



VI- 006 – VALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DE BIOCHAR DE BIOMASSA DE EUCALIPTO E PERÓXIDO DE CÁLCIO COMO ADITIVO EM SOLO DE BACIA DE CONTENÇÃO

Arthur Fernandes Gonçalves⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental e Sanitarista (FEN/UERJ). Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ). Doutorando no programa de Doutorado em Engenharia Ambiental (DEAMB/UERJ).

Clayton Veríssimo Hashimoto⁽²⁾

Biólogo na Área de Segurança, Meio Ambiente e Saúde da Petróleo Brasileiro S.A. Biólogo pela Universidade Santa Cecília de Santos, SP (UNISANTA). Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ). Doutorando no programa de Doutorado em Engenharia Ambiental (DEAMB/UERJ).

Pedro Gonçalves de Assis Faria⁽³⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária (FEN/UERJ). Bolsista de iniciação científica CNPq no Laboratório de Engenharia Sanitária (LES).

Luís Gustavo Mesquita Braga⁽⁴⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária (FEN/UERJ).

Elisabeth Ritter⁽⁵⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre em Engenharia Civil (Geotecnia) pela PUC-RJ. Doutora em Engenharia Civil (Geotecnia Ambiental) pela COPPE/ UFRJ. Professora Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Professora permanente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ) e do Doutorado em Engenharia Ambiental (DEAMB/UERJ).

Endereço⁽¹⁾: Rua São Francisco Xavier, 524 – Maracanã – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 20550-013- Brasil – Tel.: (21) 2334-0000 – e-mail: arthurfernandesgon@gmail.com

RESUMO

O petróleo e seus derivados podem vazar durante o transporte ou armazenamento. Em tanques de armazenamento, são construídas bacias de contenção com solo compactado, que é removido em caso de vazamentos e geralmente destinado ao tratamento e posterior disposição. A aplicação de biocarvão e peróxido de cálcio tem sido utilizada para tratar solos contaminados por compostos orgânicos. Este estudo teve como objetivo avaliar a toxicidade desse tratamento potencial em sementes de alface (*Lactuca sativa*).

Para isso, foi coletado solo de uma bacia de contenção de um tanque de armazenamento de petróleo, o qual foi submetido a análises físico-químicas e geotécnicas, apresentando características de areia argilosa sem histórico de contaminação. Esse solo, após adição de biocarvão proveniente de biomassa de eucalipto, peróxido de cálcio e a combinação de ambos, foi utilizado em ensaios de germinação de alface.

A adição de biocarvão ao solo, assim como de peróxido, aumentou a taxa de germinação das sementes em comparação com o controle ($p < 0,05$). O crescimento radicular relativo também foi positivamente afetado pela adição de biocarvão (131,6%) e peróxido (103,1%), enquanto a aplicação dos dois aditivos juntos reduziu esse crescimento (87,3%). Além disso, houve uma diferença significativa entre o tratamento com biocarvão e o controle no crescimento radicular e da parte aérea, com aumento promovido pelo biocarvão.

Portanto, foi possível observar que o biocarvão possui propriedades fitoestimulantes e que o peróxido de cálcio não apresentou toxicidade para a alface. No entanto, a aplicação dos dois aditivos simultaneamente pode ter influenciado negativamente no crescimento das raízes dessa hortaliça.

PALAVRAS-CHAVE: germinação, alface, petróleo, biocarvão.



O petróleo é extremamente importante para a matriz energética brasileira. No ano de 2023, houve produção de 772,1 milhões de barris de derivados de petróleo no país (ANP, 2024) e, entre seus derivados, o diesel é o produto mais consumido no Brasil (MME, 2023). Os tanques de armazenamento de derivados são construídos dentro de bacias de contenção com solo compactado, muitas vezes de composição argilosa, que seguem a ABNT NBR 17505.

Em muitas oportunidades, quando ocorre a contaminação, o solo é removido, levado para tratamento e posterior disposição final. Esse procedimento, no entanto, caso não seja realizado nas condições ideais, pode resultar em subprodutos tóxicos (WANG et al., 2018).

O *biochar* (biocarvão) é um material produzido a partir da pirólise da biomassa em ausência de oxigênio e com diferentes condições de temperatura e tempo de detenção. Acredita-se que pirólises realizadas a temperaturas mais baixas preservam o estado nutricional do biocarvão (SONG et al., 2017), promovendo o crescimento e a atividade microbiana do solo (WEI et al., 2020a). Isso faz com que esse material seja conhecido por aprimorar as características do solo, disponibilizando nutrientes, adsorvendo contaminantes, melhorando a capacidade de campo e aumentando a aeração, por exemplo (WANG et al., 2017; MIA et al., 2014; JIANG et al., 2016). Observando essa tendência, autores vêm utilizando o biocarvão como aditivo em solos contaminados para o tratamento de contaminantes orgânicos (ZHANG; ZHANG; ZHANG, 2019; GUIRADO et al., 2021; ZHU et al., 2022). Já foi observado que o biocarvão pode apresentar toxicidade em determinadas proporções (MARMIROLI et al., 2022).

Outro aditivo utilizado no tratamento de solos e águas superficiais contaminadas é o peróxido de cálcio (CaO_2) (LU; ZHANG; XUE, 2017), material sólido, estável e de fácil acesso conhecido por sua capacidade de liberar oxigênio no meio a partir da formação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) quando hidratado. No entanto, a presença de H_2O_2 no meio é capaz de causar toxicidade às sementes (WOJTYLA et al., 2016).

Apesar da relativa toxicidade, alguns autores vêm utilizando o biocarvão e o peróxido de cálcio no tratamento de substratos contaminados por contaminantes orgânicos (LI et al., 2019; SHEN et al., 2023; HUNG et al., 2022).

A coaplicação do biocarvão com o peróxido de cálcio pode ser uma forma de tratar solos de bacia de contenção contaminados por derivados de petróleo. No entanto, pouco se sabe sobre a toxicidade que estes aditivos podem causar aos organismos do solo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a toxicidade de dois aditivos ao solo (biochar de eucalipto e peróxido de cálcio) em causar toxicidade em sementes de alface (*Lactuca sativa*).

MATERIAIS E MÉTODOS

COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo superficial (0-20 cm) foi coletado na bacia de contenção de um tanque de armazenamento de hidrocarbonetos pertencentes a uma empresa atacadista de derivados de petróleo no estado do Rio de Janeiro. O solo, que provém de jazida de uma área de mineração, havia sido assentado recentemente sobre o local com auxílio de um trator.

A amostra foi transportada ao Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UERJ, onde foi seco ao ar, destorroado, peneirado (2 mm) e armazenado em sacolas plásticas à temperatura ambiente. Realizou-se a caracterização geotécnica do solo por meio dos ensaios de Limite de Plasticidade (NBR 7180), Limite de Liqueidez (NBR 6459) e Análise Granulométrica (NBR 7181). (ABNT, 2016b; ABNT, 2016a; ABNT, 2016d).

No Laboratório de Engenharia Sanitária (LES) da UERJ foi feita a caracterização físico-química do solo. Para isso, o solo foi lixiviado com água destilada por 24h em proporção solo:água de 1:2. O conjunto foi depois agitado em mesa agitadora e, em seguida, centrifugados por 15 minutos a 2500 rpm. O sobrenadante foi



analisado seguindo metodologia do Standard Methods (RICE et al., 2012). A matéria orgânica foi determinada por ignição conforme proposto por Teixeira et al. (2007).

O peróxido de cálcio (75%) foi adquirido da empresa Sigma-Aldrich. O biocarvão foi produzido a partir de biomassa de eucalipto (*Eucalyptus sp.*) em uma unidade dedicada à fabricação de carvão para a indústria siderúrgica. A produção do biocarvão envolveu a pirólise da biomassa em um forno do tipo "rabo quente" durante 70 a 80 horas, com a temperatura mantida em torno de 450 °C. Esses fornos são de fácil construção e operação, mantendo a simplicidade operacional e sendo economicamente acessíveis (IBAMA, 1999).

ENSAIO DE GERMINAÇÃO

Os ensaios de germinação foram conduzidos utilizando sementes de alface (*Lactuca sativa*) da marca Isla, variedade Grandes Lagos Americana, lote 143574-014. Este organismo foi utilizado para realizar a avaliação ecotoxicológica de substâncias no solo (USEPA, 2012) e os experimentos, realizados em quadruplicata, seguiram o protocolo estabelecido por Rabelo et al. (2018).

Em resumo, amostras de solo de 150g foram alocadas para cada condição experimental, incluindo um controle (B), composto exclusivamente do solo coletado na bacia de contenção, 5% m/m de biochar (BC), 1% m/m de peróxido de cálcio (PE), e uma combinação de peróxido e biochar nas proporções mencionadas (BP). A escolha da proporção de biochar foi baseada em resultados prévios na literatura (OLESZCZUK; KOLTOWSKI, 2017).

Para garantir homogeneidade, o solo foi vigorosamente agitado com os respectivos aditivos por 5 minutos. Posteriormente, o solo foi umedecido com água destilada até atingir 40% da umidade teórica, sendo misturado uniformemente para assegurar consistência de umidade em todas as amostras. Tais amostras foram depois mantidas em repouso por 24 horas em frascos vedados e em ambiente sem incidência de luz.

Após esse período, cerca de 30g de massa seca de solo foram distribuídos em placas de Petri de plástico, com aproximadamente 15 cm de diâmetro. Sobre o solo, foram colocados papéis de filtro, onde se adicionou 10 sementes em cada réplica. As sementes foram previamente lavadas com água destilada e secas ao ar. As placas foram mantidas no escuro por 132 horas, com contagens realizadas das sementes germinadas após 48 horas e 96 horas do início do experimento e medição final da parte aérea e raiz utilizando um paquímetro digital da marca Digimess.

Com base nos dados coletados, foi calculada a porcentagem de germinação, germinação relativa e o crescimento radicular relativo, como descrito por Luo et al. (2018) e Marmiroli et al. (2022).

ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade dos resíduos e ao teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias. Quando as premissas de normalidade foram atendidas, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o teste post-hoc de Tukey para identificar diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ($p < 0,05$). Quando as premissas não foram cumpridas, aplicaram-se o teste de Kruskal-Wallis e o teste de Wilcoxon.

Todas as análises foram realizadas utilizando o software R v. 4.3.2 por meio da interface do RStudio (R CORE TEAM, 2023).

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A caracterização geotécnica e as análises físico-químicas do solo estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Características físico-químicas do solo coletado

Parâmetro	Resultado
Areia (%)	52
Silte (%)	22
Argila (%)	26
Densidade real dos grãos (g cm^{-3})	2,67
Limite de Liquidez (%)	42,7
Limite de Plasticidade (%)	28,0
Índice de Plasticidade (%)	14,7
pH	$4,5 \pm 0,1$
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	$38,6 \pm 1,9$
Cloreto (mg L^{-1})	$4,0 \pm 2,2$
Nitrogênio amoniacal (mg L^{-1})	$0,31 \pm 0,09$
Carbono orgânico total (mg g^{-1})	$0,28 \pm 0,04$
Matéria orgânica (%)	$3,9 \pm 1,5$

O solo em questão foi classificado como areia argilosa (SC) conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e demonstrou um pH baixo, característico dos solos brasileiros. As análises físico-químicas realizadas não revelaram indícios de contaminação.

ENSAIO DE GERMINAÇÃO

Para todos os gráficos, os pontos representam a média, enquanto as barras os desvios padrão das quadruplicatas de tratamento. As diferentes letras representam diferença estatística significativa.

O resultado obtido na germinação das sementes está apresentado na figura 1.

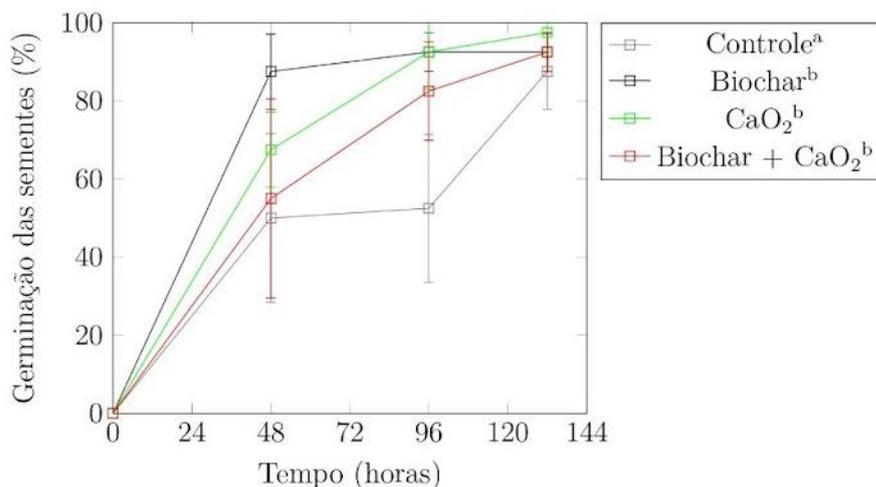


Figura 1: Germinação das sementes de alface ao longo das 132h para o controle e os tratamentos com biochar e peróxido de cálcio.

Com relação à germinação, foi observado que a adição de biochar, CaO₂ e biochar + CaO₂ incrementou a germinação, principalmente no início do ensaio. Comparando os dados de germinação durante todo o ensaio, somente houve diferença estatística entre o controle e todos os outros aditivos ($p < 0,05$).

Destaca-se que a adição do biocarvão estimulou que a germinação atingisse o pico já nas primeiras 48h, enquanto a germinação da amostra controle atingiu cerca de 50% do crescimento total neste mesmo período. No fim das 132h, os resultados de germinação das amostras submetidas aos tratamentos com os aditivos apresentaram maior germinação.

A germinação relativa das sementes está apresentada na figura 2.

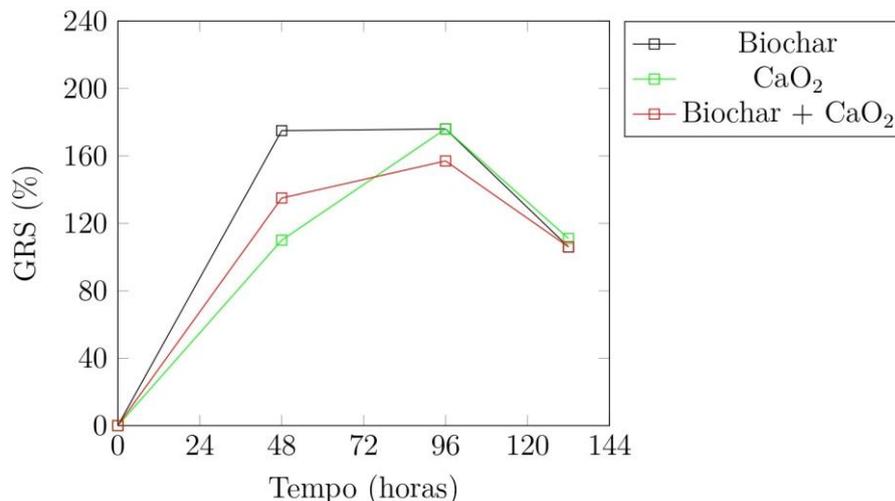


Figura 2: Germinação relativa das sementes de alfaca ao longo das 132h para os tratamentos com biochar e peróxido de cálcio.

O resultado observado no gráfico de germinação ao longo do tempo é corroborado e tornado mais explícito a partir da análise da germinação relativa. Observa-se que durante boa parte do ensaio, essa germinação relativa esteve acima de 100%, indicando possível fitoestímulo causado pelos aditivos avaliados. Uma possível hipótese sobre esse estímulo ao vegetal é a maior porosidade do biocarvão (REN et al., 2020) e a sua maior capacidade de retenção de água, aeração e de estimulação da atividade microbiana (LUCCHINI et al., 2014; MIA et al., 2014).

A avaliação da germinação relativa evidenciou claramente a influência dos aditivos nas características do solo examinado. Em todos os ensaios envolvendo biochar, peróxido e a combinação desses aditivos, os resultados foram superiores a 100% ao longo de todo o experimento.

O crescimento radicular relativo é observado na figura 3.

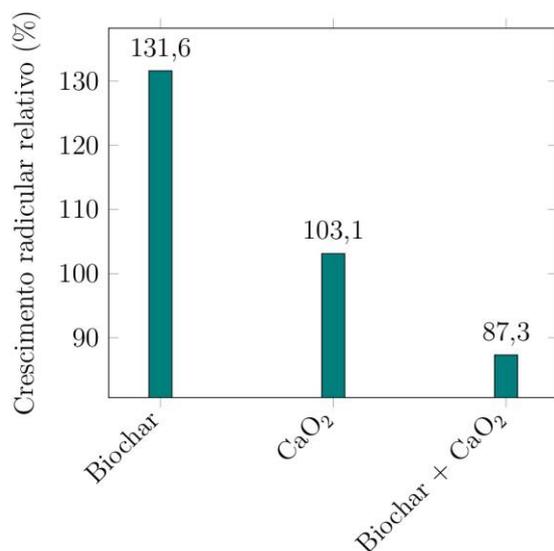
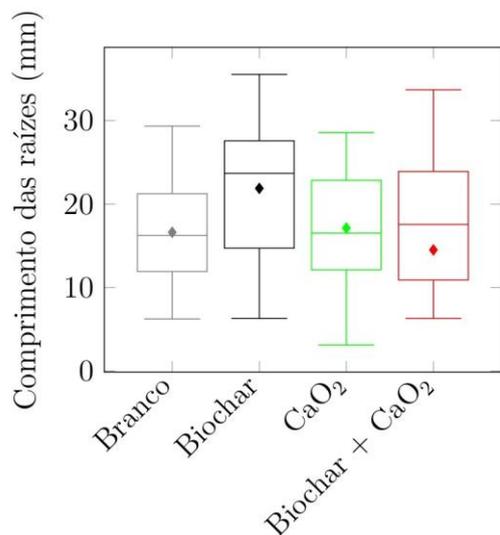


Figura 3: Crescimento radicular relativo para os tratamentos com biochar e peróxido de cálcio.



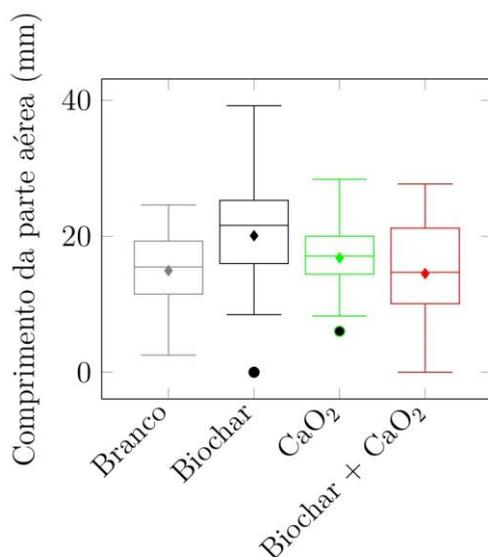
O resultado obtido permite observar que o biochar e o CaO_2 , individualmente, contribuem para o crescimento radicular da alface quando comparado ao controle. O crescimento foi de 131,6% para o biochar e 103,1% para o CaO_2 .

Os boxplots com os comprimentos radicular e aéreo estão apresentados nas figuras 4 e 5.



Legenda: ♦ = média, linha = mediana e • = "outliers"

Figura 4: Boxplot do comprimento radicular para o controle e os tratamentos com biochar e peróxido de cálcio.



Legenda: ♦ = média, a linha = mediana e • = "outliers"

Figura 5: Boxplot do comprimento da parte aérea para o controle e os tratamentos com biochar e peróxido de cálcio.



O peróxido de cálcio já fora previamente empregado para aumentar o oxigênio dissolvido em solos anóxicos sujeitos a alagamentos, sem evidência significativa de toxicidade (BAKER; HATTON, 1987; WANG et al., 2022; MEI et al., 2017). Este aditivo também demonstrou a capacidade de reduzir a toxicidade de compostos de compostagem imaturos (HIMANEN; HÄNNINEN, 2009).

Esses resultados alinham-se com as observações do presente estudo, onde não houve diferença estatística entre o controle e os tratamentos com CaO_2 para o crescimento da raiz e do caule. No entanto, foi notado um crescimento relativo radicular acima de 100%, indicando possível fitoestímulo, o que sugere um estímulo ao crescimento das plantas. Somente foi observada diferença estatística significativa ($p < 0,05$) para o teste com a adição do biocarvão ao solo. Esse padrão foi observado tanto para a parte aérea, quanto para a raiz.

A toxicidade do biochar está associada à biomassa do biocarvão, processos de produção e a proporção aplicada no solo, assim como as características do próprio solo (GODLEWSKA, et al., 2021; GASCO et al., 2016). Esses mesmos parâmetros desempenham um papel importante quando se busca reduzir a toxicidade de solos contaminados com adição do biochar (KOŁTOWSKI; OLESZCZUK, 2016).

O biocarvão de eucalipto aplicado mostrou-se capaz de aumentar o crescimento das raízes e do caule, além de acelerar o processo de germinação. Isso indica que até mesmo biocarvões produzidos de maneira rústica, como em fornos do tipo "rabo quente", podem apresentar propriedades fitoestimulantes.

CONCLUSÕES

O solo coletado em bacia de contenção de tanque de armazenamentos de hidrocarbonetos de petróleo é ácido e não apresenta indícios de contaminação. Os ensaios de germinação indicaram que o solo não oferece condições ideais para o cultivo.

Notavelmente, o peróxido de cálcio demonstrou estimular uma germinação mais eficiente das sementes de alface, tanto individualmente quanto em combinação com o biochar. Entretanto, a aplicação conjunta de peróxido de cálcio e biochar pareceu impactar negativamente o crescimento radicular, com um crescimento relativo de 87,3%. Essa observação é corroborada pelos dados brutos, revelando uma média inferior ao controle no solo onde ocorreu a coaplicação de biochar e peróxido de cálcio.

Destaca-se que apenas a adição de biochar resultou em diferença significativa no crescimento das raízes e dos caules de alface, com um aumento notável em ambas as métricas. Desta forma, é possível concluir que o biocarvão produzido a partir de biomassa de eucalipto tem efeito fitoestimulante em sementes de alface.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio fornecido ao longo desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Dados estatísticos. 2024. Disponível em <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>>. Acesso em: 18 fev. 2024
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
6. BAKER, A. M.; HATTON, W. Calcium peroxide as a seed coating material for padi rice: III glasshouse trials. *Plant and Soil*, Springer, v. 99, p. 379–386, 1987.



7. BRASIL. Ministério das Minas de Energia. Balanço energético Nacional 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2023>>, acessado em 04/06/2024.
8. GASCO, G. et al. Relation between biochar properties and effects on seed germination and plant development. *Biological Agriculture & Horticulture*, Taylor & Francis, v. 32, n. 4, p. 237–247, 2016.
9. GODLEWSKA, P.; OK, Y. S.; OLESZCZUK, P. The dark side of black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 403, p. 123833, 2021.
10. GUIRADO, M. et al. Effectiveness of biochar application and bioaugmentation techniques for the remediation of freshly and aged diesel-polluted soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Elsevier, v. 163, p. 105259, 2021.
11. HIMANEN, M.; HÄNNINEN, K. Effect of commercial mineral-based additives on composting and compost quality. *Waste management*, Elsevier, v. 29, n. 8, p. 2265–2273, 2009.
12. HUNG, C.-M. et al. Degradation of 4-nonylphenol in marine sediments using calcium peroxide activated by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)-derived biochar. *Environmental Research*, Elsevier, v. 211, p. 113076, 2022.
13. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Manual de construção e operação do forno rabo-quente. Natal, 1999. 24 p.
14. JIANG, Y. F. et al. Impact of biochar produced from post-harvest residue on the adsorption behavior of diesel oil on loess soil. *Environmental geochemistry and health*, Springer, v. 38, p. 243–253, 2016.
15. KOŁTOWSKI, M.; OLESZCZUK, P. Effect of activated carbon or biochars on toxicity of different soils contaminated by mixture of native polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Wiley Online Library, v. 35, n. 5, p. 1321–1328, 2016.
16. LI, X. et al. Combined effects of maize straw biochar and oxalic acid on the dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structures in soil: a mechanistic study. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 364, p. 325–331, 2019.
17. LU, S.; ZHANG, X.; XUE, Y. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: a review. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 337, p. 163–177, 2017.
18. LUCCHINI, P.; QUILLIAM, R. S.; DELUCA, T. H.; VAMERALI, T.; JONES, D. L. Increased bioavailability of metals in two contrasting agricultural soils treated with waste wood-derived biochar and ash. *Environ. Sci. Pollut. Res. V.* 21, p. 3230–3240, 2014.
19. LUO, Y. et al. Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, Elsevier, v. 71, p. 109–114, 2018.
20. MARMIROLI, M. et al. Building a risk matrix for the safety assessment of wood derived biochars. *Science of the Total Environment*, Elsevier, v. 839, p. 156265, 2022.
21. MEI, J. et al. Seed pelleting with calcium peroxide improves crop establishment of direct-seeded rice under waterlogging conditions. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 7, n. 1, p. 4878, 2017.
22. MIA, S. et al. Biochar application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability. *Agriculture, ecosystems & environment*, Elsevier, v. 191, p. 83–91, 2014.
23. OLESZCZUK, P.; KOŁTOWSKI, M. Effect of co-application of nano-zero valent iron and biochar on the total and freely dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons removal and toxicity of contaminated soils. *Chemosphere*, Elsevier, v. 168, p. 1467–1476, 2017.
24. USEPA. Ecological effects test guidelines. OCSPP 850.4100, Seedling Emergence and Growth. Washington, DC, 2012.
25. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 fev, 2024.
26. REN, H.-Y.; WEI, Z.-J.; WANG, Y.; DENG, Y.-P.; LI, M.-Y.; WANG, B. Effects of biochar properties on the bioremediation of the petroleum-contaminated soil from a shale-gas field. *Environ Sci Pollut Res.*, v. 27, p. 36427–36438, 2020.
27. RICE, E. W. et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. [S.l.]: American public health association Washington, DC, 2012. v. 10.
28. SHEN, C. et al. Controlled synthesis of innovative carbon-based CaO₂ materials with boosted oxygen release performance in the aqueous environment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier, v. 11, n. 3, p. 109616, 2023.
29. SONG, Y.; BIAN, Y.; WANG, F.; XU, M.; NI, N.; YANG, X.; GU, C.; JIANG, X. Dynamic effects of biochar on the bacterial community structure in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. *J. Agric. Food. Chem.*, v. 65, p. 6789–6796, 2017.



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



30. WANG, Y. et al. Remediation of petroleum-contaminated soil using bulrush straw powder, biochar and nutrients. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, Springer, v. 98, p. 690–697, 2017.
31. WANG, Z. et al. Calcium peroxide alleviates the waterlogging stress of rapeseed by improving root growth status in a rice-rape rotation field. *Frontiers in Plant Science*, Frontiers, v. 13, p. 1048227, 2022.
32. WANG, C.; YANG, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, Z.; CAI, Z. PAHs and heavy metals in the surrounding soil of a cement plant Co-Processing hazardous waste. *Chemosphere*. [S. l.]: Elsevier BV, nov. 2018. DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.06.177. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.177>.
33. WEI, Z.; WANG, J. J.; GASTON, L. A.; LI, J.; FULTZ, L. M.; DELAUNE, R. D.; DODLA, S. K. Remediation of crude oil-contaminated coastal marsh soil: Integrated effect of biochar, rhamnolipid biosurfactant and nitrogen application. *J. Hazard. Mater.*, 2020a.
34. WOJTYLA, Ł.; LECHOWSKA, K.; KUBALA, S.; GARNCZARSKA, M. Different Modes of Hydrogen Peroxide Action During Seed Germination. *Frontiers in Plant Science*. [S. l.]: Frontiers Media SA, 4 fev. 2016. DOI 10.3389/fpls.2016.00066. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2016.00066>.
35. ZHANG, B.; ZHANG, L.; ZHANG, X. Bioremediation of petroleum hydrocarbon- contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *RSC advances*, Royal Society of Chemistry, v. 9, n. 60, p. 35304–35311, 2019.
36. ZHU, X. et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental pollution*, Elsevier, v. 227, p. 98–115, 2017.