



De resíduo à solução: biocarvão de casca e bagaço da laranja como adsorvente sustentável para contaminantes emergentes

Kleryton L. A. de Oliveira (PG)*¹, Ana L. F. Matos (IC)¹, Marcela de O. B. Cortez (PG)¹, Karina S. da Silva (PG)¹, Renata P. L. Moreira (PQ)¹

*kleryton.oliveira@ufv.br

¹Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa- UFV

RESUMO

O Brasil é um dos maiores exportadores mundiais de suco de laranja, gerando toneladas de resíduos de biomassa que, quando não tratados adequadamente, podem causar contaminação ambiental. Neste trabalho, resíduos de casca e bagaço de laranja foram empregados na síntese de biocarvão ativado com ZnCl_2 , utilizado para a remoção do fármaco emergente enrofloxacin (EN). O biocarvão apresentou elevada área superficial específica ($1140 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), estrutura amorfa funcionalizada e alta capacidade de adsorção, com eficiência superior a 95% e capacidade máxima (q_{max}) de 350 mg g^{-1} . Os dados cinéticos e de equilíbrio foram melhor ajustados pelos modelos de Elovich e Freundlich, respectivamente, indicando um processo de quimissorção em superfície heterogênea. A alta performance do adsorvente foi mantida em amostras de matriz aquosa real, água da lagoa da Universidade Federal de Viçosa, demonstrando que o biocarvão é uma solução sustentável, eficaz e econômica para o tratamento de águas contaminadas.

Palavras-chave: biocarvão ativado, adsorção, contaminantes emergentes, sustentabilidade, enrofloxacin.

Introdução

O Brasil, maior produtor mundial de laranja, gera um volume expressivo de resíduos, como casca e bagaço, cujo subaproveitamento representa um desafio ambiental. Embora parte seja usada na alimentação de ruminantes e produção de biogás, há um crescente interesse em tecnologias que agreguem maior valor a essa biomassa [1-2]. Uma alternativa promissora é a conversão desses resíduos em biocarvão (BC), um material carbonáceo com alta porosidade e estabilidade, que pode ser obtido por pirólise. Suas propriedades o tornam útil como condicionador de solo e adsorvente em aplicações ambientais. Para potencializar sua capacidade de adsorção, o BC pode ser ativado quimicamente com cloreto de zinco (ZnCl_2), aumentando sua área superficial e eficiência [3]. Esse BC ativado mostra-se eficaz na remoção de contaminantes emergentes da água, como a enrofloxacin (EN). Este antibiótico de uso veterinário é frequentemente encontrado em corpos d'água, apresentando baixa biodegradabilidade e persistência ambiental, o que representa riscos ecológicos e à saúde. A adsorção por BC ativado de resíduos de laranja surge, portanto, como uma estratégia sustentável e de baixo custo para mitigar a poluição hídrica por esses compostos. Portanto, este trabalho teve por objetivo sintetizar BC derivado de bagaço e casca de laranja para uso na remoção de contaminantes emergentes em sistemas aquosos.

Experimental

Síntese do biocarvão (BC)

As cascas e bagaços de laranja foram coletados em estabelecimentos comerciais de Viçosa-MG, lavados com água corrente para remoção de impurezas e secos em estufa a 105°C por 24 h. Após desidratação, o material foi moído e peneirado para obtenção de uma granulometria uniforme. A biomassa foi impregnada com ZnCl_2 na

proporção 1:3 (m/m) em meio aquoso. A mistura foi seca a 105°C e carbonizada em forno mufla, com rampa de aquecimento de $10^\circ\text{C min}^{-1}$ até 600°C , mantida por 1 h. O material foi então lavado com solução de HCl ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$), seguido de enxágues com água deionizada aquecida (80°C) até pH neutro. O BC purificado foi seco a 60°C por 48 h e caracterizado por FTIR, MEV, DRX, Raman, Potencial Zeta, Análise Termogravimétrica (TG) e fisissorção de N_2 .

Ensaios de adsorção e modelagem

Os ensaios de capacidade adsorptiva foram conduzidos em sistema de batelada. Uma massa de 15 mg do BC foi colocada em contato com 15,00 mL de soluções de contaminantes emergentes: enrofloxacin (EN), amoxicilina (AM), ceftriaxona (CEF) e 17α -etinilestradiol (ETH) na concentração de 50 mg L^{-1} . A remoção foi quantificada por Espectrofotometria UV-Vis.

Diante do desempenho superior obtido para EN, ensaios adicionais foram realizados, incluindo a avaliação da influência do pH na adsorção, na faixa de 4 a 10. A cinética do processo foi analisada pelos modelos de Pseudo-Primeira Ordem, Pseudo-Segunda Ordem e Elovich, enquanto o equilíbrio foi descrito pelas isotermas de Langmuir e Freundlich. Adicionalmente, a remoção foi avaliada em amostra de água da lagoa da UFV, visando avaliar o efeito de interferentes na eficiência de adsorção.

Resultados e Discussão

O biocarvão (BC) foi caracterizado por diversas técnicas analíticas. A espectroscopia no infravermelho (FTIR) revelou bandas características de grupos hidroxila ($\sim 3409 \text{ cm}^{-1}$) e estruturas aromáticas ($\sim 1581 \text{ cm}^{-1}$), indicando a presença de grupos funcionais de superfície relevantes para a adsorção de contaminantes. A morfologia do material, avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), evidenciou superfícies rugosas, fragmentadas e



com estrutura lamelar empilhada. A área superficial específica, determinada por fisissorção de N_2 , foi de $1140 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, valor compatível com materiais de alta capacidade adsorbtiva. A difração de raios X (DRX) apresentou picos largos entre 10° e 30° (2θ), confirmando a natureza amorfa típica de biocarvões. A espectroscopia Raman indicou uma razão das bandas D (carbono amorfo) e banda G (carbono grafítico), I_D/I_G , de 1,21, sugerindo a predominância de carbono desordenado na estrutura. Por fim, a análise do potencial zeta revelou carga superficial negativa, favorecendo a interação eletrostática com contaminantes catiônicos. Os resultados de eficiência do BC frente aos contaminantes emergentes são mostrados na Fig. 1. Observa-se um excelente desempenho de adsorção, especialmente para a EN e CEF, cujas remoções ultrapassaram 95%, com destaque para a EN, que apresentou desempenho ligeiramente superior. Diante disso, a EN foi escolhida como contaminante modelo nas demais análises.

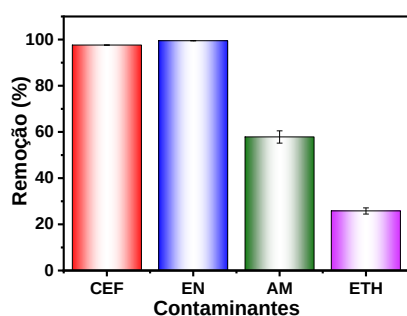


Figura 1. Remoção de contaminantes emergentes por BC.

Os resultados de cinética de adsorção da EN são mostrados na Fig. 2A. Observa-se que o modelo de Elovich apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, sugerindo um processo de adsorção química em superfícies energeticamente heterogêneas. A influência do pH foi significativa, com a máxima capacidade de adsorção observada em pH 8 (240 mg g^{-1}), enquanto em pH 4 a remoção foi reduzida (160 mg g^{-1}) (Fig. 2b). Esse comportamento pode ser atribuído à variação da carga superficial do adsorvente e ao estado de ionização da molécula de EN, que afetam diretamente as interações adsorvente-adsorvato.

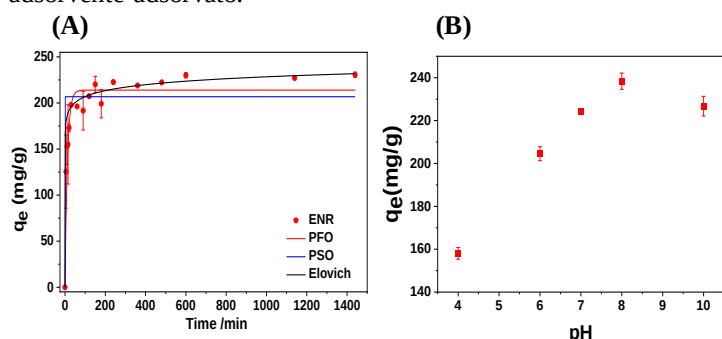


Figura 2. Remoção de EN por BC (A) Isotherma de adsorção. (B) Efeito do pH na capacidade de adsorção de EN pelo BC.

As isothermas de equilíbrio, apresentadas na Figura 3, demonstraram que o modelo de Freundlich foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais ($R^2 = 0,987$), indicando um processo de adsorção em superfície heterogênea, com múltiplos sítios ativos de diferentes energias de ligação. A capacidade máxima de adsorção estimada (q_{max}) foi de aproximadamente 350 mg g^{-1} , evidenciando o

elevado potencial adsorbtivo do material.

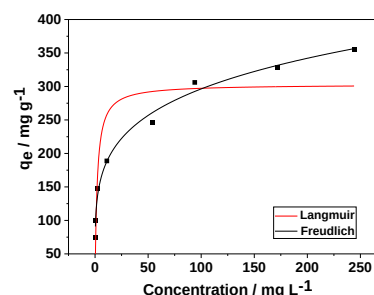


Figura 3. Isotherma de adsorção da EN pelo BC

O efeito de interferentes na adsorção foi avaliado comparando-se os resultados obtidos em água ultrapura e em amostra de água da lagoa da UFV. Observou-se que a água da lagoa apresenta condutividade significativamente maior, indicando a presença de diversos íons em solução. No entanto, conforme os dados apresentados na Tabela 1, a capacidade adsorbtiva (q_e) apresentou apenas pequenas variações entre os dois meios, evidenciando a estabilidade do biocarvão mesmo em matrizes reais e sua resistência à interferência de espécies competidoras.

Tabela 1. Avaliação de possíveis interferentes na remoção de EN

Biocarvão	Condutância (μS)	q_e -EN (mg/g)
Água da lagoa	79,5	224
Água tipo I	0,98	234

Conclusões

A síntese do biocarvão (BC) a partir de resíduos de laranja mostrou-se eficiente, originando um material com elevada área superficial e excelente desempenho na remoção de contaminantes emergentes, com destaque para a enrofloxacin em condições de pH alcalino. O BC também demonstrou notável estabilidade frente à presença de interferentes, reforçando seu potencial como adsorvente sustentável para o tratamento de águas contaminadas. Esses resultados evidenciam sua aplicabilidade prática e sua relevância dentro do conceito de economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos agroindustriais.

Agradecimentos

CNPq (Processo 312400/2021-7, 405828/2022-5 e 407799/2022-2), FAPEMIG (RED-00144-22).

Referências

- [1] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Citrus: World Markets and Trade**. Washington, DC: USDA, jan. 2025
- [2] M. S. L. Faria; R. M. R. Lima; R. C. S. Sousa; A. C. Borges, *Rev. AIDIS Ing. Cienc. Ambient.* **2025**, *18*, 111–124.
- [3] E. S. Passos; R. S. Carvalho; G. G. Faccioli; M. L. P. M. Arguelho; R. A. Oliveira, *Rev. Gest. Sustentab. Ambient.* **2022**, *11*, 60–74.