



Avaliação dos Fatores que Influenciam A Biossorção de Petróleo por Resíduos Lignocelulósicos: Aplicação de Fibras de Coco Residuais

Evaluation of Factors Influencing Crude Oil Biosorption by Lignocellulosic Residues: Application of Residual Coconut Fibers

Célia Karina Maia Cardoso

Doutorado em Engenharia Química, Professora Colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia, Brasil. <http://lattes.cnpq.br/6172968855313172>

Ícaro Thiago Andrade Moreira

Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeoquímica e Recursos Hídricos, Professor do Departamento de Oceanografia da Universidade Federal da Bahia, Brasil. <http://lattes.cnpq.br/9106175138631030>

Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato

Doutorado em Engenharia Química, Professora do curso de Engenharia Química da Universidade Salvador, Brasil. <http://lattes.cnpq.br/0152838979924698>

Resumo: Os derramamentos de petróleo em ambientes marinhos representam um dos principais desafios ambientais associados à indústria do petróleo, exigindo o desenvolvimento de tecnologias eficientes, de baixo custo e ambientalmente sustentáveis para sua remediação. Nesse contexto, resíduos lignocelulósicos têm se destacado como biossorbentes promissores devido à sua elevada disponibilidade, biodegradabilidade e capacidade de interação com hidrocarbonetos. Este capítulo apresenta uma avaliação experimental dos fatores que influenciam a biossorção de petróleo utilizando fibras de coco residuais como material biossorbente. Foi empregado um planejamento fatorial fracionário para investigar a influência da salinidade, do tempo de contato, da dose do adsorvente, do pH e da concentração de petróleo sobre a capacidade de biossorção. Os experimentos foram conduzidos com petróleo bruto da Bacia de Campos em água salina, e os resultados foram analisados estatisticamente utilizando o software MINITAB®. A análise dos efeitos demonstrou que a dose do adsorvente foi o fator de maior influência no processo, seguida pela concentração de petróleo, pelo tempo de contato e pela interação entre tempo e dose do adsorvente. Em contrapartida, pH e salinidade não apresentaram influência estatisticamente significativa nas condições avaliadas. Os resultados evidenciam que a definição adequada das condições operacionais é essencial para maximizar a eficiência da biossorção, fornecendo subsídios para a otimização de processos de remediação ambiental e para a valorização de resíduos lignocelulósicos em aplicações voltadas à resposta a derramamentos de petróleo.

Palavras-chave: biossorção; resíduos lignocelulósicos; fibras de coco; planejamento fatorial; derramamentos de petróleo.

Abstract: Oil spills in marine environments represent one of the major environmental challenges associated with the petroleum industry, highlighting the need for efficient, low-cost, and environmentally sustainable remediation technologies. In this context, lignocellulosic residues have emerged as promising biosorbents due to their high availability, biodegradability, and affinity for hydrocarbons. This chapter presents an experimental evaluation of the factors influencing petroleum biosorption using residual coconut fibers as a biosorbent material. A

fractional factorial design () was employed to investigate the effects of salinity, contact time, adsorbent dosage, pH, and oil concentration on biosorption capacity. The experiments were conducted using Campos Basin crude oil in saline water, and the results were statistically analyzed using MINITAB® software. The analysis revealed that adsorbent dosage was the most influential factor affecting biosorption, followed by oil concentration, contact time, and the interaction between contact time and adsorbent dosage. In contrast, pH and salinity did not show statistically significant effects under the evaluated conditions. Overall, the findings demonstrate that optimizing operational conditions is essential for maximizing biosorption efficiency, providing valuable insights for the development of remediation processes and for the valorization of lignocellulosic residues as biosorbents for oil spill response.

Keywords: biosorption; lignocellulosic residues; coconut fibers; factorial design; oil spills.

INTRODUÇÃO

Acidentes envolvendo derramamento de petróleo que ocorrem no mar, tais como em navios petroleiros, em plataformas e explosão de poço durante a exploração, têm sido uma preocupação crescente a nível mundial, pois os danos ambientais de um derramamento em ecossistemas marinhos são grandes (ITOPF, 2022). Isso ocorre pois o petróleo, seus derivados e os resíduos gerados contêm hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que representam um dos principais poluentes orgânicos persistentes no ambiente. Eles são causadores de ações mutagênicas e tumorais, que afetam a flora, a fauna e a saúde humana (Ramirez *et al.*, 2017). Em consequência, os danos não são apenas ambientais, mas também socioeconômicos, uma vez que o turismo local é prejudicado, além do comércio de peixes e mariscos.

Dentre as primeiras técnicas utilizadas em um derrame de petróleo, estão a utilização de barreiras de contenção e materiais adsorventes, com o intuito de conter e remover o petróleo do ambiente marinho, impedindo que este atinja ambientes mais sensíveis. O uso de fibras naturais como adsorventes tem como principais vantagens o baixo custo, baixa abrasividade, atoxicidade, baixa densidade, além de aspectos ecológicos e sociais, em razão da melhor reciclabilidade e biodegradabilidade (Pessoa *et al.*, 2019). A fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) destaca-se como fibra natural para ser utilizada como bioadsorvente de petróleo, devido a sua grande disponibilidade em forma de resíduos no Brasil (Luis-Zarate *et al.*, 2018; Cardoso *et al.*, 2025a; Cardoso *et al.*, 2025b).

Muitos trabalhos são encontrados na literatura utilizando adsorventes lignocelulósicos, como fibra de coco (Cardoso *et al.*, 2021), fibra de sisal (Liu *et al.*, 2018), fibra de algodão (Cao *et al.*, 2017), entre outras. Essas fibras possuem características oleofílicas e hidrofílicas, mas apresentam resultados positivos na recuperação de poluentes em ambiente marinho. Entretanto, é importante salientar que estes resultados encontrados na literatura sofrem variações decorrentes das condições experimentais às quais foram submetidos.

A variação das condições experimentais é importante, uma vez que em condições reais existem alterações de parâmetros como pH, salinidade, temperatura,

hidrodinâmica, entre outros, que vão depender da área em que o contaminante foi derramado. Esses parâmetros interferem na sorção, uma vez que alteram as propriedades do óleo, bem como as condições de adsorção da fibra (Silva, 2016). Logo, analisar esses parâmetros separadamente é importante para conhecer o comportamento de sorção de cada fibra em ambientes diferentes e, assim, a resposta ao derramamento será mais rápida. A partir daí, o objetivo desse estudo foi realizar uma análise de planejamento fatorial para identificar os fatores significativos que interferem na sorção de petróleo utilizando fibras de coco *in natura* residual como bioadsorvente.

METODOLOGIA

Os experimentos do teste de sorção foram definidos, inicialmente, usando a técnica de planejamento experimental, com o objetivo de investigar os efeitos dos fatores experimentais que influenciam a adsorção de petróleo pelas fibras de coco *in natura*. Um experimento fatorial fracionário de dois níveis codificados (-1: baixo, +1: alto) e cinco fatores foi realizado. Os fatores avaliados foram: salinidade (3,5% e 1,5%), tempo de contato entre o adsorbato e o adsorvente (90 min e 5 min), dose do adsorvente (1,0 g e 0,5 g), pH (9 e 5) e concentração de óleo em água (25 mL/L e 80 mL/L) (Mahmoud, 2020).

Os testes foram realizados em uma mesa agitadora com movimentos reciprocantes e aproximadamente 126 ciclos/minuto. As fibras foram condicionadas em minibarreiras de contenção de malha de polipropileno com dimensões de 2x5 cm visando reduzir perdas de massa durante todo o experimento gravimétrico dos testes de sorção (Cardoso *et al.*, 2021). Cada amostra do material adsorptivo foi colocada em contato com a mistura de água salina e óleo cru da Bacia de Campos. Após o experimento, as amostras foram secas a frio no liofilizador para retirar toda a umidade presente após a sorção. Em seguida, foi determinada a massa do material adsorvente para determinação gravimétrica da capacidade de sorção das fibras, de acordo com a Equação 1.

$$q = \frac{mf - m0}{m0} \quad (1)$$

Em que q é a capacidade de biossorção (g.g^{-1}), $m0$ é a massa inicial do biossorvente (g) e mf é a massa final do biossorvente após a sorção (g).

O desenho fatorial fracionado desse estudo é representado pela configuração 25-1, concebendo metade da fração de um planejamento fatorial completo que simplifica o experimento. Assim, são estudados 5 fatores em 16 ensaios experimentais. A resolução desse experimento é Resolução V, ou seja, nenhum efeito principal ou interação de dois fatores é confundido com qualquer outro efeito principal ou interação de dois fatores (Srinivasan; Viraraghavan, 2010).

Todos os ensaios foram replicados e, portanto, 32 experimentos foram conduzidos em ordem aleatória. As análises estatísticas foram realizadas no software estatístico MINITAB TM. Com o resultado dos efeitos dos fatores, uma otimização

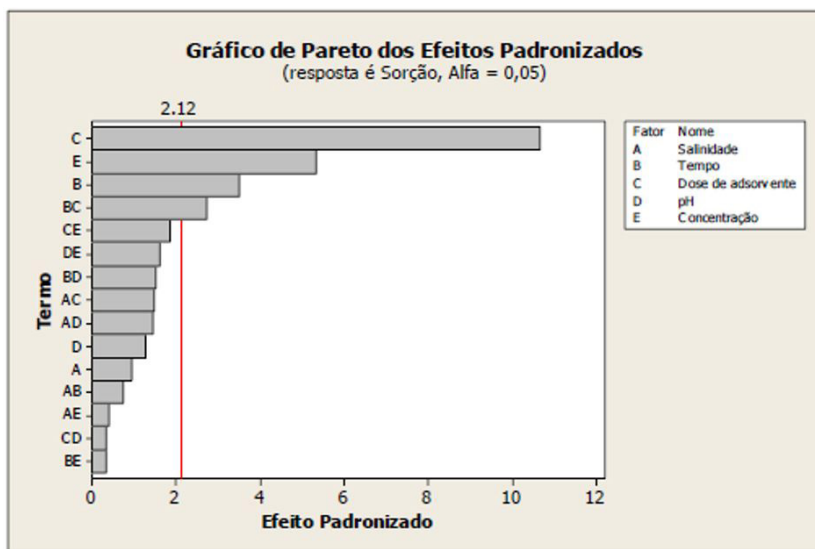
experimental será realizada para próximos experimentos de sorção, determinando a salinidade, tempo de contato, dose do adsorvente, pH e concentração de óleo em água que deverão ser utilizados, de acordo com seus melhores resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz do desenho experimental de valores não codificados para os fatores e a resposta, em termos de sorção de óleo da Bacia de Campos para todas as corridas experimentais foi realizada no software MINITAB. Um modelo de regressão linear foi ajustado aos dados experimentais através da técnica dos mínimos quadrados utilizando o programa.

A partir daí, o gráfico de Pareto foi confeccionado a fim de representar visualmente os valores absolutos dos efeitos dos fatores principais e os efeitos das interações dos fatores (Figura 1). A linha de referência desenhada indica os fatores que são potencialmente importantes. Esses fatores são aqueles que se estendem além dessa linha.

Figura 1 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.



Fonte: Autoria própria (2022).

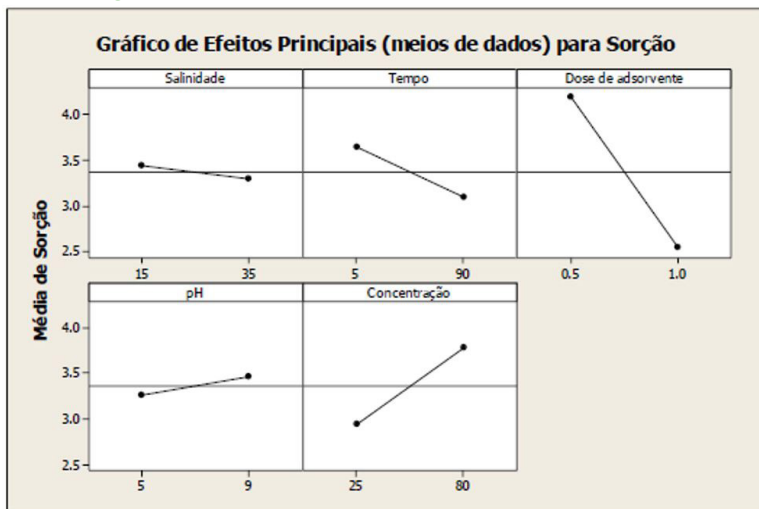
Para um nível de confiança de 95%, os fatores desse estudo que são considerados estatisticamente significativos são: Tempo, Dose de adsorvente, Concentração e a interação Tempo*Dose de adsorvente.

Na Figura 1, é possível identificar os resultados dos valores do efeito. O fator dose de adsorvente foi o que obteve maior efeito na sorção de petróleo, seguido pela concentração do adsorbato, pelo tempo de contato entre o adsorbato e o adsorvente e, por fim, pela interação entre tempo e dose de adsorvente. Os demais

fatores, conforme representados, não foram estatisticamente significativos.

O gráfico de efeitos principais (Figura 2) apresenta a força relativa dos efeitos de diversos fatores. É possível verificar que a dose de adsorvente foi a variável que obteve maior efeito na remoção de petróleo em ambiente salino. Uma diminuição da dose de adsorvente de 1g para 0,5g aumenta a remoção de petróleo da Bacia de Campos a partir da sorção pela fibra de coco *in natura*.

Figura 2 - Gráfico de efeitos principais para sorção.



Fonte: Autoria própria (2022).

A concentração de petróleo apresentou comportamento oposto ao observado para a dose de adsorvente, uma vez que o nível superior do fator (+) resultou em maiores valores de bio-sorção. Esse resultado indica que concentrações mais elevadas de petróleo favorecem a interação entre o óleo e as fibras de coco *in natura*, aumentando sua capacidade de sorção. Comportamento semelhante foi relatado por Abdelwahab, Nasr e Thabet (2017), que observaram aumento da capacidade de sorção com a elevação da concentração inicial de óleo.

O tempo de contato constituiu o terceiro fator com efeito estatisticamente significativo, sendo a condição de menor tempo (5 min) a que proporcionou os melhores resultados de bio-sorção. Esse comportamento é particularmente relevante para aplicações em derramamentos de petróleo, uma vez que materiais capazes de remover rapidamente o contaminante contribuem para reduzir seu espalhamento e minimizar impactos ambientais e contaminações secundárias.

A salinidade não apresentou influência estatisticamente significativa sobre a bio-sorção nas condições avaliadas, embora tenha sido observado um discreto efeito negativo, indicando uma tendência de maior sorção em menores salinidades. Esse comportamento pode estar relacionado à menor solubilidade do petróleo em meios com maior concentração de NaCl, favorecendo a formação de gotas de maior tamanho, que dificultam a difusão do óleo para os poros internos dos materiais adsorventes (Diraki *et al.*, 2019).

Da mesma forma, o pH também não apresentou efeito estatisticamente significativo. Entretanto, foi observado um leve efeito positivo em valores mais elevados de pH, sugerindo que condições mais alcalinas podem favorecer a bioadsorção pelas fibras de coco, embora essa influência tenha sido inferior à dos fatores concentração, dose do adsorvente e tempo de contato.

Em conjunto, esses resultados evidenciam que o conhecimento da influência das variáveis operacionais é essencial para o desenvolvimento e a aplicação de bioadsorventes à base de resíduos lignocelulósicos. A definição das condições mais favoráveis de operação permite aumentar a eficiência do processo de bioadsorção e ampliar o potencial de utilização desses materiais em estratégias de resposta a derramamentos de petróleo, aliando desempenho técnico, baixo custo e valorização de resíduos agroindustriais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que as fibras de coco residuais apresentam elevado potencial para aplicação como bioadsorventes na remoção de petróleo em águas salinas, reforçando sua viabilidade como alternativa de baixo custo e de valorização de resíduos agroindustriais. A avaliação experimental permitiu identificar que a capacidade de bioadsorção é influenciada principalmente pela dose do adsorvente, seguida pela concentração de petróleo, pelo tempo de contato e pela interação entre tempo e dose do adsorvente. Em contrapartida, as variáveis pH e salinidade não apresentaram influência estatisticamente significativa nas condições avaliadas. Esses resultados fornecem subsídios para a definição de condições operacionais mais eficientes em processos de bioadsorção, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de resposta a derramamentos de petróleo.

REFERÊNCIAS

ABDELWAHAB, O.; NASR, S. M.; THABET, W. M. Palm fibers and modified palm fibers adsorbents for different oils. **Alexandria Engineering Journal**, [S. l.], v. 56, n. 4, p. 749–755, 2017. DOI: 10.1016/j.aej.2016.11.020.

ANTONY, J. **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. Segunda Edição. London: Elsevier, 2014.

CARDOSO, C. K. M.; MATTEDI, S.; LOBATO, A. K. de C. L.; MOREIRA, Í. T. A. **Remediation of petroleum-contaminated saline water using value-added adsorbents derived from waste coconut fibres**. *Chemosphere*, [S. l.], v. 279, 2021.

CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. S.; OLIVEIRA, O. M. C.; LOBATO, A. K. C. L. **Bio-based sorbents for marine oil spill response:**

advances in modification, circularity, and waste valorization. *Resources*, v. 14, n. 9, 2025a.

CARDOSO, C. K. M.; MOREIRA, Í. T. A.; QUEIROZ, A. F. S.; OLIVEIRA, O. M. C.; LOBATO, A. K. C. L. Multiscale evaluation of raw coconut fiber as biosorbent for marine oil spill remediation: from laboratory to field applications. *Resources*, v. 14, n. 10, art. 159, 2025b.

DIRAKI, A.; MACKEY, H.R.; MCKAY, G.; ABDALA, A. **Removal of emulsified and dissolved diesel oil from high salinity wastewater by adsorption onto graphene oxide.** *J. Environ. Chem. Eng.* v. 7, 2019.

ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation. **Oil Tanker Spill Statistics 2021.** Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>. Acesso em: 20 de abril de 2022.

LUIS-ZARATE, V. H.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, C.; ALATRISTE-MONDRAGON, F.; CHAZARO-RUIZ, L. F.; RANGEL-MENDEZ, J. R. Coconut endocarp and mesocarp as both biosorbents of dissolved hydrocarbons in fuel spills and as a power source when exhausted. *Journal of Environmental Management*, v. 211, p. 103-11, 2018.

MAHMOUD, M. A.; TAYEB, A. M.; DAHER, A. M. **Adsorption study of oil spill cleanup from seawater using natural sorbent.** *Chemical Data Collections*, [S. l.], v. 41, n. June, p. 100896, 2022. DOI: 10.1016/j.cdc.2022.100896. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2022.100896>.

PESSÔA, T. S.; FERREIRA, L. E. L.; SILVA, M. P.; NETO, L. M. P.; NASCIMENTO, B. F.; FRAGA, T. J. M.; JAGUARIBE, E. F.; CAVALCANTE, J. V.; SOBRINHO, M. A. M. Açaf waste beneficiation by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, v. 240, p. 118047, 2019.

RAMIREZ, M. I.; AREVALO, A. P.; SOTOMAYOR, S.; BAILON-MOSCOSO, N. Contamination by oil crude extraction – Refinement and their effects on human health. *Environmental Pollution*, v. 231, n. 1, p. 415-425, 2017.

SILVA, A.P. da. **Fibra de Calotropis procera: Uma alternativa eficaz na remoção de 101 hidrocarbonetos de petróleo em meio salino como bioadsorvente.** Repositório Institucional UFRN, 2016.

SRINIVASAN, A.; VIRARAGHAVAN, T. **Oil removal from water using biomaterials.** *Bioresour. Technol.* v. 101, p. 6594–6600, 2010.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq nº 126567/2017-4) pelo apoio financeiro.