

**VARIAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE SOLO COM E SEM  
BIOCARVÃO APÓS ENVELHECIMENTO POR OXIDAÇÃO COM  
PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E POR CICLOS DE UMEDECIMENTO E  
SECAGEM**

Jéssica Pelinsom Marques <sup>1</sup>; Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues <sup>2</sup>

**Resumo** – Este estudo avaliou a influência de dois métodos de envelhecimento artificial - ciclos de umedecimento e secagem e oxidação química - sobre o potencial hidrogeniônico (pH), o potencial de oxidação-redução (Eh) e a condutividade elétrica (CE) de um argissolo e de sua mistura com 5% de biocarvão derivado de resíduos de poda urbana. O envelhecimento teve um impacto mais pronunciado nas características da mistura solo-biocarvão em comparação com as do solo puro. Para a mistura solo-biocarvão, ambos os processos resultaram em aumento do pH (de 5,6 para 8,5 e 8,2, respectivamente, após os ciclos de umedecimento e secagem e a oxidação química) e da CE (de 95,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  para 271,0 e 195,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , respectivamente), além da redução do Eh (de +296,8 mV para +155,5 mV e +260,0 mV). Essas alterações podem estar associadas à dissolução de compostos alcalinos do biocarvão e à troca de cátions com a solução do solo, e têm potenciais aplicações na remediação ambiental e no manejo da qualidade do solo. Pesquisas futuras devem aprofundar a caracterização química e mineralógica dos materiais após o envelhecimento para compreender melhor os mecanismos envolvidos e suas implicações a longo prazo.

**Abstract** – This study evaluated the influence of two artificial aging methods – wet-dry cycles and chemical oxidation - on the pH, redox potential (Eh), and electrical conductivity (EC) of an Ultisol and its mixture with 5% biochar derived from urban pruning waste. Aging had a more pronounced impact on the characteristics of the soil-biochar mixture compared to those of the unamended soil. For the soil-biochar mixture, both processes increased pH (from 5.6 to 8.5 and 8.2, respectively, after wet-dry cycles and chemical oxidation) and EC (from 95.0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  to 271.0 and 195.0  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , respectively), and reduced Eh (from +296.8 mV to +155.5 mV and +260.0 mV). These changes may be associated with the dissolution of alkaline compounds from the biochar and cation exchange with the soil solution, and they have potential applications in environmental remediation and soil quality management. Future research should further investigate the chemical and mineralogical characterization of the materials after aging to better understand the underlying mechanisms and their long-term implications.

**Palavras-Chave** – Envelhecimento artificial, condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, resíduos de poda.

---

<sup>1</sup> Eng., PhD, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, jessica.pelinsom.marques@usp.br

<sup>2</sup> Geól., PhD, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, valguima@usp.br

## 1. INTRODUÇÃO

O melhoramento de solos a partir da aplicação de biocarvão tem ganhado atenção na última década. O biocarvão é um material sólido rico em carbono obtido da pirólise de diferentes materiais orgânicos, incluindo, por exemplo, resíduos de agricultura e florestais, resíduos sólidos municipais, dejetos de animais e lodos de tratamento de efluentes (Ahmad et al., 2014; Mishra et al., 2023). Sua aplicação no solo altera propriedades importantes, como o teor de nutrientes, a acidez, a área superficial específica, a capacidade de troca catiônica, a porosidade, a consistência e retenção de água (Ahmad et al., 2014; Lu et al., 2023). Vários estudos já abordaram a aplicação do biocarvão como melhoramento de solos agricultáveis, com foco no aumento da produtividade (Ghassemi-Golezani et al., 2023). Outros avaliaram sua influência na estabilidade do carbono, visando minimizar emissões de CO<sup>2</sup> para a atmosfera (Ren et al., 2025). E ainda outros autores estudaram seu potencial como sorvente na remediação de solos e águas contaminadas por compostos orgânicos e por metais potencialmente tóxicos (Ogura et al., 2021; Wei et al., 2024; Meng et al., 2023).

Apesar do aumento recente do interesse no biocarvão, ainda são escassos os estudos em relação a influência do seu envelhecimento e interação com o solo. Depois de aplicado ao solo, o biocarvão está sujeito a processos resultantes de variações de temperatura, exposição a ciclos de chuvas e secas e congelamento e descongelamento, interação com a parte mineral do solo, adsorção de exsudados de raízes e reações biológicas e fotoquímicas. Tais processos naturais causam diferentes modificações, relacionadas a fragmentação mecânica, oxidação superficial, liberação de matéria orgânica dissolvida, bloqueio de poros, acidificação e dissolução mineral, que são pouco exploradas na literatura (Li et al., 2019; Wang et al., 2020).

O processo de envelhecimento natural pode ser monitorado através de amostragem ao longo do tempo do biocarvão aplicado em campo, mas essa é uma abordagem demorada e complexa, uma vez que alguns dos processos naturais de envelhecimento podem ser muito lentos, necessitando de monitoramento por muitas décadas. Por isso, desenvolveu-se diferentes métodos artificiais de envelhecimento para simular de maneira mais simples e rápida em laboratório os processos naturais (Wang et al., 2020).

Estudos anteriores analisaram misturas de um Argissolo do Vale do Ribeira, no estado de São Paulo (proveniente de uma área não contaminada), com um biocarvão derivado de resíduos de poda urbana, com o objetivo de avaliar seu potencial como barreira de proteção ambiental em áreas de disposição de resíduos de mineração. Os resultados indicaram que a adição de 5% de biocarvão elevou o pH do solo, aumentou a soma de bases trocáveis e melhorou sua capacidade de sorção de chumbo (Pb), cádmio (Cd) e zinco (Zn), metais potencialmente tóxicos presentes nesses resíduos (Marques et al., 2024). Mas ainda é necessário estudar a influência dos processos de envelhecimento nas características e desempenho destes materiais.

Neste contexto, a presente pesquisa buscou avaliar a influência de dois métodos de envelhecimento artificial (ciclos de umedecimento e secagem e oxidação química) sobre o potencial hidrogeniônico (pH), o potencial de oxidação-redução (Eh) e a condutividade elétrica (CE) do solo e da mistura solo-biocarvão previamente caracterizada por Marques et al. (2024).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Mistura solo-biocarvão

A mistura solo-biocarvão usada neste trabalho foi preparada e caracterizada por Marques et al. (2024). O solo é uma amostra composta representativa de Argissolos da região paulista do Vale do Ribeira, mais especificamente dos municípios de Eldorado e Jacupiranga (SP). É uma amostra de solo fino (22,1% argila e 42,1% silte), ácido (pH 4,8), com a fração fina predominantemente composta por caulinita (Marques et al., 2024). O biocarvão foi produzido a partir da pirólise de resíduos de poda urbana a 500°C por 5 horas sem oxigênio. Trata-se de um

material alcalino (pH 10) com 67,3% de carbono (Moraes, 2022). A Mistura solo-biocarvão foi obtida da adição do biocarvão ao solo em proporção de 5% em massa. A proporção foi escolhida com base em estudos prévios (Marques et al., 2023). Detalhes sobre a preparação da mistura e a caracterização dos materiais podem ser encontrados em Marques et al. (2024) e Moraes et al. (2022).

## **2.2. Envelhecimento por oxidação química**

Utilizou-se peróxido de hidrogênio para o processo de envelhecimento por oxidação química. Trata-se de um oxidante apropriado, com baixo custo, que não produz resíduos perigosos, além de ser o mais usado na literatura. As amostras de solo e mistura solo-biocarvão foram pesadas em recipientes de vidro e colocadas em contato com peróxido de hidrogênio 35% em uma razão solo-solução 1/5, conforme metodologia adaptada de Chen et al. (2023). Aguardou-se a reação, utilizando um bastão de vidro para misturar a amostra ocasionalmente. As amostras foram deixadas em repouso dentro de uma capela para que o líquido evaporasse por 30 dias. Em seguida, colocou-se os recipientes em estufa a 100°C por 24 horas. A amostra foi destorroada e homogeneizada.

## **2.3. Envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem**

O envelhecimento físico das amostras foi simulado através de 10 ciclos de umedecimento (saturação em água por 24 horas a 25°C) e secagem (estufa a 60°C por 24 horas), conforme metodologia adaptada de Yang et al. (2022). Em béqueres de plástico de 2 litros foi pesado 1 kg de cada amostra sólida. Adicionou-se água MilliQ até a saturação. A suspensão foi misturada, e o béquer foi vedado com plástico filme e colocado em uma incubadora a 25°C por 24 horas. Em seguida, descobriu-se os béqueres e eles foram deixados secando em estufa a 60°C por mais 24 horas. O procedimento foi realizado em duplicata e repetido 10 vezes (totalizando 10 ciclos). Em seguida, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e homogeneizadas.

## **2.4. Medição dos parâmetros físico-químicos**

Os valores de pH, Eh e CE foram medidos no final de ambos os processos de envelhecimento, em béqueres com suspensões de 15 g de material sólido em contato com 75 mL de água MilliQ. Em particular durante o processo de envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem, foram também medidos pH, Eh e CE das amostras no início de cada ciclo, diretamente nos béqueres, logo em seguida da etapa de adição de água. Em todos os casos, o pH e a CE foram medidos utilizando um pHmetro Jemway 3540. O Eh foi medido em um pHmetro Digimed DH21 com eletrodo de anel de platina. Para comparação com pH, Eh e CE antes dos processos de envelhecimento, foram utilizados os valores reportados por Marques et al. (2024).

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Figura 1 apresenta a variação do pH, do Eh e da CE nas amostras de solo e da mistura solo-biocarvão ao longo dos 10 ciclos de umedecimento e secagem. Observou-se que em todas as etapas do processo, a mistura solo-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).

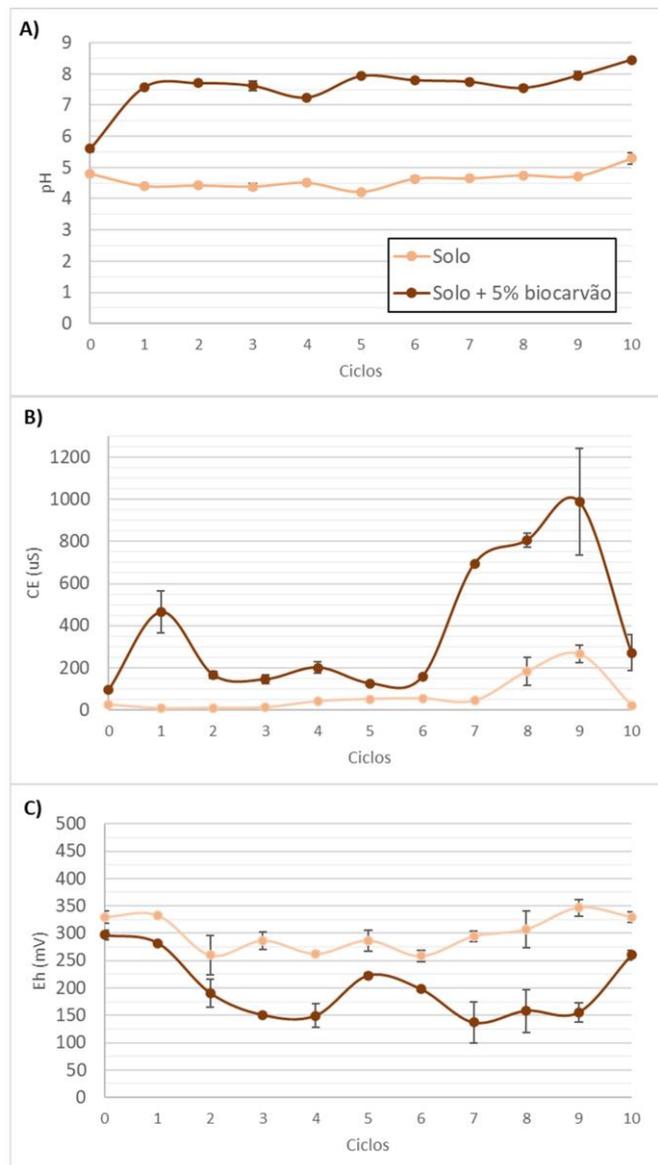


Figura 1. Variação do pH, do Eh e da CE nas amostras de solo e da mistura solo-biocarvão ao longo dos 10 ciclos de umedecimento e secagem.

O pH do solo antes do processo de envelhecimento era de 4,8, e teve pouca variação chegando a 5,3 no final do processo. Por outro lado, o pH da mistura com 5% de biocarvão, que era de 5,6 antes do envelhecimento, aumentou principalmente nos dois primeiros ciclos e chegou a 8,5 depois dos 10 ciclos (Figura 1A). A CE do solo permaneceu entre 7,3 e 12,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  nos primeiros 4 ciclos. O valor aumentou, ficando entre 41,2 e 54,7  $\mu\text{S cm}^{-1}$  entre o quarto e o sétimo ciclos. Já nos últimos dois ciclos observou-se uma elevação da CE até 265,5  $\mu\text{S cm}^{-1}$  e uma nova diminuição a 22,3  $\mu\text{S cm}^{-1}$  no final do processo. A mistura solo-biocarvão teve um comportamento similar, apresentando CE de 125,5 a 200,8  $\mu\text{S cm}^{-1}$  entre o segundo e sexto ciclos, aumentando para até 988,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  no nono ciclo e novamente diminuindo para 271,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  no final do processo (Figura 1B). O Eh do solo variou em torno do valor inicial de +329,5 mV, estando sempre entre +258,6 mV (sétimo ciclo) e +346,6 mV (no último ciclo). Para a mistura solo-biocarvão, observou-se uma tendência de diminuição do Eh ao longo dos ciclos de umedecimento e secagem, chegando a +155,5 mV no final do processo (Figura 1C).

A Figura 2 apresenta a variação de pH, Eh e CE antes e depois do processo de oxidação química. O efeito da oxidação no pH do solo foi mínimo, sendo atingido um pH final de 4,5 (em comparação com o valor inicial de 4,8). O efeito foi mais significativo na mistura solo-biocarvão, com o pH aumentando de 5,6 e para 8,2 (Figura 2A), valor próximo do observado no processo de umedecimento e secagem, que foi 8,5. A CE do solo aumentou de 24,8 para 195,2  $\mu\text{S cm}^{-1}$  pós

oxidação. E a CE da mistura solo-biocarvão foi de 95,0 para 335,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (Figura2B). Por último, o Eh foi de +329,5 para +340,3 mV no solo, sendo que não houve alteração significativa considerando o desvio padrão. Já para a mistura, o Eh diminuiu de +296,8 para +211,5mV (Figura 2C).

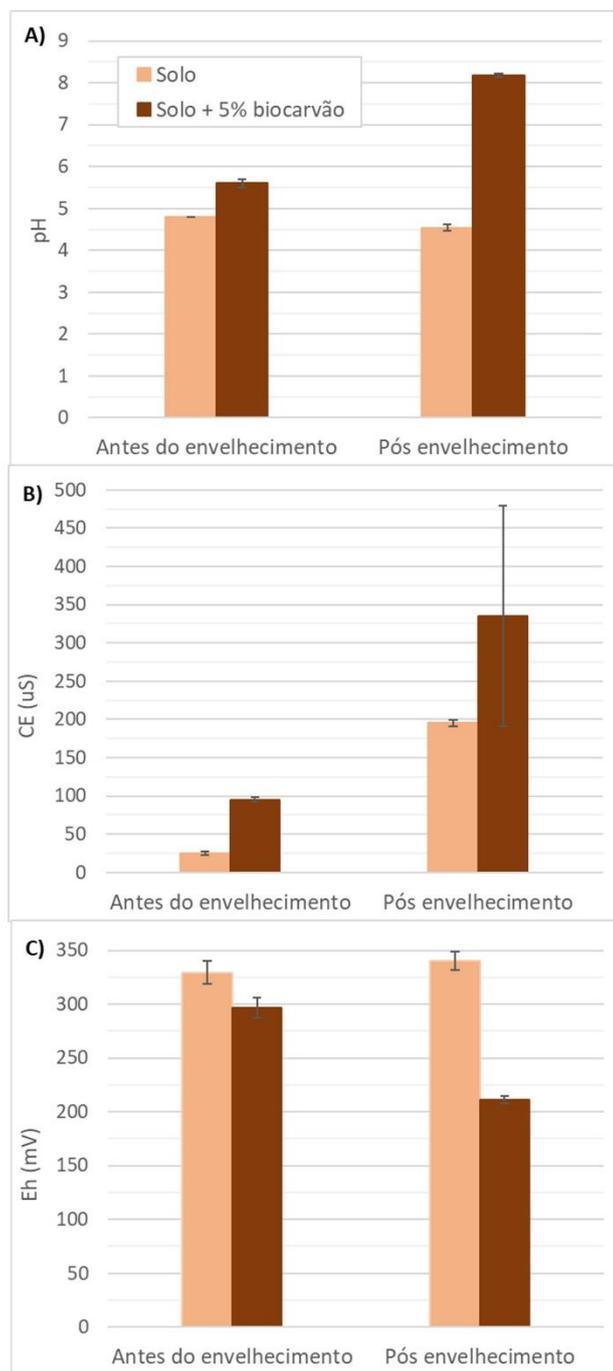


Figura 2. Variação do pH, do Eh e da CE antes e depois do processo de oxidação química.

Nos dois processos de envelhecimento, observou-se o aumento do pH, um resultado contrastante com o observado por Luo et al. (2025), que estudaram o envelhecimento de biocarvão de palha de milho alcalino (pH 10,6) a partir de 25 ciclos de umedecimento e secagem e reportaram diminuição do pH. Segundo Wang et al. (2020), a oxidação que ocorre com o envelhecimento introduz grupos funcionais ácidos ao biocarvão, por isso espera-se acidificação. No entanto, outros autores já demonstraram aumento do pH devido a processos de envelhecimento em misturas solo-biocarvão, 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, tratando-se de uma mistura de solo e biocarvão, o aumento do pH pode estar relacionado a dissolução progressiva de compostos alcalinos do biocarvão e a influência da troca de cátions, como  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  e  $\text{K}^+$ , com a solução do solo. O aumento mais acentuado nos primeiros ciclos pode estar associado à liberação inicial de substâncias solúveis, enquanto a estabilização posterior reflete um equilíbrio entre dissolução e adsorção de íons.

O aumento da CE ao longo do processo pode ser um indicativo do aumento da concentração de íons, que podem ter sido lixiviados das fases sólidas tanto do solo quanto do biocarvão. A diminuição do Eh provavelmente é devido ao caráter redutor do biocarvão. Compostos orgânicos parcialmente carbonizados presentes neste material podem servir como doadores de elétrons para reações.

De forma geral, ambos os processos de envelhecimento tiveram maior efeito nas características da mistura solo-biocarvão do que nas características do solo puro, o que indica que os componentes mais reativos estavam associados ao biocarvão.

#### 4. CONCLUSÕES

Os processos de envelhecimento artificial tiveram um efeito mais significativo nos parâmetros da mistura de solo com 5% de biocarvão de resíduos de poda urbana do que nos parâmetros do solo puro, devido a maior reatividade do biocarvão. Tanto o processo de envelhecimento por ciclos de umedecimento e secagem quanto o processo por oxidação química com peróxido de hidrogênio provocaram aumento do pH, aumento da CE, e diminuição do Eh da mistura solo-biocarvão, o que provavelmente está relacionado com dissolução de compostos alcalinos do biocarvão e troca de cátions com a solução do solo. Essas transformações têm o potencial de modificar significativamente a dinâmica de nutrientes e contaminantes no solo, com impactos diretos na sua fertilidade e na eficiência de retenção de poluentes. Nesse contexto, ampliar o entendimento sobre as alterações químicas e mineralógicas após o envelhecimento se mostra essencial para orientar aplicações mais eficazes em remediação ambiental e manejo sustentável dos solos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Doutorado (Processo 140124/2019-5) e pela bolsa de Pós Doutorado Junior (Processo nº 175138/2023-0) da primeira autora, bem como a bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo 310989/2020-5) da segunda autora.

#### REFERÊNCIAS

AHMAD M, RAJAPAKSHA AU, LIM JE, ZHANG M, BOLAN N, MOHAN D, VITHANAGE M, LEE SS, OK YS (2014). "Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review" In Chemosphere 99, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

CHEN, X.; GAO, X.; YU, P.; SPANU, L.; HINOJOSA, J.; ZHANG, S.; LONG, M.; ALVAREZ, P. J. J.; MASIELLO, C. A. (2023). "Rapid Simulation of Decade-Scale Charcoal Aging in Soil: Changes in Physicochemical Properties and Their Environmental Implications" In Environmental Science and technology, 57, 128-138. 2023.

GHASSEMI-GOLEZANI, K.; RAHIMZADEH, S.; FARHANGI-ABRIZ, S. (2023). "Utilization of biochar in rainfed farming systems: A meta-analysis" in Bioresource Technology Reports 22, 101436. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101436>

- LI, H.; LU, X.; XU, Y.; LIU, H. (2019) "How close is artificial biochar aging to natural biochar aging in fields? A meta-analysis" in *Geoderma* 352, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.006>
- LU, Y.; GU, K.; SHEN, Z.; TANG, C.; SHI, B.; ZHOU, Q. (2023). "Biochar implications for the engineering properties of soils: A review" in *Science of the Total Environment* 888, 164185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164185>
- 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" in *Environmental Technology & Innovation* 37, 104053. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104053>
- 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" in *Journal Of Soils And Sediments* 2024, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03928-1>
- MARQUES, J. P.; LIMA, J. Z.; VAZ, C. M. P. V.; RODRIGUES, V. G. S. (2023). "Adsorção de cádmio em misturas de solo com biocarvão de resíduos de poda urbana". In: *Anais de X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2023), IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2023)*. Salvador, BA, Brasil.
- MENG, Z.; HUANG, S.; WU, J.; LIN, Z. (2023). "Competitive adsorption and immobilization of Cd, Ni, and Cu by biochar in unsaturated soils under single-, binary-, and ternary-metal systems" in *Journal of Hazardous Materials*, 452, 131106. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131106>
- MISHRA, R. K.; KUMAR, D. J. P.; NARULA, A.; CHRISTIE, S. M.; NAIK, S. U. (2023). "Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A review on types of feedstocks, chemical compositions, operating parameters, techno-economic study, and life cycle assessment" in *Fuel* 343, 127968. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127968>
- 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, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- OGURA, A. P.; LIMA, J. Z.; MARQUE, J. P.; SOUSA, L. M.; RODRIGUES, V. G. S.; ESPÍNDOLA, E. L. G. (2021). "A review of pesticides sorption in biochar from maize, rice, and wheat residues: Current status and challenges for soil application" in *Journal of Environmental Management*, 300, 113753, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113753>.
- REN, S.; ZHONG, J.; WANG, K.; LIU, R.; FENG, H.; DONG, Q.; YAND, Y. (2025). "Application of biochar in saline soils enhances soil resilience and reduces greenhouse gas emissions in arid irrigation areas" in *Soil and Tillage Research* Volume 250, 106500. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106500>
- WANG, Y.; TANG, D.; YUAN, X.; UCHIMIYA, M.; LI, J.; LI, Z.; LUO, Z.; XU, Z.; SUN, S. (2020). "Effect of amendments on soil Cd sorption and trophic transfer of Cd and mineral nutrition along the food chain" in *Ecotoxicology and Environmental Safety* 189 110045. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110045>
- WEI, Z.; WEI, Y.; LIU, Y.; XU, Y.; PARK, J.; WANG, J. J. (2024). "Biochar-based materials as remediation strategy in petroleum hydrocarbon-contaminated soil and water: Performances, mechanisms, and environmental impact" in *Journal of Environmental Sciences* 138 350–372. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.04.008>

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" in *Science of the Total Environment* 815 152922.

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" in *Environmental Pollution* 324 (2023) 121414