



APLICAÇÃO DE CARVÕES DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR ATIVADOS COM CO₂ PARA ADSORÇÃO DE PICLORAM

Maria E. A. Barboza^{1*} (PG), João A. T. Barboza¹ (PG), Guilherme M. D. Ferreira¹ (PQ), Fabiano Magalhães¹ (PQ)

¹ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Química, Instituto de Ciências Naturais, Lavras, Minas Gerais, Brasil, 37200-900

RESUMO

A crescente presença de pesticidas em águas superficiais e subterrâneas impulsiona a busca por adsorventes sustentáveis. Este trabalho teve como objetivo avaliar carvões ativados (CA) obtidos do bagaço de cana-de-açúcar ativados com CO₂ (1 e 2h), para a remoção do herbicida picloram. Os materiais foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de grupos funcionais (ácidos e básicos), pH_{PCZ} e ensaios de adsorção em diferentes pHs. O CA ativado por 2 h (CA-2) apresentou maior porosidade e densidade de grupos ácidos (6,24 mmol g⁻¹), enquanto o CA-1 mostrou menor funcionalização. A adsorção foi mais eficiente em meio ácido, alcançando 96,1% (CA-2) e 97,4% (CA-1) em pH 2,0, com queda em pHs alcalinos. O melhor desempenho do CA-2 ao longo da faixa de pH indica maior capacidade de interação com o contaminante, por mecanismos eletrostáticos e específicos. Os resultados evidenciam o potencial dos carvões ativados como materiais promissores para o tratamento de águas contaminadas.

Palavras-chave: Contaminação ambiental; Tratamento de água; Herbicida; Carvão Ativado; Material Lignocelulósico.

Introdução

A intensificação da preocupação ambiental frente ao descarte inadequado de resíduos agroindustriais e a presença de contaminantes emergentes em corpos hídricos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de águas. O bagaço de cana-de-açúcar (BCA), resíduo lignocelulósico abundante e de baixo custo, destaca-se como precursor viável na produção de carvões ativados (CA) por ativação física com CO₂, processo térmico de menor impacto ambiental (1-2).

O herbicida picloram, pertencente à classe dos ácidos piridínicos, apresenta alta solubilidade, mobilidade e persistência, sendo frequentemente detectado em ambientes aquáticos e de difícil remoção por métodos convencionais. Sua presença em águas superficiais e subterrâneas impõe riscos ecotoxicológicos significativos (3-4).

Os carvões ativados têm se consolidado como adsorventes eficazes na remoção de poluentes orgânicos, sobretudo quando obtidos a partir de resíduos agrícolas (5). Dessa forma, o presente trabalho propõe aplicação de carvões ativados a partir de BCA por ativação física com CO₂, por 1 e 2 horas, com o objetivo de avaliar sua eficiência na remoção de picloram em solução aquosa. Ressalta-se que detalhes específicos da metodologia de produção dos materiais foram propositalmente omitidos ou generalizados devido à proteção de propriedade intelectual vinculada a parcerias institucionais e empresariais, que exigem sigilo.

Experimental

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia dos carvões ativados foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de ultra alta resolução utilizando o equipamento TESCAN CLARA com banho de carbono.

Química de Superfície: pH_{PCZ} e Grupos Ácidos e Básicos

O pH no ponto de carga zero (pH_{PCZ}) foi determinado pela técnica de imersão de 20,0 mg de CA em 20,0 mL de solução de NaCl 0,1 mol L⁻¹, com pH inicial ajustado entre 2 e 12. Após 24 h de agitação a $\pm$ 25,0 °C, o pH final foi registrado. Para a quantificação das funções ácidas e básicas, suspensões contendo 150 mg de CA em 70,0 mL de HCl 0,0035 mol L⁻¹ foram tituladas com solução de NaOH 0,2 mol L⁻¹, sob agitação a $\pm$ 25,0 °C.

Efeito do pH na adsorção de picloram

Para avaliar o efeito de pH sobre a capacidade de adsorção dos materiais obtidos, os ensaios foram conduzidos pela dispersão de 10,0 mg dos carvões em 10,0 mL de uma solução 20,0 mg L⁻¹ de picloram, com o pH ajustado em aproximadamente 2,0-12,0. Os materiais foram mantidos a $\pm$ 25,0 °C pelo período de 24 horas sob agitação de 120 rpm.

Resultados e Discussão

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 1, são apresentadas micrografias que evidenciam as características morfológicas dos carvões ativados.

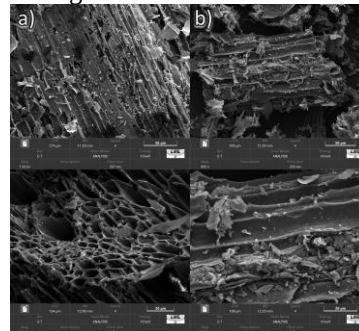


Figura 1. Micrografias dos carvões ativados a) CA-1 (esquerda) e b) CA-2 (direita).



As micrografias revelam que praticamente não há diferenças significativas na morfologia das amostras CA-1 e CA-2. Nota-se a presença de partículas de diferentes tamanhos e formas, com superfície lisa e com cavidades e fissuras. Percebe-se também uma predominância de partículas alongadas com regiões que lembram formato de colméia, que são traços estruturais típicos de materiais lignocelulósicos, como fibras e lamelas alinhadas (6).

Química de Superfície: pH_{PCZ} e Grupos Ácidos e Básicos

A Tabela 1 mostra os valores de pH_{PCZ} e a quantidade de grupos ácidos e básicos na superfície dos carvões ativados.

Tabela 1. pH_{PCZ} e número de funções ácidas e básicas dos carvões ativados.

Material	pH_{PCZ}	n_{FA} (mmol L ⁻¹)	n_{FB} (mmol L ⁻¹)	n_{TOTAL}
CA-1	9,4	0,44	0,05	0,49
CA-2	9,6	6,24	0,32	6,56

O carvão ativado por CO₂ por 2 h (CA-2) exibiu valores significativamente mais elevados em termos de química de superfície do que o ativado por 1 h (CA-1). O pH_{PCZ} apresentou leve aumento de 9,4 para 9,6, e o número total de grupos funcionais passou de 0,49 para 6,56 mmol g⁻¹ nas amostras CA-1 e CA-2, respectivamente. Esse aumento foi impulsionado principalmente pela elevação expressiva de grupos ácidos (n_{FA} 0,44 para 6,24 mmol g⁻¹), com leve acréscimo nos grupos básicos (n_{FB} 0,05 para 0,32 mmol g⁻¹). A maior densidade de grupos oxigenados e o leve deslocamento do pH_{PCZ} indicam que a ativação prolongada promove maior oxidação superficial, favorecendo interações eletrostáticas com o herbicida aniônico picloram (7).

Efeito do pH na adsorção de picloram

A Figura 2 mostra a influência do pH na capacidade adsorptiva dos carvões ativados em relação ao picloram.

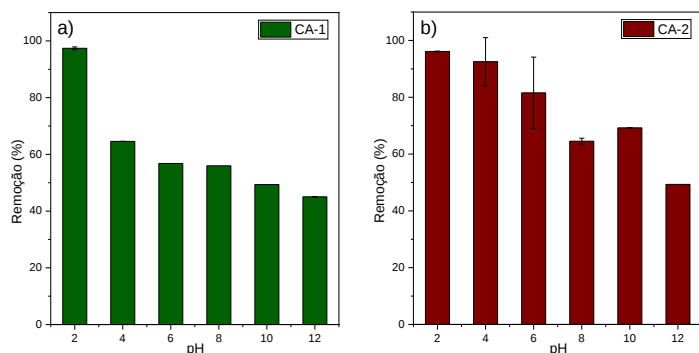


Figura 2. Efeito do pH sobre a adsorção de Picloram a) CA-1 (esquerda) e b) CA-2 (direita).

A adsorção de picloram pelos carvões ativados variou conforme o pH da solução, sendo mais eficiente em meio ácido. Em pH 2,0, CA-1 e CA-2 removeram, respectivamente, 97,4% e 96,1% do contaminante, com quedas graduais em pH mais elevados. Esse

comportamento está relacionado ao pH_{PCZ} dos adsorventes (9,4–9,6), indicando que a superfície se encontra carregada positivamente em pH abaixo desses valores, o que favorece a atração eletrostática com o picloram na forma aniônica.

A redução da remoção em pH alcalino é atribuída à repulsão entre cargas negativas. O material ativado por 2 h (CA-2) manteve remoção superior em toda a faixa de pH, o que é atribuído à sua maior densidade de grupos oxigenados ($n_{FA} = 6,24$ mmol g⁻¹), que além de favorecerem a atração eletrostática, permitem a ocorrência de interações adicionais como ligações de hidrogênio e interações $\pi-\pi$ com o anel aromático do picloram (8). O discreto aumento da remoção em pH 10, observado para CA-2, sugere a participação de interações não eletrostáticas, como complexação com sítios funcionais específicos.

Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que a ativação do bagaço de cana-de-açúcar com CO₂, especialmente por 2 horas, promoveu significativo aumento na porosidade e na densidade de grupos funcionais ácidos, favorecendo a adsorção do herbicida Picloram em solução aquosa. O carvão CA-2 apresentou melhor desempenho ao longo de toda a faixa de pH estudada, removendo até 96,1% do contaminante em pH 2,0, devido à combinação de interações eletrostáticas e não eletrostáticas. Tais achados demonstram o potencial do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de adsorventes sustentáveis e eficazes na remoção de poluentes emergentes, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente responsáveis no tratamento de águas contaminadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro. Agradecem também à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Química, ao Laboratório de Inorgânica, ao Laboratório do Grupo de Materiais, Interfaces e Soluções (MATIS) e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Microestrutural pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados para a realização deste trabalho.

Referências

- Del Angel, E., Pantoja, M. A., López, R., & Cruz, A. E. *Tecnología y ciencias del agua*. **2022**, 13(1).
- Somyanonthanakun, W., Greszta, A., Roberts, A. J., & Thongmee, S. *Sustainability*. **2023**, 15(6), 5566.
- Kulaishin, S. A., M. D. Vedenyapina, and A. Yu Kurmysheva. *Solid Fuel Chemistry*. **2022**, 56(3), 181-198.
- Khan, S. et al. *Water*. **2022**, 14(19), 2937.
- Blachnio, M. et al. *Molecules*. **2020**, 25(21), 5105.
- Castro, P. M. de, et al. *Revista Árvore*. **2025**, 49, e4902.
- Santana, G. M., et al. *Ciência Florestal*. **2019**, 29, 769-778.
- Benabed, F. B., et al. *Desalination and Water Treatment*. **2024**, 320, 100719.