

Pseudocaule da bananeira modificado como bioadsorvente para remediação de contaminantes

Antônio P. Faustino¹, Edmilson T. P. João¹, Felipe S. Lopes¹, Saulo Jhonata B. C. Mascarenhas², Rômulo B. Vieira^{1*}

¹Inst. de Ciências Exatas e da Natureza - ICEN, Universidade da Integ. Intl. da Lusofonia Afro-Brasileira/UNILAB, Redenção/CE, Brasil. 60790-970.

²Dept. de Tecnologia e Ciências Sociais - DTCS, Universidade do Estado da Bahia/UNEB, Juazeiro/BA, Brasil. 48904-711.

*Autor correspondente: rbvieira@unilab.edu.br

Resumo/Abstract

RESUMO - O acesso à água potável é um direito fundamental, e sua contaminação por corantes têxteis e contaminantes emergentes, como fármacos e produtos de higiene, tem gerado preocupação ambiental. O azul de metileno (AM), amplamente utilizado na indústria e em pesquisas, pode ser removido com bioadsorventes vegetais. Este estudo avaliou o pseudocaule da bananeira modificado com ácidos como alternativa sustentável para remoção de AM. A FTIR indicou bandas típicas da biomassa lignocelulósica, com leve alteração na banda de 1736 cm^{-1} , sugerindo modificação em grupos superficiais. A DRX confirmou a preservação da estrutura cristalina da celulose. Todos os bioadsorventes modificados apresentaram alta eficiência, com destaque para o RB@N, tratado com HNO_3 , que removeu até 100% de AM em baixas concentrações. Os dados ajustaram-se ao modelo de pseudo-segunda ordem, indicando interações químicas no processo de adsorção.

Palavras-chave: adsorção, cinética, equilíbrio, resíduos.

ABSTRACT – Access to clean water is a fundamental right, and its contamination by textile dyes and emerging contaminants, such as pharmaceuticals and personal care products, has raised environmental concerns. Methylene blue (MB), widely used in industry and research, can be removed using plant-based bioadsorbents. This study evaluated the acid-modified banana pseudostem as a sustainable alternative for MB removal. FTIR analysis revealed typical bands of lignocellulosic biomass, with slight changes in the 1736 cm^{-1} band, suggesting modifications in surface groups. XRD confirmed the preservation of the cellulose crystalline structure. All modified bioadsorbents showed high efficiency, with RB@N (treated with HNO_3) standing out by removing up to 100% of MB at low concentrations. The data fitted the pseudo-second-order model, indicating chemical interactions in the adsorption process.

Keywords: adsorption, kinetic, equilibrium, residue.

Introdução

O acesso à água potável é um direito fundamental, e sua escassez, contaminação ou má distribuição pode causar conflitos sociais. (1) Contaminantes emergentes (CEs), como fármacos, produtos de higiene pessoal e corantes têxteis, contribuem para a poluição da água e despertam preocupação quanto aos seus impactos na vida aquática. (2) Dentre os corantes, o azul de metileno (AM) é amplamente utilizado na indústria têxtil e em estudos laboratoriais como molécula sonda em processos de adsorção, dessorção e degradação. (3-4) O uso de bioadsorventes derivados de resíduos agrícolas, como o pseudocaule da bananeira, abundante no Maciço de Baturité, é uma estratégia viável para remover contaminantes emergentes, contribuindo para a sustentabilidade e a redução de resíduos. (2,5-6). O objetivo do trabalho é utilizar o pseudocaule da bananeira como bioadsorvente para remoção de AM, realizando modificações na superfície do bioadsorvente com ácidos.

Experimental

Processamento e modificação do pseudocaule da bananeira

O pseudocaule da bananeira (RB) foi previamente lavado, seco, triturado e peneirado (80 mesh). 1,0 g de RB foram tratadas separadamente com soluções 1,0 M de HCl , HNO_3 , H_2SO_4 e H_3PO_4 , agitação (250 rpm) e temperatura ambiente (TA) por 24 h. Os materiais foram lavados com água destilada (60°C) até pH 6,0 e secos em estufa ($105^\circ\text{C}/24\text{ h}$). Os materiais resultantes foram denominados RB@C, RB@N, RB@S e RB@P, conforme o ácido utilizado.

Caracterização dos bioadsorventes

Difração de raios X (DRX) foi realizada em difratômetro Rigaku Miniflex, radiação $\text{CuK}\alpha$ de $\lambda = 1,5406\text{ \AA}$ (40 kV, 15 mA), com taxa de varredura de 10 a $80^\circ 2\theta$, passo de $0,02^\circ$ e velocidade de varredura de $20^\circ/\text{min}$. Espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR) foi realizada em um Shimadzu IR Tracer-100, faixa de 400 a 4000 cm^{-1} , 64 scans e resolução de $4,0\text{ cm}^{-1}$.

Cinética e Equilíbrio de Adsorção

50 mg dos bioadsorventes foram dispersos em 50 mL de AM (50 mg·L⁻¹), sob agitação a 250 rpm e TA. As soluções foram coletadas entre 0 e 180 min, filtradas e medidas em espectrofotômetro UV-Vis (NOVA 1600UV, $\lambda = 665$ nm). As isotermas foram ajustadas de acordo com os modelos de pseudo-primeira (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO). Para o equilíbrio, 50 mg dos bioadsorventes foram dispersos em 50 mL das soluções de AM (5-200 mg·L⁻¹), sob as mesmas condições descritas acima.

Resultados e Discussão

Os resultados de FTIR (Figura 1) de RB apresentam bandas características da biomassa lignocelulósica, νO-H (3432 cm⁻¹), grupos metílicos/metilênicos (2916 cm⁻¹), νC=O e νC-O da hemicelulose (1736 e 1249 cm⁻¹), além de bandas atribuídas à lignina e celulose. As demais amostras têm o mesmo perfil, sugerindo que os tratamentos não promoveram alterações significativas na estrutura local do RB. Houve aumento na intensidade da banda em 1736 cm⁻¹, sugerindo um aumento de grupos ésteres e/ou ácidos carboxílicos superficiais. (7-8)

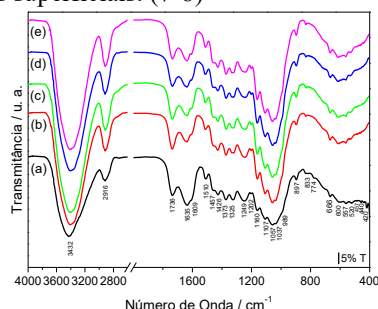


Figura 1. Espectroscopia de absorção no infravermelho (FTIR) para: (a) RB; (b) RB@C; (c) RB@N; (d) RB@S; (e) RB@P.

Nos resultados de DRX (Figura 2), todas as amostras apresentam de picos de difração em 14,9, 16,7, 22,6 e 34,9° 2θ, correspondentes as reflexões (110), (110), (200) e (004), respectivamente, e que são característicos da fase celulose I. (9) Diante disso, sugere-se que o tratamento ácido não modificou a estrutura natural de RB.

Nos estudos cinéticos, os bioadsorventes atingiram valores próximos da capacidade teórica (50 mg·g⁻¹) até 30 min, com equilíbrio a partir de 60 min; RB apresentou a capacidade mais baixa (44,3 mg·g⁻¹) e ambos os modelos cinéticos tiveram bom ajuste ($R^2 > 0,992$), escolhendo-se o PSO por considerar interações eletrostáticas e/ou reações químicas. A partir do equilíbrio em 60 min, variou-se a concentração de AM (5–200 mg·L⁻¹) (Figura 3). A capacidade de remoção pelos bioadsorventes seguiu a ordem: RB@N>RB@S>RB>RB@C>RB@P, podendo ser explicado pela ação oxidante do HNO₃, sugerindo um aumento na quantidade de grupos oxigenados na superfície do bioadsorvente, favorecendo as interações com o corante.

RB@N removeu cerca de 100% do AM entre 5-50 mg·L⁻¹, 84,3% a 100 mg·L⁻¹ e 56,8% a 200 mg·L⁻¹, superando resultados obtidos na literatura. (3, 10).

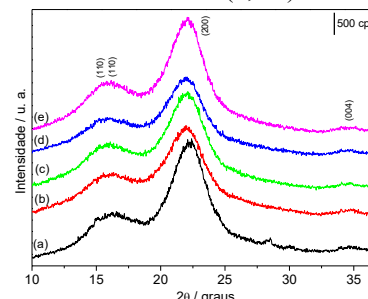


Figura 2. Difração de raios X para: (a) RB; (b) RB@C; (c) RB@N; (d) RB@S; (e) RB@P.

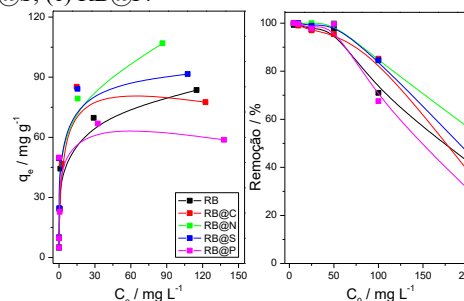


Figura 3. Isotermas de adsorção no equilíbrio.

Conclusões

O pseudocaule da bananeira foi modificado com ácidos para atuar como adsorvente na remoção de contaminantes. A modificação aumentou os grupos oxigenados sem alterar a estrutura da celulose I. Todos os materiais alcançaram equilíbrio em 30-60 min, com destaque para o RB@N, que removeu 100% do azul de metileno, demonstrando alta eficácia na remediação de corantes.

Agradecimentos

FSL, ETPJ, APF e RBV agradecem FUNCAP/CE (BP6-00241-00021.01.00/25). SJBCM agradece à UNEB/BA. Ao LaMDEM/UNIVASF/BA pelas análises de DRX. A CA/UFC/CE pelas análises de FTIR.

Referências

- (1) WHO, UNICEF, World Bank. *State of the world's drinking water*. World Health Organization, Geneva, 2022.
- (2) C. C. Montagner et al. *Quim. Nova*. **2017**, 40, 9, 1094.
- (3) M. W. Rahman et al. *Appl. Water Sci.* **2022**, 12, 242.
- (4) J.-C. Bollinger et al. *Environ. Chem. Lett.* **2025**.
- (5) N. Abdullah et al. *Heliyon*. 2023, 9, e12940.
- (6) S. Pawar et al. *Heliyon*. 2023, 9, e15469.
- (7) R. R. R. Cecci, et al. *SN Appl. Sci.* **2020**, 2, 20.
- (8) D. Das et al. *Cellul. Chem. Technol.* **2018**, 9-10, 729-739.
- (9) M. K. D. Rambo et al. *J. Braz. Chem. Soc.* **2015**, 26, 7, 1491-1499.
- (10) C. Castanheira et al. *Period. Tche. Quim.* **2011**, 10/11, 20/21, 34-41.