

APLICAÇÃO DE FERRITAS SUPORTADAS EM BIOCHAR NO TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS RESIDUAIS VIA PROCESSO FOTO-FENTON SOLAR

Jandira Leichtweis^{1,2,3*}

Leticia Fabris²

Elvis Carissimi²

Luis G. Ramírez Mérida³

Salatiel Wohlmuth Da Silva¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPG-IPH), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Av. Roraima, 1000, 97105-900 Santa Maria, RS, Brasil.

³ Ingeniería en Agua y Desarrollo Sostenible, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), ITR-CS, Francisco Antonio Maciel s/n esq. Luis Morquio, Durazno, CP 97000, Uruguay.

Resumo: No contexto do desenvolvimento sustentável e da crescente geração de águas residuais contendo contaminantes recalcitrantes, a busca por tecnologias de tratamento eficientes e ambientalmente amigáveis torna-se essencial. Neste estudo, biochar derivado de resíduos de café, um abundante resíduo agroindustrial, foi utilizado como suporte sustentável para $ZnFe_2O_4$ e $CoFe_2O_4$. Os compósitos obtidos foram avaliados como fotocatalisadores na degradação de Rodamina B sob condições de foto-Fenton solar, destacando seu potencial para aplicação no tratamento de águas residuais utilizando fontes renováveis de energia. Os materiais foram sintetizados pela ancoragem de nanopartículas de $ZnFe_2O_4$ ou $CoFe_2O_4$ na superfície do biochar. Suas propriedades estruturais e morfológicas foram confirmadas por análises de DRX, SEM e EDS. Os compósitos $ZnFe_2O_4$ /biochar e $CoFe_2O_4$ /biochar alcançaram eficiências de degradação de 100% e 65% em 60 minutos, respectivamente. Além de proporcionar boa atividade fotocatalítica, o biochar representa uma alternativa sustentável por utilizar resíduos agroindustriais em processos de tratamento, agregando valor a materiais que seriam descartados.

Palavras-chave: Biochar de café; $ZnFe_2O_4$ /biochar; $CoFe_2O_4$ /biochar; degradação sob luz solar; poluente emergente.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

APPLICATION OF BIOCHAR-SUPPORTED FERRITES FOR THE SUSTAINABLE TREATMENT OF WASTEWATER VIA THE SOLAR PHOTO-FENTON PROCESS

Abstract: In the context of sustainable development and the increasing generation of wastewater containing recalcitrant contaminants, the search for efficient and environmentally friendly treatment technologies has become essential. In this study, biochar derived from coffee grounds, an abundant agro-industrial residue, was used as a sustainable support for ZnFe_2O_4 and CoFe_2O_4 . The obtained composites were evaluated as photocatalysts for the degradation of Rhodamine B under solar photo-Fenton conditions, highlighting their potential application in wastewater treatment using renewable energy sources. The materials were synthesized by anchoring ZnFe_2O_4 or CoFe_2O_4 nanoparticles onto the biochar surface. Their structural and morphological properties were confirmed by XRD, SEM, and EDS analyses. The ZnFe_2O_4 /biochar and CoFe_2O_4 /biochar composites achieved degradation efficiencies of 100% and 65% within 60 min, respectively. In addition to providing good photocatalytic activity, biochar represents a sustainable alternative by enabling the use of agro-industrial residues in treatment processes, adding value to materials that would otherwise be discarded.

Keywords: coffee biochar; ZnFe_2O_4 /biochar; CoFe_2O_4 /biochar; Solar light degradation; emergent pollutant.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável está fundamentado na integração equilibrada de seus três principais pilares: ambiental, social e econômico. As expectativas da sociedade em relação à sustentabilidade, transparência e responsabilidade institucional têm se intensificado, impulsionadas por regulamentações cada vez mais rigorosas e pelo aumento das pressões ambientais. Entre essas pressões destacam-se a poluição, o uso ineficiente dos recursos naturais, a gestão inadequada de resíduos, as mudanças climáticas, a degradação dos ecossistemas e a acelerada perda da biodiversidade. Esses desafios demandam abordagens interdisciplinares e estratégias de longo prazo voltadas à sustentabilidade (Bueloth et al., 2026). Entre as preocupações ambientais mais relevantes está a ampla contaminação de águas residuais por corantes. Esses compostos têm sido frequentemente detectados em solos e diferentes corpos hídricos em concentrações que frequentemente excedem os limites regulatórios de descarte (Alsufyani et al., 2026; Cen et al., 2026). Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para a degradação eficiente de corantes em águas residuais torna-se essencial.

Os processos oxidativos avançados (POAs) têm sido amplamente reconhecidos pela elevada eficiência na degradação e mineralização de poluentes recalcitrantes (Wu et al., 2025). Entre eles, o processo foto-Fenton heterogêneo destaca-se pela geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) altamente reativos e não seletivos a partir da interação entre um poderoso agente oxidante (H_2O_2), um catalisador a base de ferro sob irradiação (Lima et al., 2025; Fenton, 1894). Além disso, sistemas heterogêneos permitem a recuperação e reutilização do catalisador, reduzindo a formação de lodo férrico em

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

comparação aos processos homogêneos convencionais. Entre os materiais catalíticos aplicados em processos foto-Fenton, as ferritas têm recebido destaque devido à sua elevada eficiência fotocatalítica e capacidade de absorção de luz visível. Entretanto, limitações como a recombinação de pares elétron-lacuna (e^-/h^+) e a aglomeração de partículas podem reduzir sua eficiência de degradação (Leichtweis et al., 2025). Para minimizar esses efeitos, a utilização de suportes carbonáceos, como o biochar, tem se mostrado uma estratégia promissora. Produzido a partir da pirólise de resíduos de biomassa, o biochar apresenta elevada área superficial e abundantes grupos funcionais, favorecendo a dispersão das ferritas e a separação de pares e^-/h^+ , aumentando assim, a eficiência do processo (Liu et al., 2025).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar materiais fotocatalíticos sustentáveis baseados em ferritas suportadas em biochar para aplicação no tratamento de águas residuais. Para isso, biochar derivado de resíduos de borra de café foi utilizado como suporte para $ZnFe_2O_4$ e $CoFe_2O_4$, e os compósitos obtidos foram avaliados na degradação de Rodamina B utilizando o processo foto-Fenton solar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Nitrato de ferro III ($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$), nitrato de zinco II ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) e nitrato de cobalto II ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) foram utilizados como precursores para a síntese de $ZnFe_2O_4$ e $CoFe_2O_4$. O biochar foi produzido a partir de borra de café coletada na Universidade Federal de Santa Maria e utilizado como suporte para as ferritas. Rodamina B foi empregada como contaminante modelo, e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agente oxidante no processo foto-Fenton heterogêneo. A caracterização e os experimentos fotocatalíticos foram conduzidos utilizando técnicas e equipamentos laboratoriais convencionais. Todos os experimentos foram realizados em triplicata para garantir a reprodutibilidade.

2.2. Sínteses

O biochar foi produzido por pirólise da biomassa de borra de café. As ferritas puras de $ZnFe_2O_4$ e $CoFe_2O_4$ foram sintetizadas pelo método de co-precipitação. Os compósitos $ZnFe_2O_4$ /biochar e $CoFe_2O_4$ /biochar também foram obtidos por co-precipitação, utilizando proporção 1:1 entre ferrita e biochar, conforme apresentado na Figura 1.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

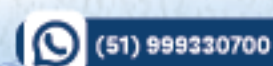
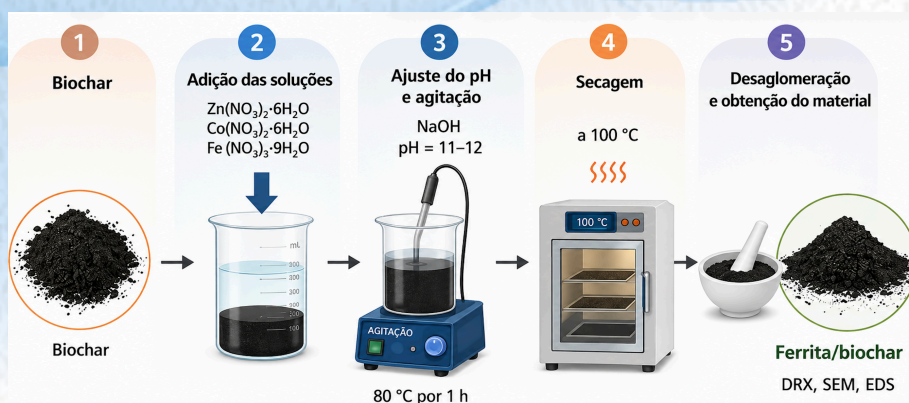


Figura 1 – Síntese dos materiais fotocatalíticos.



2.3. Técnicas de caracterização

A caracterização dos materiais foi realizada por difração de raios X (DRX) utilizando um difratômetro Rigaku Miniflex 300 com radiação Cu-K α , operando a 30 kV e 10 mA, passo de $0,03^\circ$ (2θ) e tempo de contagem de 0,3 s por passo. As análises de microscopia eletrônica de varredura (SEM) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) foram realizadas em microscópio eletrônico Tescan-VEGA3, utilizando tensão de aceleração de 5 kV e resolução de 137 eV.

2.4. Processo foto-Fenton solar

Uma solução de Rodamina B (10 mg L^{-1}) foi utilizada nos experimentos fotocatalíticos. O pH foi ajustado para 3, e 1 g L^{-1} dos fotocatalisadores ZnFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$ e $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$ foram adicionados à solução. O processo foto-Fenton solar foi iniciado com a adição de $100 \mu\text{L}$ de H_2O_2 e exposição à luz solar. A degradação do corante foi monitorada por espectrofotometria UV-Vis ao longo de 60 min, com coletas realizadas a cada 15 min. Após as reações, as amostras foram centrifugadas para remoção do fotocatalisador. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização dos materiais fotocatalíticos

As análises de DRX revelaram as fases cristalinas e amorfas dos materiais sintetizados (Figura 2). O pico amorfo com intensidade máxima em aproximadamente $2\theta = 25,00^\circ$ foi atribuído ao biochar; esse pico é característico de materiais contendo carbono amorfo (Chakhtouna et al., 2023). Os padrões de DRX de CoFe_2O_4 são consistentes com resultados previamente reportados na literatura (Kumar Sahu et al., 2022). A presença dos planos (111), (220), (311), (400), (422), (511) e (440), correspondentes aos picos de difração em $2\theta = 18,28^\circ$, $29,89^\circ$, $35,34^\circ$, $42,88^\circ$, $53,57^\circ$, $56,93^\circ$ e $62,63^\circ$, foi observada. O

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



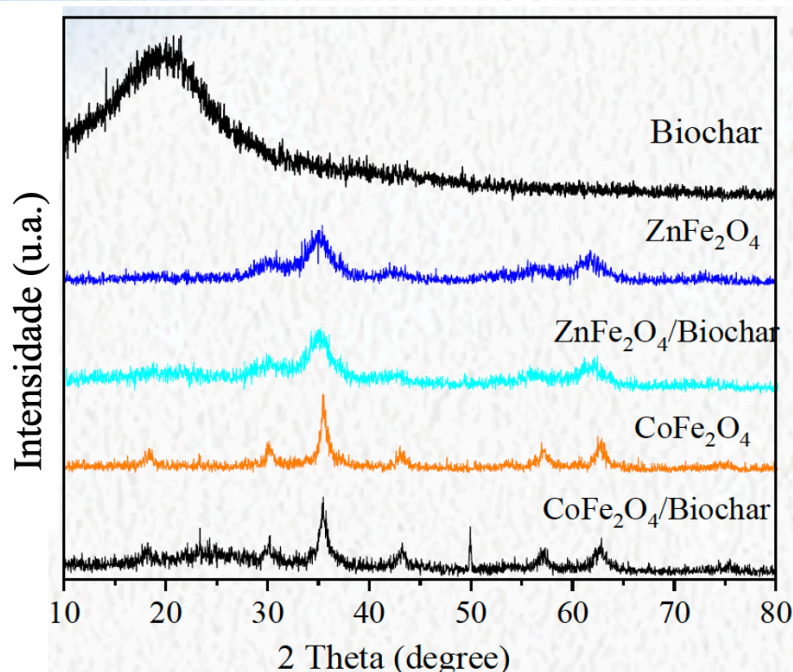
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

compósito CoFe_2O_4 /biochar apresentou os principais picos característicos dos materiais constituintes, embora com intensidades reduzidas. Para o ZnFe_2O_4 puro, os picos de difração observados em $2\theta = 29,7^\circ, 35,3^\circ, 42,5^\circ, 52,7^\circ, 56,4^\circ$ e $61,5^\circ$ correspondem aos planos (220), (311), (400), (422), (511) e (440), respectivamente (carta JCPDS nº 22-1012), indicando a formação bem-sucedida de ZnFe_2O_4 (Guo et al., 2022). Os principais picos de difração de ZnFe_2O_4 e biochar também podem ser observados no compósito ZnFe_2O_4 /biochar.

Figura 2 – Dados de DRX do biochar, ZnFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 /biochar, CoFe_2O_4 e CoFe_2O_4 /biochar.



As morfologias dos fotocatalisadores foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (SEM), conforme mostrado na Figura 3. As Figuras 3 (a) e (c) representam o ZnFe_2O_4 e o CoFe_2O_4 puros, respectivamente. As ferritas apresentam partículas aglomeradas, o que pode ser atribuído às suas propriedades magnéticas (Atacan, 2019). Em contraste, o biochar puro (Figura 3 (c)) apresenta estrutura irregular e porosa, típica de materiais carbonáceos derivados de resíduos de biomassa (Leichtweis et al., 2023; Pi et al., 2019). Para os materiais suportados, os compósitos ZnFe_2O_4 /biochar e CoFe_2O_4 /biochar (Figura 3 (d) e (e), respectivamente), demonstram que as partículas de ferrita estão uniformemente dispersas e ancoradas na superfície do biochar. A matriz de biochar provavelmente dificulta a agregação das partículas de ferrita devido às interações entre as fases de ferrita e os grupos funcionais presentes na superfície do biochar (Lai et al., 2019). As composições elementares das ferritas, do biochar e dos compósitos obtidos foram determinadas por análise EDS e estão resumidas na Tabela 1. Os resultados confirmam a presença de todos os elementos constituintes das ferritas e do biochar nos compósitos sintetizados, indicando a incorporação bem-sucedida de cada componente.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 3 – Imagens de SEM de: (a) ZnFe_2O_4 , (b) biochar, (c) CoFe_2O_4 , (d) $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$ e (e) $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$.

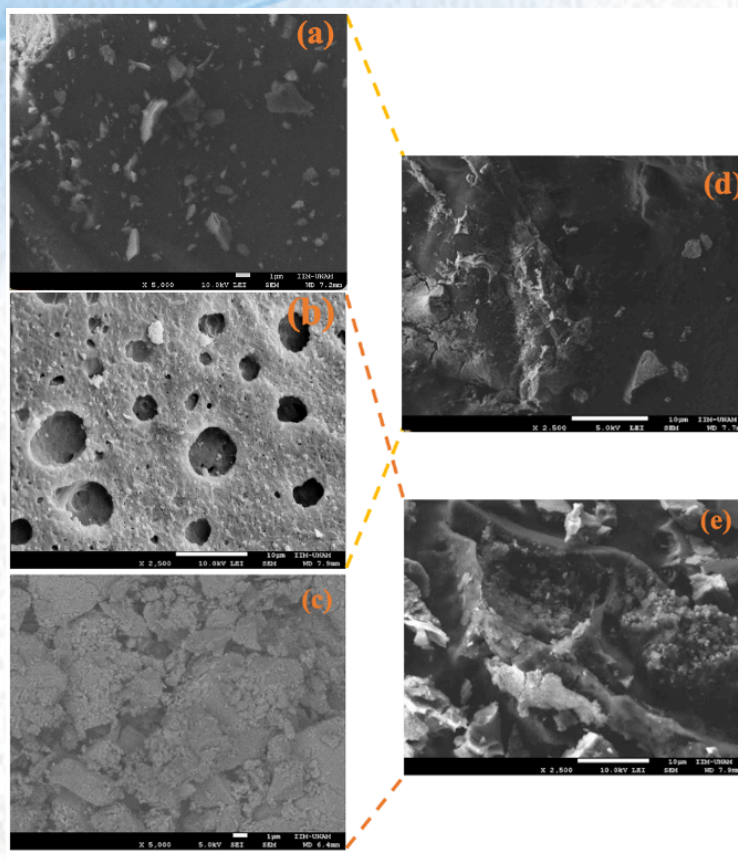


Tabela 1 – Análise por EDS do biochar, ZnFe_2O_4 , $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$, CoFe_2O_4 e $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$.

Amostras	Peso (%)				
	C	O	Fe	Zn	Co
Biochar	86.9	13.1	-	-	-
ZnFe_2O_4	-	25.88	46.83	27.29	-
$\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$	61.73	16.61	14.41	7.25	-
CoFe_2O_4	-	25.06	44.07	-	30.87
$\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$	51.97	23.48	17.07	-	7.48

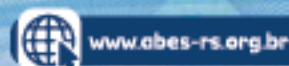
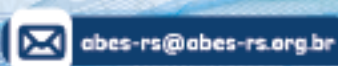
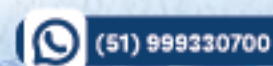
Realização



Correalizadores



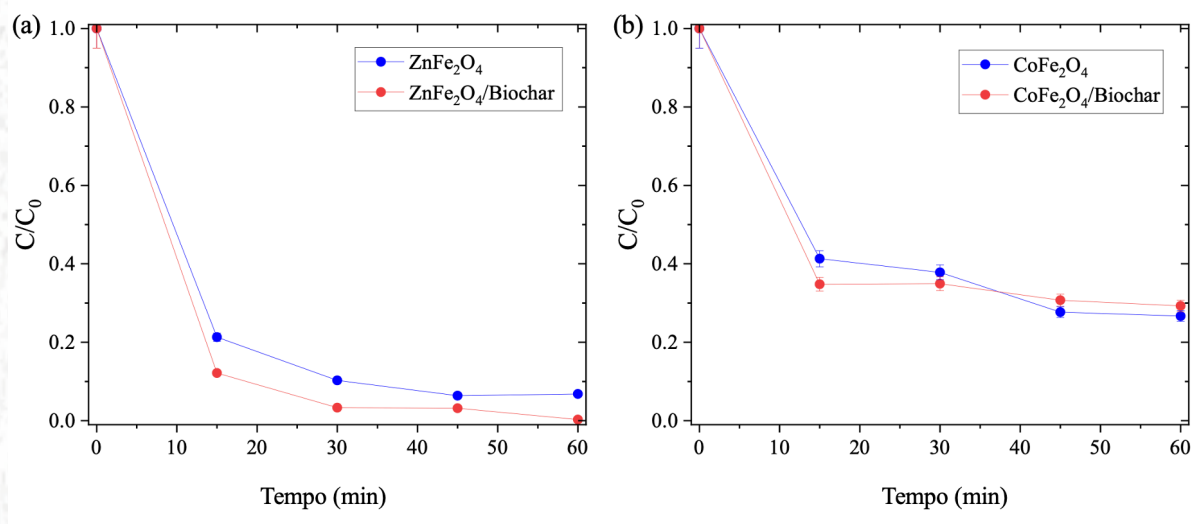
Apoio Institucional



3.2 Processo foto-Fenton solar

A Figura 4 apresenta a descoloração da Rodamina B utilizando ferritas puras e compósitos suportados em biochar sob irradiação solar. Conforme mostrado na Figura 4 (a), o ZnFe_2O_4 e o compósito $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$ alcançaram aproximadamente 90% e 100% de degradação do corante após 60 min de reação, respectivamente. Na Figura 4 (b), CoFe_2O_4 e $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{biochar}$ apresentaram menores eficiências, atingindo cerca de 68% e 70%. Embora a incorporação do biochar não tenha promovido aumento significativo na eficiência de descoloração, seu uso permanece vantajoso devido à sua origem sustentável a partir de resíduos de biomassa. Além disso, a formação dos compósitos pode melhorar o desempenho fotocatalítico ao reduzir a recombinação e^-/h^+ e diminuir a energia de band gap, favorecendo a ativação do catalisador sob luz visível/solar (Leichtweis et al., 2023a; Chen et al., 2019). A atividade fotocatalítica observada também pode ser atribuída a um mecanismo de fotossensibilização, no qual a Rodamina B absorve radiação visível ($\text{RhB} + h\nu \rightarrow \text{RhB}^*$), gerando espécies excitadas capazes de injetar elétrons na banda de condução do semiconductor. Esses elétrons podem reduzir Fe^{3+} a Fe^{2+} ($e^- + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$), promovendo o ciclo foto-Fenton. Adicionalmente, a regeneração de Fe^{2+} pode ocorrer pela redução foto-assistida de complexos hidroxilados férricos ($\text{Fe}(\text{OH})^{2+} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \bullet\text{OH}$), contribuindo para a geração de radicais hidroxila altamente reativos ($\bullet\text{OH}$) (Leichtweis et al., 2021; Li et al., 2021; Sahar et al., 2017). Em conjunto, esses processos favorecem a separação de cargas e aumentam a eficiência de degradação do corante. O uso da irradiação solar é particularmente vantajoso devido à sua ampla faixa espectral, elevada disponibilidade e baixo custo, possibilitando o aproveitamento eficiente da luz visível.

Figura 4 – Resultados da degradação de Rodamina B obtidos no processo foto-Fenton solar.



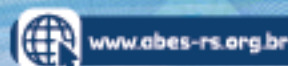
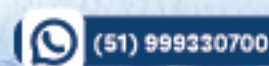
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, biochar derivado de resíduos de café foi utilizado como suporte sustentável para ferritas de ZnFe_2O_4 e CoFe_2O_4 , demonstrando potencial no desenvolvimento de sistemas fotocatalíticos eficientes. Os resultados de caracterização (DRX, SEM/EDS) confirmaram a síntese bem-sucedida e a adequada integração das fases de ferrita à superfície do biochar. Os compósitos obtidos apresentaram desempenho promissor na degradação de Rodamina B sob condições de foto-Fenton solar, com ZnFe_2O_4 /biochar alcançando degradação completa e CoFe_2O_4 /biochar apresentando eficiência moderada em 60 minutos. A atividade fotocatalítica aprimorada pode ser atribuída à presença de abundantes grupos funcionais na superfície do biochar, que favorecem a interação entre o catalisador e as espécies reativas, além de facilitar os processos de transferência de carga. Além disso, o uso do biochar como material suporte representa uma abordagem sustentável, ao valorizar resíduos agroindustriais e simultaneamente melhorar o desempenho fotocatalítico. A aplicação da irradiação solar reforça ainda mais as vantagens ambientais e econômicas do processo, oferecendo uma alternativa renovável e de baixo custo às fontes artificiais de luz.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

REFERÊNCIAS

- Alsufyani, H., Alkabli, J., Almulaiky, Y.Q., 2026. Sustainable hybrid magnetic–carbon–polymer supports for horseradish peroxidase immobilization and dye degradation. *Surfaces and Interfaces* 87, 108976. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.108976>
- Bueloth, M.R., Pantaleón, A.J.S., Visalot, J.P., Esparza–Huamanchumo, R.M., 2026. Community participation, governance, and environmental education as drivers of local sustainable development: Tutumberos community, Peruvian Amazon. *World Development Sustainability* 8, 100283. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2026.100283>
- Chakhtouna, H., Benzeid, H., Zari, N., Qaiss, A. el kacem, Bouhfid, R., 2023. Microwave-assisted synthesis of MIL–53(Fe)/biochar composite from date palm for ciprofloxacin and ofloxacin antibiotics removal. *Separation and Purification Technology* 308, 122850. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122850>
- Cen, H., Zhu, W., Li, Y., Song, Y., Xu, Z., Tan, P., Cao, S., Gao, Y., Huang, Y., 2026. Recyclable dye-sensitized TiO_2 composite membranes with interfacial spectral complementarity for sustainable white-light-driven dye degradation. *RSC Advances* 16, 7590–7602. <https://doi.org/10.1039/d5ra09829g>

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Chen, D., Wang, X., Zhang, X., Yang, Y., Xu, Y., Qian, G., 2019. Facile fabrication of mesoporous biochar/ZnFe₂O₄ composite with enhanced visible-light photocatalytic hydrogen evolution. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 19967–19977. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.021>

Fenton, H.J.H., 1894. LXXIII.—Oxidation of tartaric acid in presence of iron. *J. Chem. Soc., Trans.* 65, 899–910. <https://doi.org/10.1039/CT8946500899>

Guo, W., Huang, L., Liu, X., Wang, J., Zhang, J., 2022. Enhanced isoprene gas sensing performance based on p-CaFe₂O₄/n-ZnFe₂O₄ heterojunction composites. *Sensors and Actuators B: Chemical* 354, 131243. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131243>

Kumar Sahu, A., Aravind, R., Sankhar Brahma, G., 2022. Synthesis and investigation of structural, morphological, thermal behaviour, and magnetic properties of CoFe₂O₄-MnO₂ nano-composites. *Materials Today: Proceedings* 49, 1762–1768. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.010>

Lai, C., Huang, F., Zeng, G., Huang, D., Qin, L., Cheng, M., Zhang, C., Li, B., Yi, H., Liu, S., Li, L., Chen, L., 2019. Fabrication of novel magnetic MnFe₂O₄/bio-char composite and heterogeneous photo-Fenton degradation of tetracycline in near neutral pH. *Chemosphere* 224, 910–921.

Leichtweis, J., Ferreira Piazzzi Fuhr, A.C., Welter, N., Ramírez Mérida, L.G., Carissimi, E., 2025. Photo-Fenton Process for the Degradation of Methyl Orange, Methylene Blue and Tartrazine Present in Wastewater Using a Green Composite Based on Chitin Biochar and ZnFe₂O₄. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03114-5>

Leichtweis, J., Silvestri, S., Welter, N., Vieira, Y., Zaragoza-Sánchez, P.I., Chávez-Mejía, A.C., Carissimi, E., 2021. Wastewater containing emerging contaminants treated by residues from the brewing industry based on biochar as a new CuFe₂O₄ / biochar photocatalyst. *Process Safety and Environmental Protection* 150, 497–509. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.041>

Leichtweis, J., Vieira, Y., Dotto, G.L., Carissimi, E., 2023. Chitin biochar as an effective and low-cost alternative for improving electron charge transfer of supported ZnFe₂O₄ during catalytic oxidation of high molar mass pollutants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 677, 132364. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132364>

Lima, K.V.L., de Jesus, J.H.F., Nogueira, R.F.P., 2025. Powerful sand photocatalyst for solar photo-Fenton degradation of antibiotics in wastewater treatment plant effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 13, 117658. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117658>

Pi, Z., Li, X., Wang, D., Xu, Q., Tao, Z., Huang, X., Yao, F., Wu, Y., He, L., Yang, Q., 2019. Persulfate activation by oxidation biochar supported magnetite particles for tetracycline removal: Performance and degradation pathway. *Journal of Cleaner Production* 235, 1103–1115.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Sahar, S., Zeb, A., Liu, Y., Ullah, N., Xu, A., 2017. Enhanced Fenton, photo-Fenton and peroxidase-like activity and stability over Fe₃O₄/g-C₃N₄ nanocomposites. Chinese Journal of Catalysis 38, 2110–2119. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62957-7](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62957-7)

Wu, M., Wang, C., Wang, R., Sun, P., Zhou, B., Xiong, Y., Dong, X., 2025. Piezocatalytic and photo/piezocatalytic enhancement of PDS-based AOP by MXene modified BiFeO₃ for efficient degradation of antibiotics. Separation and Purification Technology 376, 134067. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134067>

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br