DESENVOLVIMENTO DE NANOBIOCARVÃO PARA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR METAIS TÓXICOS

Gustavo Henrique Guimarães Coutinho [1]; Cleiton Aragão dos Santos [2]; Samir Hipólito dos Santos [3] ; Honnara Santos Granja [4] ; José Antônio Nascimento Melo [5]; Silvânio Silvério Lopes da Costa [6]; Carlos Alexandre Borges Garcia [7] ; Lisiane dos Santos Freitas [8] & Adnívia Santos Costa Monteiro [9]

RESUMO – Este trabalho tem como objetivo comparar as propriedades físico-químicas e o potencial adsortivo de remoção de chumbo (Pb^{2+}) do biocarvão convencional (BSU400) e do nanobiocarvão (NBSU400) produzidos a partir de semente de uva a 400 °C. As caracterizações por CHN e FTIR revelaram que a pirólise preservou grupos oxigenados e redes aromáticas, sendo que a nanoestruturação via moagem mecânica promoveu o rearranjo estrutural com maior exposição desses sítios ativos. Nos ensaios cinéticos, o equilíbrio foi alcançado em 720 minutos e 400 minutos para o BSU400 e NBSU400 respectivamente, evidenciando uma notável inversão de afinidade adsortiva controlada pelo pH devido à redução de escala. Enquanto o BSU400 exibiu melhor desempenho em pH 5,0 (Qe = 3,76 mg/g), sofrendo com a protonação em meio mais ácido, o nanobiocarvão NBSU400 obteve a capacidade máxima do estudo em pH 3,5 (Qe = 4,36 mg/g). Esse comportamento decorre da elevada densidade de carga em pH ácido que favorece a dispersão das nanopartículas, minimizando a autoaglomeração e maximizando a área superficial efetiva exposta. A análise de FTIR pós-adsorção confirmou um mecanismo sinérgico multifuncional regido por complexação superficial (-OH e C-O) e interação cátion-π (C=C). O NBSU400 consolida-se como tecnologia ecoeficiente de baixo custo promissora para a remediação de soluções aquosas ácidas contendo Pb(II), combinando elevada eficiência de remoção, baixo custo operacional e reduzido impacto ambiental.

ABSTRACT – This study aimed to compare the physicochemical properties and lead (Pb2+) adsorption removal potential of conventional biochar (BSU400) and nanobiochar (NBSU400) produced from grape seeds at 400 °C. CHN and FTIR characterizations revealed that pyrolysis preserved oxygenated groups and aromatic networks, whereas nanostructuring via mechanical milling promoted structural rearrangement with greater exposure of these active sites. In kinetic assays, equilibrium was reached within 720 minutes for BSU400 and 400 minutes for NBSU400, demonstrating a remarkable pH-controlled adsorption affinity inversion due to scale reduction. While BSU400 exhibited better performance at pH 5.0 (Qe = 3.76 mg/g), suffering from protonation in a more acidic medium, nanobiochar NBSU400 achieved the maximum capacity of

[1]) Graduando em Química Bacharelado, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. gustavo.henr2003@gmail.com
[2]) Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. cleitonaragao15@gmail.com
[3]) Professor Colaborador, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. *samirhipolito@gmail.com*
[4]) Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. ghonnara@gmail.com
[5]) Graduando em Química Bacharelado, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. janto.quimica@gmail.com
[6]) Pesquisador, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. silvanioslc@gmail.com
[7]) Pesquisador, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. carlosabgarcia@gmail.com
[8]) Professora, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. lisiane@academico.ufs.br
[9]) Professora Visitante, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, Brasil. *adnivia@academico.ufs.br*

the study at pH 3.5 (Qe = 4.36 mg/g). This behavior stems from the high charge density at acidic pH, which favors the dispersion of nanoparticles, minimizing self-aggregation and maximizing the exposed effective surface area. Post-adsorption FTIR analysis confirmed a multifunctional synergistic mechanism governed by surface complexation (-OH and C-O) and cation-pi interaction (C=C). NBSU400 consolidates as a promising low-cost, eco-efficient technology for the remediation of acidic aqueous solutions containing Pb(II), combining high removal efficiency, low operational cost, and reduced environmental impact.

Palavras-Chave – Economia Circular; Chumbo; Adsorção.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação de recursos hídricos por metais tóxicos é uma problemática ambiental devido à alta toxicidade, persistência e capacidade de bioacumulação desses elementos (WHO, 2024). Embora possuam origem natural, a inserção antrópica decorrente de atividades como galvanoplastia, mineração e fabricação de baterias e pigmentos é a principal fonte desses poluentes em sistemas aquáticos (Peng *et al*., 2020; Kamar *et al*., 2022; Monroy-Licht *et al*., 2025). Esse cenário é agravado em regiões que enfrentam escassez hídrica e variabilidade pluviométrica, como o Nordeste brasileiro, onde o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis alinhadas à bioeconomia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) é vital para garantir a segurança hídrica (Hama Aziz *et al*., 2023; Monteiro *et al.,* 2025).

Como alternativa a essa problemática, os biocarvões e nanobiocarvões derivados de resíduos agroindustriais destacam-se pela elevada porosidade, abundância de grupos funcionais superficiais e baixo custo de produção (XU *et al*., 2013). Contudo, o biocarvão convencional apresenta limitações operacionais, como área superficial específica reduzida e cinética de adsorção lenta em soluções diluídas ou competitivas (JAGADEESH; SUNDARAM, 2023; Jiang, M. *et al*., 2023). Essas restrições podem ser contornadas por meio da nanoestruturação, via moagem mecânica. A redução de escala promove um incremento expressivo na área superficial, reatividade e exposição de sítios ativos, conferindo ao nanobiocarvão maior seletividade e desempenho cinético superior frente às tecnologias tradicionais (Chausali, N. *et al*., 2021).

Nas indústrias metalúrgicas, de baterias automotivas e de fundição, os métodos convencionais mais empregados para a remoção de chumbo (Pb^{2+}) de seus efluentes baseiam-se na precipitação química por hidróxidos ou carbonatos, processos de coagulação-floculação e troca iônica. No entanto, essas técnicas tradicionais apresentam desvantagens severas, tais como a geração de elevados volumes de lodo tóxico secundário, cujo descarte é complexo e oneroso, alto

consumo de reagentes químicos e baixa eficiência quando o metal encontra-se em concentrações traço ou em meios altamente ácidos (Monroy-Licht *et al*., 2025). A integração de adsorventes carbonáceos nanoestruturados surge, portanto, como um método complementar de polimento capaz de otimizar os sistemas atuais, operando de forma eficiente em pH flutuante e reduzindo os custos operacionais (Hama Aziz *et al*., 2023).

Apesar do avanço nas pesquisas com materiais adsorventes, investigações comparativas utilizando a semente de uva como matriz ainda são escassas, especialmente sobre transformações físico-químicas antes e após o processo de adsorção. Diante disso, este trabalho tem como objetivo comparar a eficiência do biocarvão (BSU400) e do nanobiocarvão (NBSU400) de semente de uva para adsorção de íons de Pb(II) avaliando as modificações estruturais geradas na matriz antes e depois dos ensaios de adsorção, bem como validando seu potencial de aplicação no tratamento de soluções aquosas contaminados por metais tóxicos.

2. METODOLOGIA

2.1 Produção do biocarvão e nanobiocarvão

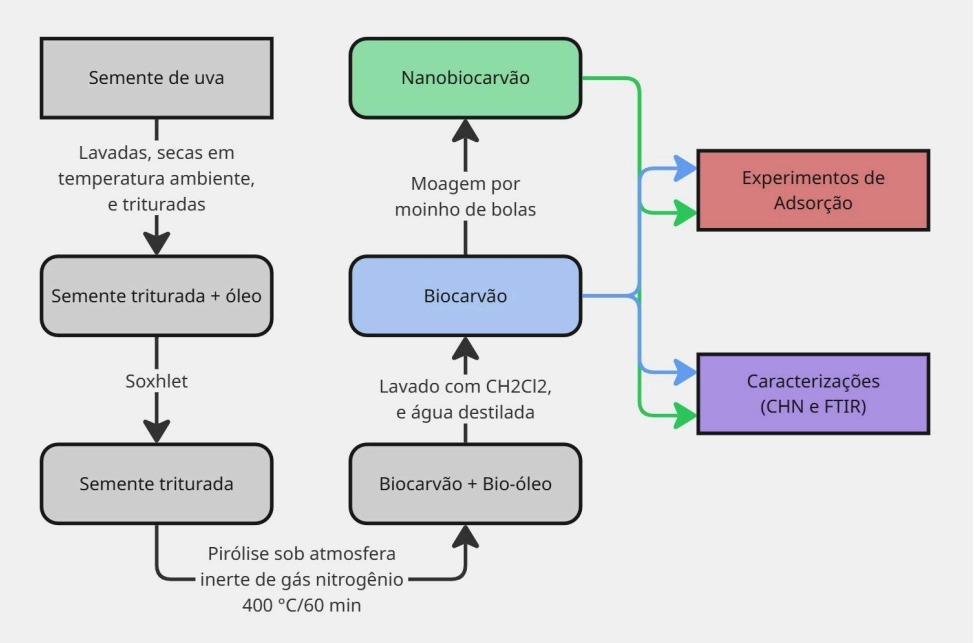


Figura 1: Preparo e produção do biocarvão e nanobiocarvão (Adaptado de GRANJA (2024))

2.2 Análise elementar (CHN)

A composição elementar dos biocarvões e nanobiocarvões, denominados BSU400 e NBSU400 respectivamente, foi determinada utilizando o analisador elementar CHN628, no Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM) da Universidade Federal de Sergipe (UFS). As

análises foram conduzidas sob atmosfera de hélio (99,995%) e oxigênio (99,99%), empregando temperaturas de 950 °C no forno primário e 850 °C no sistema afterburner. A calibração instrumental foi realizada com padrão de EDTA (41,0% C, 5,5% H e 9,5% N) considerando massas entre 10 e 200 mg. Para cada análise, foram utilizados aproximadamente 50 mg de amostra.

2.3 Análise de espectroscopia de infravermelho (FTIR)

Os grupos funcionais presentes dos materiais foram analisados pela técnica de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As análises foram realizadas no espectrômetro da Anton Paar Lyza 7000, operando no modo de Refletância Total Atenuada (ATR) com cristal de diamante. Os espectros foram coletados diretamente sobre as amostras sólidas na faixa de 400 a 4000 cm^{-1}, utilizando uma resolução de 4 cm^{-1} e um acúmulo de 24 varreduras para a obtenção de sinais com alta relação sinal-ruído.

2.4 Ensaios de adsorção

Os ensaios de adsorção foram realizados utilizando 0,2 g dos materiais BSU400 e NBSU400 em 250 mL de solução contendo Pb^{2+} na concentração de 3 mg L^{-1}, preparada a partir de solução padrão Scharlau (1000 mg L^{-1}), com valores de pH ajustados para 3,5 e 5,0. As suspensões permaneceram sob agitação constante de 175 rpm em incubadora de bancada refrigerada, sendo amostras coletadas em intervalos de tempo pré-determinados, compreendidos entre 0 e 1440 min. Posteriormente, as amostras foram filtradas e analisadas por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES). A capacidade de adsorção (Q) foi determinada conforme a Equação 1 (ZHANG *et al.*, 2012).

$$Q = \frac{C1-C2}{V} \quad (1)$$

O modelo de linguagem Gemini (Google) foi utilizado exclusivamente para revisão gramatical e aprimoramento da clareza textual deste trabalho.

3. RESULTADOS

Os perfis elementares da semente de uva in natura (SU), do BSU400 e do NBSU400 são apresentados na Figura 2. A biomassa, como esperado, exibiu menor teor de carbonificação e elevada fração de oxigênio (39,05%), característica de matrizes lignocelulósicas ricas em hemicelulose, celulose e lignina (Granja *et al.*, 2024). Após o tratamento térmico a 400 °C, observou-se que um incremento expressivo no teor de carbono fixo para ambos os biocarvões (70,3% para o BSU400 e 66,45 para o NBSU400), acompanhado por uma redução concomitante

nos teores de hidrogênio e oxigênio, decorrente a reações de desidratação, descarbonização e descarboxilação induzidas pela degradação térmica. Curiosamente, o processo de moagem para produção do NBSU400 resultou em um sutil decréscimo na fração de carbono e em um aumento relativo no teor de oxigênio quando comparado ao BSU400. Esse fenômeno decorre da redução de escala que promoveu uma maior exposição de grupos funcionais oxigenados na superfície externa do material, devido ao rearranjo estrutural e ao expressivo aumento da área superficial específica (Chaubey *et al.,* 2024).

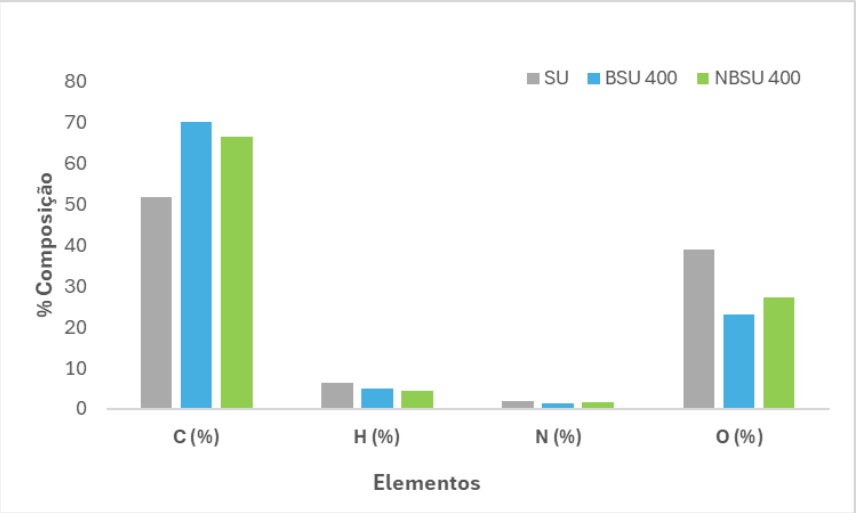


Figura 2: Composição elementar (percentual) dos componentes elementares da semente de uva (SU), biocarvão (BSU400) e nanobiocarvão (NBSU400).

Esse fenômeno é observado novamente nos espectros de FTIR apresentados na Figura 3, onde ambos os adsorventes pirolisados exibiram bandas características. A banda larga na região de 3650-3100 cm^{-1} é atribuída ao estiramento vibracional de grupos hidroxila (-OH), associados a fenóis, álcoois e ácidos carboxílicos remanescentes da decomposição incompleta. Na região de 3000-2840 cm^{-1}, identificam-se bandas discretas correspondentes aos estiramentos simétricos e assimétricos de ligações C-H alifáticas de grupos $-CH_3$ e $-CH_2$. Adicionalmente, a banda proeminente centrada na região de 1600 a 1500 cm^{-1} reflete o estiramento axial de ligações duplas carbono-carbono (C=C), confirmando a rede aromática estável. O sutil ganho de intensidade dessas bandas no espectro do NBSU400 confirmam que a síntese do nanobiocarvão potencializou a densidade de sítios ativos oxigenados e aromáticos acessíveis (Chaubey *et al.,* 2024).

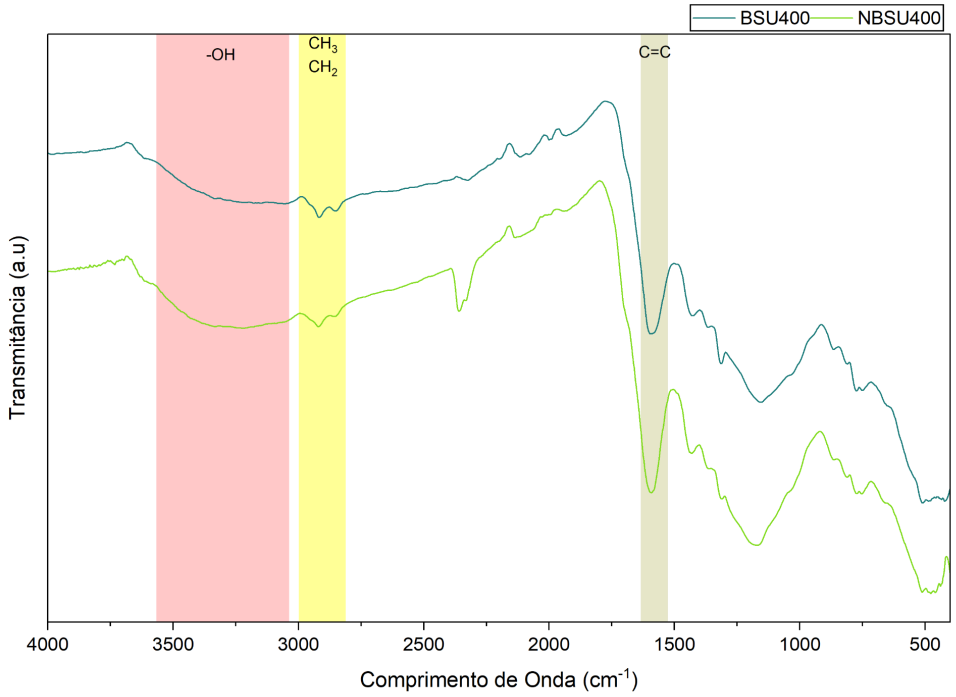


Figura 3: Espectros de absorção no infravermelho (FTIR) do biocarvão (BSU400) e nanobiocarvão (NBSU400).

Os espectros FTIR (Figura 4) demonstram as variações espectrais e grupos funcionais responsáveis pela adsorção do Pb. A banda larga relacionada ao estiramento de grupos -OH exibe uma sutil redução de intensidade e deslocamento de frequência à medida que a concentração de Pb no meio aumenta. As bandas na região de 1080 cm^{-1}, associadas a vibrações de alongamento C-C e C-O, apresentam achatamento progressivo, e a banda em torno de 760 cm^{-1} corresponde ao CO_3^{2-}, que participa do processo de precipitação superficial. Dessa forma, o comportamento é característico do mecanismo de complexação superficial. Além disso, a modificação na banda C=C de grupos aromáticos, indica interação cátion-π. Os π-elétrons aromáticos podem atuar como doadores de elétrons, contribuindo com o processo de adsorção. (Khan *et al.*, 2021)

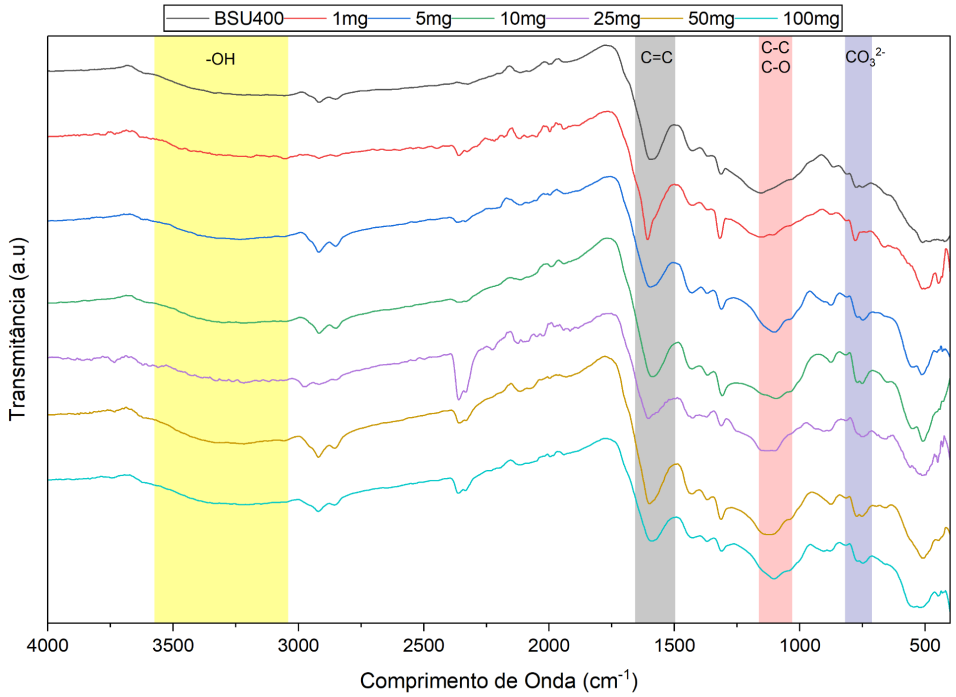


Figura 4: Espectros de infravermelho (FTIR) do biocarvão (BSU400) antes e após adsorção de Pb^{2+} em diferentes concentrações iniciais.

A cinética de adsorção sob diferentes condições de pH (3,5 e 5,0) estão expostas na Figura 5. Para todos os sistemas avaliados, verificou-se uma taxa de adsorção inicialmente acelerada, nos primeiros 100 minutos de reação, decorrente da grande disponibilidade de sítios ativos na superfície dos materiais. E logo após, o processo desacelera gradativamente devido a saturação progressiva dos mesmos, atingindo o equilíbrio cinético aparente em torno de 400 minutos para o NBSU400, e 720 minutos para o BSU400. A capacidade de adsorção (Qe) revelou certa dependência em relação ao pH e a escala do material, exibindo comportamentos distintos entre as matrizes. Para o BSU400, que tem melhor desempenho em pH 5 (Qe = 3,76 mg/g), exibe redução de sua eficiência em pH 3,5 (Qe = 2,33 mg/g). Esse comportamento decorre do efeito de protonação (em pH 3,5), a elevada concentração de íons H_3O^+ que compete diretamente com os íons de Pb^{2+} pelos sítios de ligação, além de promover a repulsão eletrostática (Yang, W. *et al*., 2022).

Contudo, o NBSU400 demonstrou comportamento inverso, alcançando a capacidade máxima de adsorção em pH 3,5 (Qe = 4,36 mg/g), enquanto o aumento para pH 5,0 provocou o decréscimo da sua performance (Qe = 1,45 mg/g). Isso indica que as propriedades de interface e os fenômenos difusionais sofreram alteração com a redução de escala do material. Em condições mais ácidas (pH 3,5), a elevada densidade de carga favorece a dispersão do material em meio aquoso, minimizando os efeitos de aglomeração, essa dispersão maximiza a área superficial efetiva,

tornando os sítios de interação e os grupos oxigenados acessíveis aos íons Pb^{2+}, superando a barreira da competição protônica. Em contrapartida, em pH 5,0, a redução da repulsão eletrostática entre as próprias partículas de biocarvão induzem a autoaglomeração, reduzindo a área superficial disponível e bloqueando o acesso do chumbo aos sítios internos (Yang, W. *et al*., 2022).

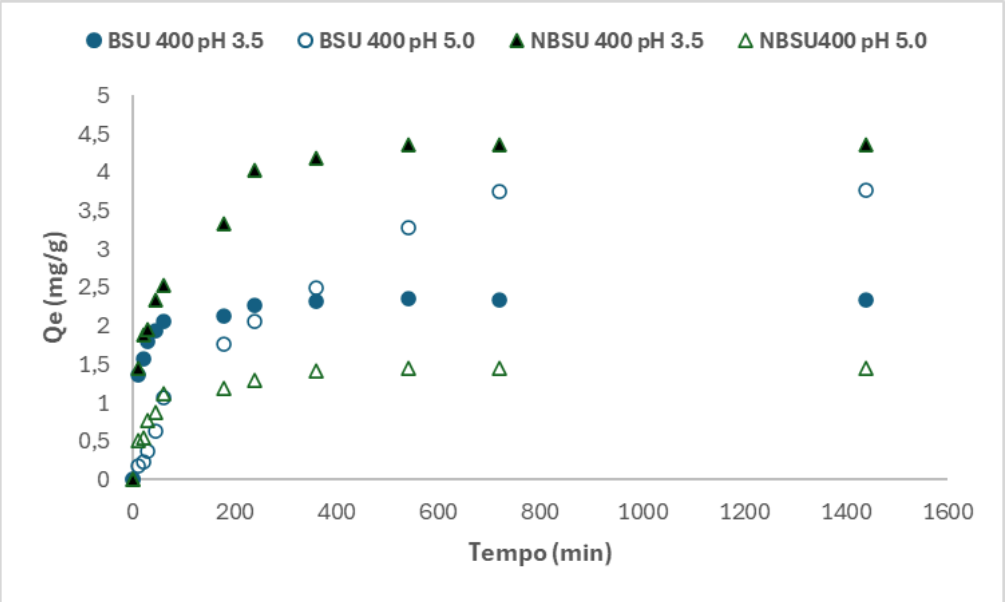


Figura 5: Cinética de adsorção de Pb (II) em função do tempo, para biocarvão e nanobiocarvão em pH 3,5 e 5,0.

4. CONCLUSÃO

Diante dos resultados, o nanobiocarvão de semente de uva produzido a 400ºC consolida-se como uma tecnologia promissora para remoção de metais tóxicos, apresentando ótima capacidade de remoção em meios ácidos, condição frequentemente encontrada em descartes da indústria de galvanoplastia e fabricação de baterias automotivas, prescindindo de etapas de alcalinização prévia. Adicionalmente, a rota tecnológica proposta agrega benefícios socioeconômicos e ambientais, demonstrando alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 (Água Potável e Saneamento) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM), ao Laboratório de Tecnologia e Monitoramento Ambiental (LTMA), ao Laboratório de Análises Cromatográficas (LAC) e ao Laboratório de Corrosão e Nanotecnologia (LCNT/NUPEG) da UFS. Ao Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS). Ao órgão de fomento à pesquisa FAPITEC/SE. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

CHAUBEY, A. K., Pratap, T., Preetiva, B., Patel, M., Singsit, J. S., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2024). Definitive Review of Nanobiochar. ACS Omega, 9, 12331 - 12379.

CHAUSALI, N.; SAXENA, J.; PRASAD, R. (2021). Nanobiochar and biochar based nanocomposites: Advances and applications. Journal of Agriculture and Food Research, v. 5, 100191, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100191.

GRANJA, H. S. (2024). Sensor Eletroquímico à Base de Biocarvão de Semente de Uva Para Determinação de Fenamifós Em Diversas Amostras. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

HAMA AZIZ, K. H. et al. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. RSC Advances, v. 13, n. 106, p. 17595-17621. DOI: https://doi.org/10.1039/D3RA00723E.

JAGADEESH, N.; SUNDARAM, B. (2023). Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. Journal of Hazardous Materials Advances, v. 9, 100226. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226.

JIANG, M. et al. (2023). Nanobiochar for the remediation of contaminated soil and water: challenges and opportunities. Biochar, v. 5, n. 1, p. 2. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-022-00201-x.

KAMAR, M. T. et al. (2022). A critical review of state-of-the-art technologies for electroplating wastewater treatment. International Journal of Environmental Analytical Chemistry.

KHAN, M. et al. (2021). Remediation of Emerging Heavy Metals from Water Using Natural Adsorbent: Adsorption Performance and Mechanistic Insights. Sustainability, 2021.

MONROY-LICHT, M. et al. (2025). Biological approaches to mitigate heavy metal pollution from battery production effluents: advances, challenges, and perspectives. Environmental Science and Pollution Research, v. 32, p. 20844–20878.

MONTEIRO, Adnívia Santos Costa; GRANJA, Honnara Santos; VASCONCELOS, Thauane Menezes; SILVEIRA, Thizá Vitória Sacramento; SILVA, Eduarda Medeiros; MELO, José Antônio Nascimento de; SANTIAGO, Beatriz Silva; SILVA, Joel Marques da; FREITAS, Lisiane dos Santos; COSTA, Silvânio Silvério Lopes da; GARCIA, Carlos Alexandre Borges. (2025). Remediação de águas contaminadas por Pb2+ com biocarvão de semente de uva: alternativa sustentável frente à crise hídrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26.

PENG, H.; GUO, J. (2020). Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review. Environmental Chemistry Letters, v. 18, p. 2055–2068.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2024). Lead poisoning and health. Geneva: WHO.

XU, X. et al. (2013) Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar. Environmental Science and Pollution Research, v. 20, n. 1, p. 358–368.

YANG, W.; LI, B.; SHANG, J. (2022). Aggregation kinetics of biochar nanoparticles in aqueous environment: Interplays of anion type and bovine serum albumin. The Science of the Total Environment, p. 155148.

ZHANG, P. et al. (2022). Preparation of Ball-Milled Phosphorus-Loaded Biochar and Its Highly Effective Remediation for Cd- and Pb-Contaminated Alkaline Soil. Science of The Total Environment, v. 813, 152648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152648.