envelhecimento natural em campo ao longo do tempo é demorado e complexo, uma vez que alguns processos ocorrem de forma lenta, podendo demandar décadas de acompanhamento.

Diferentes métodos de envelhecimento artificial têm sido desenvolvidos para simular, em laboratório, os processos naturais de forma mais rápida e controlada (Wang et al., 2020). Entre esses métodos, destacam-se os ciclos de congelamento e descongelamento, que simulam condições de regiões sazonalmente frias; os ciclos de umedecimento e secagem, que reproduzem eventos naturais de precipitação; e a oxidação química, que simula os efeitos de agentes oxidantes abióticos, como o oxigênio atmosférico ou dissolvido (Yang et al., 2022).

Nesse contexto, o presente trabalho avaliou as variações de pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) de um solo representativo do Vale do Ribeira e de uma mistura contendo 2,5% em massa de biocarvão, após envelhecimento simulado em laboratório por meio de ciclos de umedecimento e secagem. Assim, este estudo contribui para a compreensão dos efeitos do envelhecimento do biocarvão nas propriedades geoquímicas de misturas solo-biocarvão, fornecendo subsídios para a avaliação de sua durabilidade e desempenho a longo prazo em barreiras de proteção ambiental.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O solo foi coletado na porção paulista do Vale do Ribeira (livre de contaminação), e apresenta textura predominantemente siltosa (48,1% silte, 22,2% argila e 29,7% areia), caráter ácido (pH 4,8), com caulinita como argilomineral predominante na fração fina (Marques et al. 2024). O biocarvão foi obtido da pirólise de resíduos de poda urbana a 500 °C por 5 horas, conforme descrito por Moraes (2022). A mistura de solo com 2,5% de biocarvão foi homogeneizada com auxílio de uma betoneira, e quarteada pelo método da pilha alongada, conforme descrito por Marques et al. (2024).

As amostras de solo e da mistura solo-biocarvão foram submetidas a 7 ciclos de umedecimento e secagem, conforme metodologia adaptada de Yang et al. (2022). Foram pesados 2 kg da amostra de solo, distribuídos em dois béqueres de plástico de 2 litros (1 kg de amostra em cada béquer). Adicionou-se água MilliQ até a saturação. A suspensão foi misturada com auxílio de uma colher, e o béquer foi vedado com plástico filme. Os béqueres vedados foram mantidos por 24 horas dentro de uma incubadora Tecnal modelo TE371 a 25°C. Em seguida, as amostras foram retiradas da incubadora, descobertas e secas em estufa a 60°C por 24 horas (Figura 1).

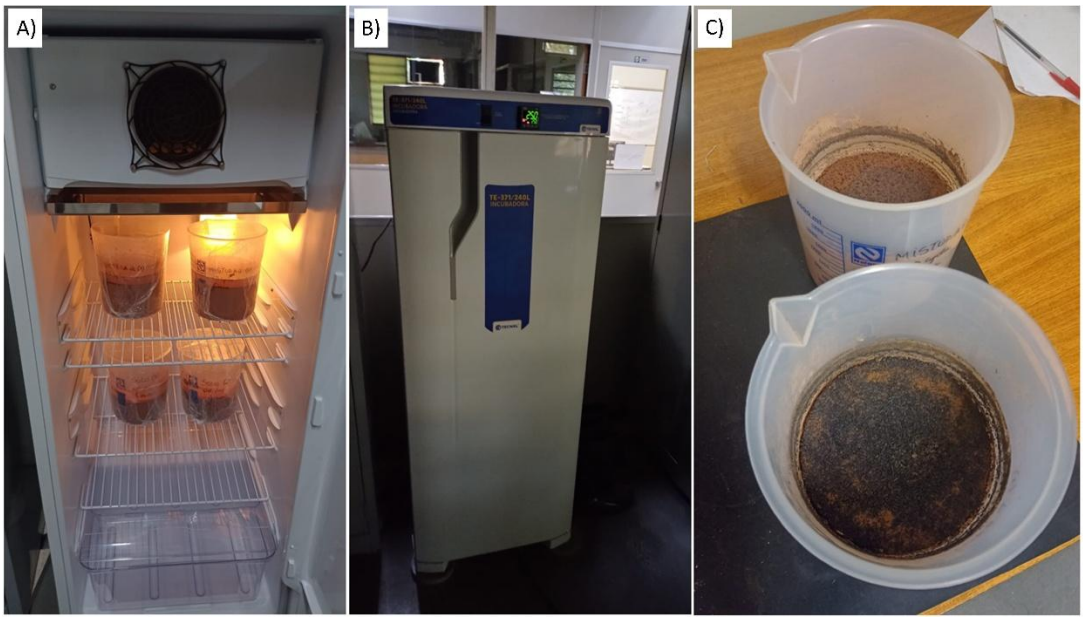


Figura 1. Processo de envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem das amostras. A) amostras de solo e da mistura dentro da incubadora: processo de umedecimento. B) incubadora utilizada na metodologia, C) amostras da mistura após secagem em estufa.

Esse procedimento foi repetido 7 vezes (totalizando 7 ciclos de umedecimento e secagem), sempre registrando a cada ciclo a quantidade de água adicionada, bem como o pH, o potencial redox (Eh) e a condutividade elétrica (CE) das amostras. O pH e a CE foram medidos utilizando um pHmetro Jensway 3540. O Eh foi medido em um pHmetro Digimed DH21 com eletrodo de anel de platina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a variação dos valores de pH, Eh e CE nas amostras ao longo dos 7 ciclos de umedecimento e secagem. Primeiramente, observou-se que em todas as etapas do processo, a mistura com biocarvão apresentou maior pH, maior CE e menor Eh em comparação com o solo puro. Isso pode ser explicado pelas características do biocarvão, que é um material mais alcalino, redutor e que apresenta alta concentração de nutrientes (Moraes, 2022). Marques et al. (2024) já havia observado o aumento do pH deste mesmo solo devido a adição de biocarvão de resíduos de poda urbana, não só devido ao maior pH do biocarvão, mas também a sua capacidade de neutralizar ácidos associada a íons bicarbonato e carbonato.

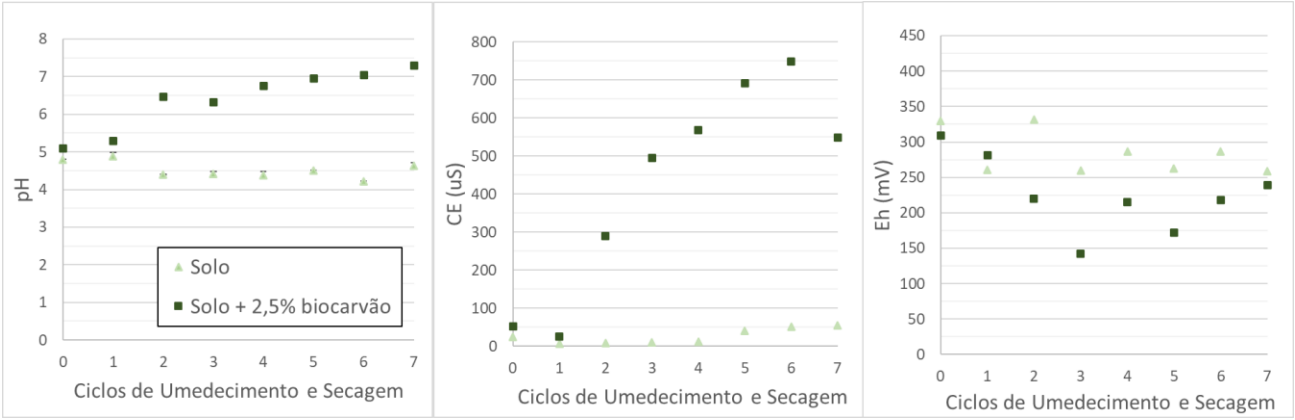


Figura 1. Variação de pH, potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) nas amostras de solo e mistura de solo com 2,5% de biocarvão de resíduos de poda urbana.

O pH inicial do solo era de 4,8, e teve pouca variação, chegando no final do processo com 4,6. Por outro lado, o pH da mistura com 2,5% de biocarvão aumentou de 5,1 para 7,3. Tais resultados contrastam com o observado por Luo et al. (2025), que estudaram o envelhecimento de um biocarvão de palha de milho alcalino (pH 10,6) a partir de 25 ciclos de umedecimento e secagem e reportaram diminuição do pH. No entanto, considerando misturas de solo e biocarvão, outros autores já demonstraram aumento do pH devido a processos de envelhecimento, como Yang et al. (2023), ao estudar uma mistura de solo com 2,5% de biocarvão de palha de milho após 30 ciclos de umedecimento e secagem. No caso de Yang et al. (2023) e da presente pesquisa, o aumento do pH pode estar relacionado a dissolução progressiva de compostos alcalinos do biocarvão e a influência da troca de cátions, como Ca+, Mg+ e K+, com a solução do solo.

A CE do solo permaneceu entre 7,3 e 12,0 µS cm^{-1} nos primeiros 4 ciclos e depois aumentou até 54,7 µS cm^{-1} no final do sétimo ciclo. A mistura com 2,5% de biocarvão também passou por um aumento da CE, que foi de 51,7 µS cm^{-1} até 749,0 µS cm^{-1} no sexto ciclo. Isso pode estar associado com a lixiviação progressiva dos íons das fases sólidas tanto do solo quanto do biocarvão.

O Eh inicial do solo, de +329,5 mV, variou ao longo do processo, ficando entre os valores de +258,6 mV (sétimo ciclo) e +332,1 mV (segundo ciclo). O Eh inicial da mistura solo-biocarvão foi de +309,2 mV, e este valor também sofreu variações para mais e para menos ao longo dos ciclos, estando sempre entre +142,3 (terceiro ciclo) e +281,6 mV(segundo ciclo).

De forma geral, o processo de envelhecimento por umedecimento e secagem teve maior efeito sobre os parâmetros físico-químicos da mistura solo-biocarvão do que sobre os do solo puro, o que indica que os componentes mais reativos estavam associados ao biocarvão. E o aumento do pH observado a partir do envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem pode favorecer a precipitação dos metais e sua sorção pelas partículas de solo e biocarvão, o que é relevante na aplicação como barreira de cobertura em resíduos de mineração ricos em metais potencialmente tóxicos. Em geral, um ambiente básico favorece a precipitação de metais (Kabata-Pendias, 2011). Alamgir (2016) destaca que o pH pode ainda influenciar a retenção de metais de outras formas como, por exemplo, com a variação da carga superficial dos minerais e com a dissolução de ânions de complexação de metais.

4 CONCLUSÕES

O envelhecimento simulado por ciclos de umedecimento e secagem afetou de forma mais intensa os parâmetros físico-químicos da mistura solo–biocarvão em comparação ao solo puro, promovendo aumento do pH e da condutividade elétrica e redução do potencial redox. Tais mudanças podem ter implicações para o uso dos materiais como barreira de proteção ambiental. Estudos adicionais são necessários para avaliar os efeitos do envelhecimento sobre propriedades hidráulicas e sobre a lixiviação de metais.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Doutorado (Processo 140124/2019-5), pela bolsa de Pós Doutorado Junior (Processo nº 175138/2023-0) e pela bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 310989/2020-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alamgir, M. (2016) *The Effects of Soil Properties to the Extent of Soil Contamination with Metals.* In: Hasegawa, H.; Rahman, I. M. M.; Rahman, M. A. Environmetal Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils. Springer, Tóquio, p. 1-19.

Cruz, A. C. F., Gusso-Choueri, P., Araujo, G. S., Campos, B. G., Abessa, D. M. (2019) Levels of metals and toxicity in sediments from a Ramsar site influenced by former mining activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 171, p.162–172.

Kabata-Pendias, A. (2011) *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed., CRC Press, Boca Raton. 505p.

Kasemodel, M. C.; Rodrigues, V. G. S. (2022) Soil Particle Size Fractioning and Pb and Cd Bioaccessibility on a Dirty Road Near Former Beneficiation and Smelting. *Water, Air & Soil Pollution*, 233, 478. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05936-8

Li, H.; Lu, X.; Xu, Y.; Liu, H. (2019) How close is artificial biochar aging to natural biochar aging in fields? A meta-analysis. *Geoderma*, 352, 96-103. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.006

Luo, Q.; Zhao, X.; Li, Y.; Deng, Y.; He, Q.; Dai, W. (2025) Aging alters the physicochemical properties of biochar, enhances its adsorption performance for tris-(1-chloro-2-propyl) phosphate, and changes the adsorption mechanism. *Environmental Technology & Innovation* 37, 104053. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104053

Marconi, G.; Di Resta, C.; Naclerio, A.; Banfi, G.; Tomaiulo, R. (2026) Heavy metals and human reproductive toxicity: Mechanisms, pregnancy outcomes, and mitigation strategies. *Reproductive Toxicology* 139, 109104. https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2025.109104

Marques, J. P.; Rodrigue, V. G. S. R. (2025) Urban pruning waste biochar enhances lead, cadmium, and zinc sorption: A potential strategy for soil liners in Ribeira Valley (Brazil). *Soil and Sediment Contamination: An International Journal.* 1–20. https://doi.org/10.1080/15320383.2025.2556142

Marques, J. P.; Vaz, C. M. P; Rodrigues, V. G. S. (2024) Characterization of mixtures of Brazilian Ultisol with urban pruning waste biochar at two different proportions. *Journal of Soil and Sediments* 24, 3610-3625. https://doi.org/10.1007/s11368-024-03928-1

Moraes, T. T. (2022) *Caracterização de biocarvão de resíduos de poda e análise da sorção de Cd e Pb.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP.

Trevizani, T. H.; Domit, C.; Santos, M. C. O.; Figueira, R. C. L. (2023) Bioaccumulation of heavy metals in estuaries in the Southwest Atlantic Ocean. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 26703-26717. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23974-x.

Wang, J.; Guo, X. (2020) Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials* 390, 122156. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156

Yang, K.; Wang, X.; Cheng, H.; Tao, S. (2023) Effects of physical aging processes on the bioavailability of heavy metals in contaminated site soil amended with chicken manure and wheat straw biochars. *Environmental Pollution* 324, 121414.

Yang, X.; Wang, L.; Guo, J.; Wang, H.; Masek, O.; Wang, H.; Bolan, N. S.; Alessi, D. S.; Hou, D. (2022) Aging features of metal(loid)s in biochar-amended soil: Effects of biochar type and aging method. *Science of the Total Environment* 815, 152922. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152922

Yong, R. N.; Mulligan, C. N. (2019) *Natural and Enhanced Attenuation of Contaminants in Soils*. 2nd ed. Taylor & Francis Group, Boca Raton, 325p.