APLICAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA CONTAMINADA COM IBUPROFENO

Amanda Alcaide Francisco Fukumoto [(1)]
Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina (UTFPR). Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Docente do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).
Diógenes de Sousa Leão [(2)]
Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá (UFMT). Mestrando em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá (UFMT).
Eduardo Beraldo de Morais [(3)]
Biólogo pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Mestre e Doutor em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Docente do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

Endereço [(1)]**:** Avenida Fernando Corrêa da Costa, 2367 – Boa Esperança – Cuiabá - MT - CEP: 78060-900 - Brasil – Tel: +55 (65) 3615-8727- e-mail: amanda.fukumoto@ufmt.br.

RESUMO

O presente estudo avaliou o potencial do biocarvão produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar na remoção de ibuprofeno em água, comparando seu desempenho ao do carvão ativado pulverizado comercial. A pesquisa foi motivada pela necessidade de soluções sustentáveis para o tratamento de contaminantes emergentes e pelo aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira, em consonância com os princípios da economia circular. O biocarvão foi obtido a partir do bagaço triturado, lavado e carbonizado em mufla a 300 °C. Ensaios de adsorção foram conduzidos com diferentes concentrações do adsorvente, avaliando os efeitos do pH (3, 7 e 10) e da temperatura (15 °C, 25 °C e 35 °C) na remoção do ibuprofeno. As concentrações do fármaco foram monitoradas por espectrofotometria UV-VIS. Os resultados indicaram que o biocarvão apresentou remoção máxima de 53% em pH 3 e 25 °C, enquanto o carvão ativado comercial atingiu 100% de remoção nas mesmas condições. Apesar do desempenho inferior, o biocarvão mostrou potencial como alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas. Estudos futuros devem investigar processos de ativação para ampliar sua capacidade adsorvente.

PALAVRAS-CHAVE: Adsorção; Fármacos; Sustentabilidade**.**

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, introduzida no Brasil pelos portugueses em 1500, desempenha um papel essencial na economia e na história agrícola do país. Hoje, o Brasil é o maior produtor mundial dessa cultura, utilizada na fabricação de etanol, açúcar, biomassas e outros derivados, representando cerca de 2% do Produto Interno Bruto (PIB) (Goldemberg, 2008). De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), na safra 2019/2020, foram processadas 590,46 milhões de toneladas de cana, destacando sua importância histórica e contemporânea nos setores industriais. Subprodutos como o bagaço têm potencial para aplicações sustentáveis, em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que enfatiza o reaproveitamento industrial (Brasil, 2010).

O bagaço, gerado em grande volume, possui diversas aplicações, como a geração de energia e a produção de biocarvão, um material com alta capacidade de adsorção (Leite et al., 2019). Essa característica é promissora no enfrentamento de desafios ambientais, como a presença de medicamentos, incluindo ibuprofeno, nos recursos hídricos. O ibuprofeno, amplamente utilizado por suas propriedades terapêuticas, é comumente encontrado em ambientes aquáticos devido ao descarte inadequado e à ineficiência dos sistemas convencionais de tratamento de esgoto para sua remoção (Pacheco et al., 2019; Jones et al., 2003).

Transformar o bagaço em carvão ativado representa uma solução viável e sustentável para remover contaminantes emergentes, como o ibuprofeno, em águas residuais. O carvão ativado, obtido por processos de carbonização e ativação química ou física, possui alta porosidade e ampla área superficial, permitindo a adsorção eficiente de poluentes. Estudos demonstram que o ibuprofeno pode causar impactos significativos na fauna e flora aquáticas, reforçando a necessidade de estratégias mitigadoras (Freitas & Bueno, 2017; Richards et al., 2004).

Neste contexto, este trabalho visa desenvolver biocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar, avaliando sua eficiência na adsorção do ibuprofeno em águas contaminadas. A pesquisa aborda propriedades físico-químicas do carvão ativado, analisando fatores como tempo de contato, concentração do fármaco e dosagem necessária para a remoção. Busca-se otimizar o processo e oferecer uma alternativa sustentável aplicável em larga escala, contribuindo para a gestão integrada de resíduos e para a melhoria da qualidade dos recursos hídricos.

METODOLOGIA UTILIZADA

O comprimento de onda do ibuprofeno foi determinado como 222 nm, utilizado na curva de calibração do espectrofotômetro UV-VIS. Para isso, foi preparada uma solução estoque de ibuprofeno dissolvendo 20 mg do composto em 0,1 L de água destilada, resultando em uma concentração de 200 mg/L. Soluções estoque de carvão ativado pulverizado (CAP) e biocarvão (*Biocha*r) também foram preparadas, adicionando 350 mg de cada material a 0,1 L de água destilada, obtendo-se concentrações de 3500 mg/L.

A partir dessas soluções, foram feitas diluições para diferentes concentrações, submetendo-as a análises com variações de temperatura e pH. No espectrofotômetro, as análises seguiram a curva de calibração do ibuprofeno para medições em 222 nm, utilizando água destilada como branco. As amostras foram filtradas com acetato de celulose (0,45 µm) para garantir a pureza.

Concentrações de ibuprofeno foram medidas em intervalos de 5 a 30 minutos, e as soluções foram submetidas a testes de adsorção, nas quais foram adicionados CAP ou biocarvão, sob agitação constante em 300 rpm, utilizando agitador magnético de seis posições. As condições experimentais incluíram controle de temperatura (15 °C, 25 °C e 35 °C) em uma incubadora BOD e ajustes de pH para 3, 10 ou sem alterações, usando soluções de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 M. Após os ensaios, avaliou-se a eficiência de adsorção com base na taxa de redução do contaminante, calculada pela equação (1).

$$Taxa\ de\ redução(\%) = 100 \times (1 - \frac{cf}{ci}) \qquad \text{equação (1)}$$

Onde Cf e Ci representam as concentrações final e inicial do contaminante, respectivamente.

O biocarvão foi produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar, obtido após extração do caldo por moagem mecânica. O bagaço foi triturado, lavado com água destilada em agitador magnético por 1 hora e seco em estufa a 110 °C por 20 horas. Após secagem, foi peneirado com malha de 1,18 mm para uniformização. A carbonização ocorreu em mufla modelo EDG3P-S a 300 °C por 2 horas, com taxa de aquecimento controlada de 10 °C/min. O rendimento do processo foi calculado pela equação (2).

$$R = 100\% \times \frac{Mc}{Mes} \qquad \text{equação (2)}$$

Onde R é o rendimento (%); Mc é a massa carbonizada; Mes é a massa após secagem.

Após a carbonização, uma solução estoque de biocarvão (3500 mg/L) foi preparada. Seis amostras, com concentrações variando de 50 a 500 mg/L, foram analisadas para determinar a concentração ideal nas condições de adsorção de ibuprofeno, considerando as variações de temperatura e pH.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

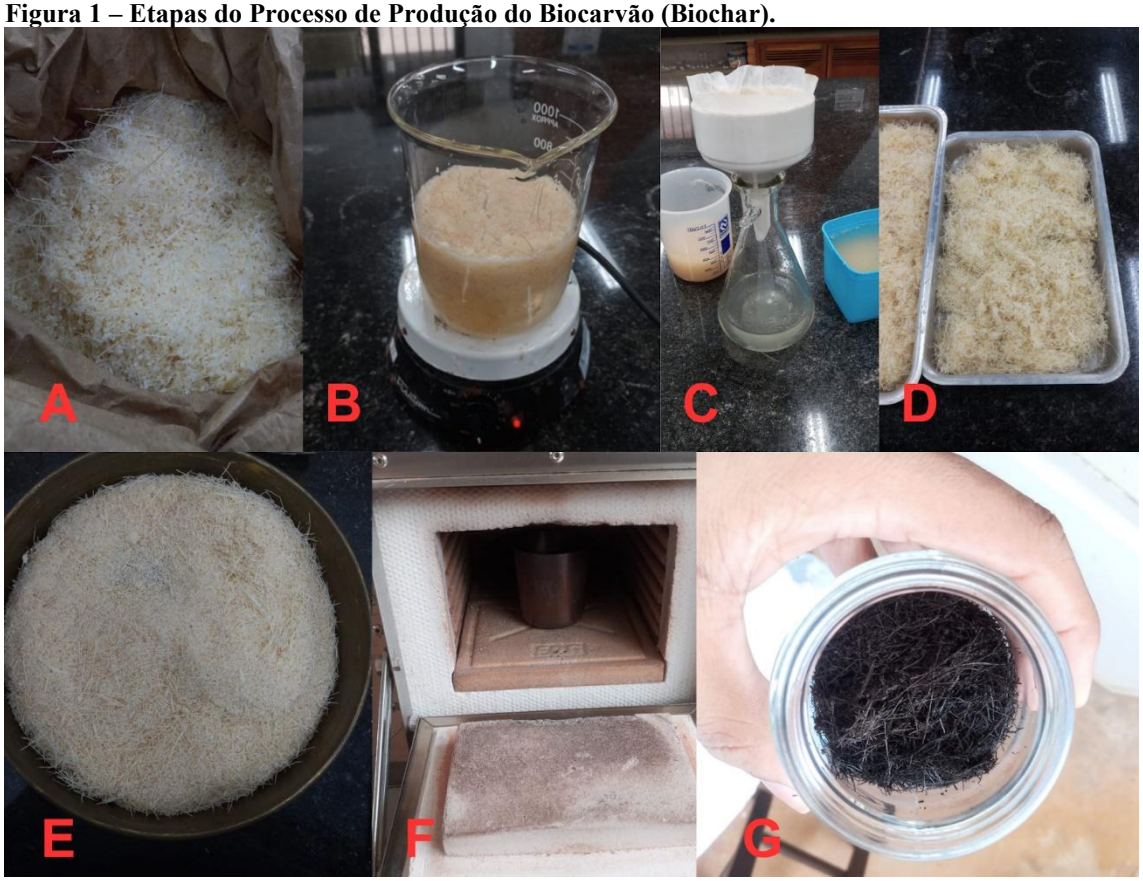
Com as soluções-mãe devidamente preparadas, iniciou-se a fase experimental. Dois béqueres foram utilizados para a separação das amostras, sendo determinado que 90 mL de água destilada e 10 mL da solução estoque de ibuprofeno deveriam ser adicionados a cada amostra, com base nos cálculos de diluição. O ajuste do pH das amostras foi realizado com soluções de hidróxido de sódio 0,5 M e ácido clorídrico 0,5 M. As medições de pH foram feitas com um pHmetro, e as soluções foram mantidas em agitação constante utilizando um agitador magnético.

Com os dados iniciais, as análises foram conduzidas sob variações específicas de temperatura, ajustadas para 35 °C, 25 °C e 15 °C, nas condições de pH 3, 10 e pH natural da mistura. A variação de temperatura foi controlada por uma incubadora BOD, onde a temperatura foi ajustada conforme necessário. Dentro da incubadora, um agitador magnético de 6 posições foi colocado para garantir a agitação constante das amostras durante a análise de concentração no espectrômetro. Após cada medição, o volume de carvão ativado (CAP) foi adicionado às amostras, que permaneceram na incubadora BOD para continuidade do experimento.

Para as temperaturas de 35 °C, 15 °C e 25 °C, três amostras foram preparadas. Dentre essas, duas passaram por ajustes de pH, enquanto uma amostra foi mantida com pH natural. Cada amostra consistiu em 90 mL de água destilada e 10 mL da solução estoque de ibuprofeno. Após os cálculos de diluição do carvão, 2,86 mL da solução estoque de PAC foram adicionados a cada amostra.

Após a conclusão das análises do PAC sob diferentes variações de temperatura, o processo de produção do biocarvão foi iniciado. A Figura 1 ilustra as etapas desse processo. Na imagem A, observa-se o bagaço de cana-de-açúcar já triturado. A imagem B mostra o bagaço sendo agitado em um agitador magnético durante o processo de lavagem com água destilada. Em seguida, a imagem C retrata a etapa de filtração do material. A imagem D exibe o material após a secagem em estufa a 110 °C por 20 horas, enquanto a imagem E apresenta o bagaço seco após ser peneirado com malha de 1,18 mm. Na imagem F, o material é mostrado durante o processo de carbonização em mufla a 300 °C por 2 horas. Finalmente, a imagem G exibe o biocarvão pronto.

Figura 1 – Etapas do Processo de Produção do Biocarvão (Biochar).

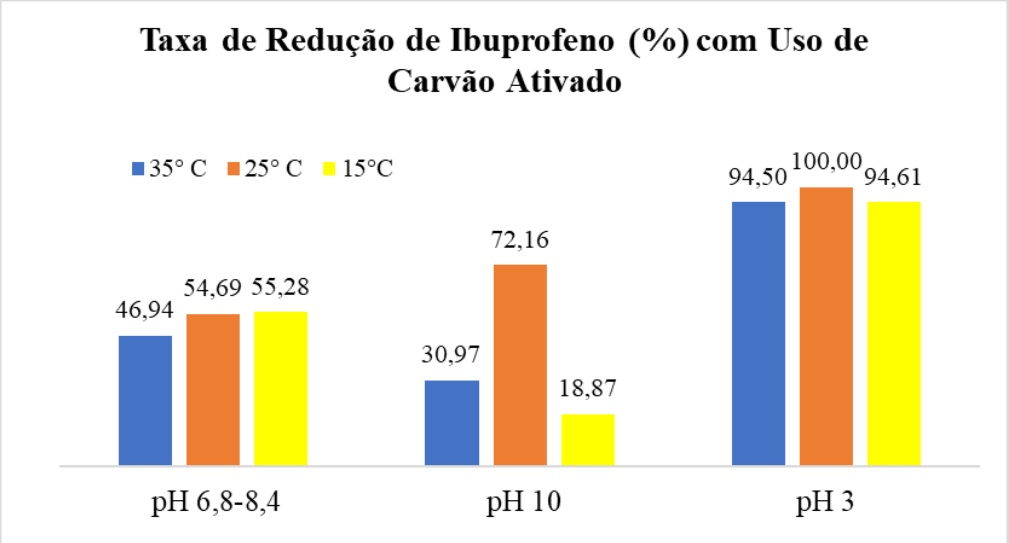


Fonte: Elaborado pelos autores

A amostra foi triturada em um cadinho utilizando um pistilo e, em seguida, peneirada com uma malha de 0,5 mm. O próximo passo consistiu em determinar a concentração de biocarvão a ser utilizada nas amostras. Para isso, foram realizados testes com seis diferentes quantidades de biocarvão. Vale ressaltar que, para esses testes, a mesma concentração de diluição de ibuprofeno foi mantida, com o objetivo de identificar a quantidade ideal de biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar.

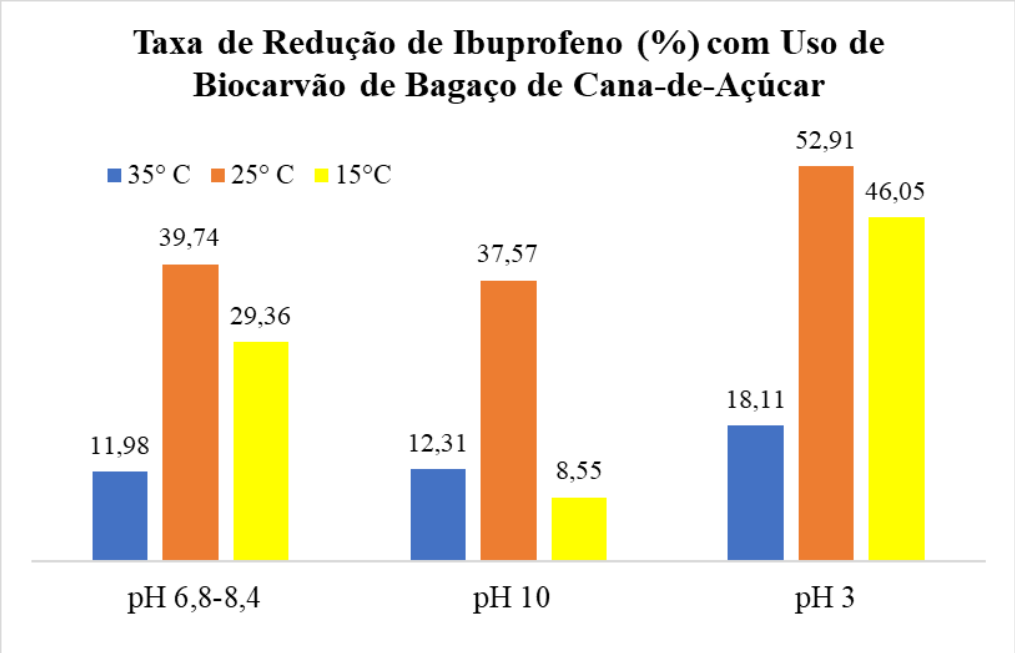
Os resultados das análises da concentração adsorvida pelo CAP foram comparados com os obtidos para o biocarvão, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3. Além disso, a variação de pH e seu impacto no processo de adsorção também foram avaliados.

Figura 2 – Porcentagens de remoção de Ibuprofeno utilizando o CAP para os diferentes valores de temperatura e pH



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 3 – Porcentagens de remoção de Ibuprofeno utilizando o biocarvão para os diferentes valores de temperatura e pH



Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados obtidos indicam uma diferença significativa na eficiência de remoção de contaminantes entre o carvão ativado e o biocarvão de cana-de-açúcar, variando conforme o pH e a temperatura. Em relação ao carvão ativado, observou-se que a faixa de pH 3 proporcionou o melhor desempenho em todas as temperaturas analisadas (35°C, 25°C e 15°C), com taxas de remoção superiores a 90%, chegando a 100% de eficiência à temperatura ambiente. Isso demonstra que, sob condições ácidas, o carvão ativado apresenta alta eficácia na remoção de contaminantes.

Por outro lado, quando o pH variou entre 6,8 e 8,4, a eficiência de remoção foi consideravelmente menor, variando entre 40% e 56%, independentemente das variações de temperatura. Essa constância sugere que o carvão ativado é menos sensível a mudanças de temperatura nessa faixa de pH neutro. No pH 10, a eficiência foi reduzida, especialmente a 15°C, onde os valores de remoção foram os mais baixos. No entanto, à temperatura de 25°C, o carvão ativado apresentou uma leve melhora, embora insuficiente para igualar os valores observados em pH ácido. Conclui-se que a faixa de pH ácido (pH 3) proporciona o melhor desempenho na remoção de contaminantes com carvão ativado, especialmente à temperatura ambiente, onde se obteve 100% de eficiência.

Quanto ao biocarvão de cana-de-açúcar sem ativação, os resultados também destacam o pH 3 como o mais eficiente, com remoção de até 53% dos contaminantes à temperatura de 25°C. Contudo, essa eficiência diminuiu para 46% a 15°C e apresentou um valor significativamente baixo de 18% a 35°C. No pH 10, as remoções nas temperaturas de 35°C e 15°C foram inexpressivas, enquanto a 25°C houve uma remoção de 37%, um resultado aceitável, considerando que o biocarvão não passou por ativação.

Na faixa de pH entre 6,8 e 8,4, o biocarvão de cana-de-açúcar apresentou uma remoção moderada, com melhor desempenho à temperatura de 25°C. Essa constatação reforça a ideia de que o biocarvão sem ativação é menos eficiente em condições alcalinas e neutras, mas pode ter um desempenho razoável em pH ácido.

Ao comparar ambos os materiais, o carvão ativado se mostrou significativamente mais eficaz do que o biocarvão de cana-de-açúcar em todas as condições analisadas. O carvão ativado alcançou remoções muito superiores, especialmente em pH ácido e à temperatura ambiente. Embora o biocarvão tenha apresentado uma eficiência aceitável em pH 3 e temperatura ambiente, os resultados gerais foram inferiores aos do carvão ativado.

Contudo, é importante ressaltar que o biocarvão de cana-de-açúcar não passou por um processo de ativação, o que pode ter influenciado seus resultados. Caso esse material seja ativado, é possível que sua eficiência aumente significativamente, tornando-o uma alternativa mais viável para a remoção de contaminantes.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Este estudo teve como objetivo principal avaliar o desempenho do biocarvão de cana-de-açúcar, sem ativação, na remoção de contaminantes em diferentes faixas de pH e temperaturas, utilizando o carvão ativado apenas como referência comparativa. Os resultados indicaram que o biocarvão de cana-de-açúcar apresentou sua melhor eficiência em condições de pH ácido (pH 3), com remoção de até 53% dos contaminantes à temperatura de 25°C. Em temperaturas mais elevadas, como 35°C, a eficiência foi reduzida, evidenciando uma maior sensibilidade do biocarvão às variações térmicas.

Embora o desempenho do biocarvão tenha sido inferior ao do carvão ativado em termos absolutos, o fato de alcançar valores significativos de remoção em pH ácido, mesmo sem passar por um processo de ativação, é promissor. Esses resultados sugerem que, com a ativação adequada, o biocarvão de cana-de-açúcar poderia melhorar substancialmente sua capacidade de remoção de contaminantes, tornando-se uma alternativa ambientalmente sustentável e potencialmente mais econômica em comparação ao carvão ativado.

A comparação com o carvão ativado demonstrou que, embora este material apresente eficiência mais elevada em uma ampla faixa de condições, o biocarvão de cana-de-açúcar pode ser otimizado para atingir resultados competitivos, especialmente em condições ácidas. Estudos futuros devem focar na ativação do biocarvão, bem como em sua aplicação em diferentes cenários de tratamento de água, para avaliar seu real potencial como uma solução viável e acessível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Freitas, L. C. da S., & Bueno, S. M. (2014). Carvão Ativo: Breve Histórico e Estudo de Sua Eficiência na Retenção de Fármacos. Universidade de São José do Rio Preto.

2. Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, 1(6).

3. Jones, O. A. H., Voulvoulis, N., & Lester, J. N. (2003). Potential impact of pharmaceuticals on environmental health. *Bulletin of the World Health Organization*, 81(10), 768-769.

4. Leite, A. J. B., Silva, T. L., & Rodrigues, L. A. (2019). Aplicação de biocarvões para remoção de ibuprofeno por adsorção: Tendências na produção, condições operacionais e mecanismos.

5. Pacheco, F. S., Roland, F., & Downing, J. A. (2019). Eutrophication reverses whole-lake carbon budgets. *Inland Waters*, 4(1), 41-48.

6. Richards, S. M., Wilson, C. J., Johnson, D. J., Castle, D. M., Lam, M., Mabury, S. A., Sibley, P. K., & Solomon, K. R. (2004). Effects of pharmaceutical mixtures in aquatic microcosms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(4), 1035-1042.