ADSORÇÃO DE VERMELHO CONGO POR BIOCARVÕES ATIVADOS DE RESÍDUOS DO CACAU.

Autores: Allan Santos Silva, Joyce de Almeida Carminati, Manuela Moura Amorim, Luciene Paula Roberto Profeti, Demetrius Profeti.

[1]Universidade Federal do Espírito Santo. Alto Universitário s/n – Guararema, 29500-000, Alegre, Espírito Santo, Brasil, hilarioallans@gmail.com, joyceacarminati@gmail.com, manuamorim94@gmail.com, luciene.profeti@ufes.br, demetrius.profeti@ufes.br.

Resumo: A busca por materiais adsorventes obtidos a partir de resíduos agroindustriais tem ganhado destaque como alternativa para o tratamento de efluentes contendo corantes. Neste estudo, foram avaliados biocarvões ativados produzidos a partir de casca de cacau e casca de amêndoa de cacau para a remoção de Vermelho Congo em solução aquosa. Os materiais foram caracterizados por FTIR, sendo identificadas bandas associadas a grupos O–H, C–H, C=O e C–O, com redução de grupos alifáticos e oxigenados após a pirólise e alterações adicionais após a ativação. Os materiais foram submetidos a ensaios de adsorção utilizando concentrações iniciais de 100, 300 e 500 mg L^{-1} e tempos de contato de 3 e 24 h, a 25 °C. Também foi determinado o ponto de carga zero (pHPZC) dos adsorventes, obtendo-se valores de 9,71 para o biocarvão de casca de cacau e 9,66 para o biocarvão de casca de amêndoa de cacau. Após 3 h, a remoção variou de aproximadamente 28 e 6% para o biocarvão de casca de cacau e de 30 e 9% para o biocarvão de casca de amêndoa de cacau, entre 100 e 500 mg L^{-1}. Após 24 h, foram obtidas remoções de 27, 92 e 36% para o biocarvão de casca de cacau e de 98, 92 e 63% para o biocarvão de casca de amêndoa de cacau, nas concentrações de 100, 300 e 500 mg L^{-1}, respectivamente. O aumento do tempo de contato favoreceu a remoção do corante, enquanto o aumento da concentração inicial promoveu maior capacidade de adsorção, mas não necessariamente maior remoção percentual. Os resultados indicam o potencial dos biocarvões avaliados para a remoção de Vermelho Congo, com destaque para o material obtido da casca de amêndoa de cacau.

Palavras-chave: Adsorção. Vermelho Congo. Biocarvão ativado. Resíduos agroindustriais. Casca de cacau.
Área do Conhecimento:

Introdução

O descarte inadequado de efluentes industriais pode ocasionar alterações nos parâmetros físico-químicos em corpos hídricos, comprometendo sua qualidade e impactando negativamente os ecossistemas aquáticos. Em resposta aos impactos causados pelo lançamento desses resíduos no ambiente, o desenvolvimento de tecnologias de tratamento tem se tornado uma área de crescente interesse ambiental e industrial (Jahan, Singh, 2023; Afolalu *et al*., 2022).

Os efluentes industriais apresentam composição complexa e variável, podendo conter corantes sintéticos e outros poluentes orgânicos recalcitrantes. Muitos desses compostos apresentam elevada estabilidade química e resistência à degradação biológica, o que limita sua remoção pelos tratamentos convencionais e favorece sua permanência nos corpos hídricos (Oladimeji *et al*., 2024; Sabić Runjavec, Vuković Domanovac, Meštrović, 2022).

Os processos convencionais de tratamento de efluentes foram desenvolvidos principalmente para a remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica biodegradável. No entanto, esses processos frequentemente apresentam limitações na remoção de contaminantes dissolvidos, como corantes sintéticos, compostos farmacêuticos e metais pesados. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de tecnologias complementares capazes de aumentar a eficiência de remoção desses compostos. Entre as alternativas empregadas para esse fim, a adsorção se destaca devido à sua simplicidade operacional e capacidade de remover diferentes classes de contaminantes (Raji *et al*., 2023; Manna, Sen, 2023; Sathya *et al.,* 2022).

A adsorção consiste em um fenômeno de transferência de massa no qual moléculas, íons ou partículas presentes em um fluido são retidos na superfície de um material sólido denominado adsorvente. Entre os materiais empregados nesse processo, o carvão ativado destaca-se como um

dos adsorventes mais utilizados devido à sua elevada área superficial específica e estrutura porosa, características que favorecem a remoção de diferentes contaminantes. No entanto, os custos associados à sua produção e regeneração têm estimulado a busca por materiais alternativos de menor custo, especialmente aqueles obtidos a partir de resíduos agroindustriais (Raninga *et al*., 2023; Al-Saeedi, Ashour, Alprol, 2023).

Os resíduos agroindustriais gerados durante o processamento de produtos vegetais são destinados à disposição no solo ou utilizados como combustível de baixo rendimento energético. Embora essas práticas representem formas de aproveitamento, elas geralmente apresentam baixo valor agregado, o que tem incentivado a busca por alternativas alinhadas aos princípios da economia circular. Grande parte desses resíduos é constituída por materiais lignocelulósicos, algo de interesse na biorrefinaria. Além disso, materiais com elevado teor de lignina podem apresentar maior rendimento na produção de biocarvão, material amplamente empregado na obtenção de adsorventes (Cusioli *et al.,* 2023; Simón et al., 2022).

A casca de cacau é um subproduto gerado em grandes quantidades durante o processamento dos frutos do cacaueiro. A cadeia produtiva do chocolate possui importância econômica para o agronegócio brasileiro. Segundo a Faostat, em 2022 o Brasil colheu cerca de 274 mil toneladas de cacau, especialmente nos estados da Bahia e do Pará, responsáveis por grande parte da produção nacional (Rocha *et al*., 2026; Nascimento *et al*., 2025; Santos *et al*., 2025).

A casca representa aproximadamente 70 a 80% da massa total do fruto e ainda possui baixo aproveitamento, sendo frequentemente deixada no solo após o processamento. A casca de amêndoa representa cerca de 12 a 20% da massa da amêndoa e ainda apresenta baixo aproveitamento. Em razão de sua composição lignocelulósica e da presença de grupos funcionais capazes de interagir com diferentes espécies químicas, esse resíduo tem sido investigado como matéria-prima para a obtenção de adsorventes (Donkor *et al*., 2026; Anoraga *et al.,* 2024; Díaz-González *et al*., 2022).

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de biocarvões obtidos a partir de casca de cacau e casca de amêndoa de cacau para a remoção do corante Vermelho Congo em solução aquosa, bem como caracterizar os materiais por meio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e determinação do ponto de carga zero (pHPZC).

Metodologia

Obtenção e preparo da matéria-prima

As matérias-primas utilizadas na produção dos biocarvões foram obtidas por meio de doação da Chocosol, uma fábrica de chocolate localizada na Universidade Estadual de Santa Cruz e consistiram em casca da vagem do cacau (externa) e casca de amêndoa de cacau, ambas provenientes do processamento do fruto. Inicialmente, os materiais foram submetidos à lavagem com água destilada para remoção de impurezas superficiais e, posteriormente, secos em estufa a 100°C até obtenção de massa constante. Após a secagem, os materiais foram encaminhados diretamente para a etapa de pirólise.

Produção dos biocarvões

Após a etapa de secagem, as matérias-primas foram submetidas ao processo de pirólise em forno tipo mufla, sob atmosfera inerte de N_2 e sem contato com o oxigênio. A pirólise foi realizada à temperatura de 700 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} e tempo de permanência de 60 min na temperatura de trabalho. Ao término do tratamento térmico, os materiais permaneceram no forno até o resfriamento e atingimento de temperatura adequada para o manuseio.

Classificação granulométrica e acondicionamento

Após a retirada dos materiais pirolisados do forno, os biocarvões obtidos foram pesados para determinação do rendimento do processo de pirólise. Em seguida, os materiais foram triturados com auxílio de almofariz e pistilo e submetidos à classificação granulométrica, obtendo-se partículas na faixa de 60 e 80 mesh.

Ativação física dos biocarvões com CO_2

A ativação física dos biocarvões foi realizada após a classificação granulométrica, utilizando CO_2 como agente ativante. Uma quantidade determinada de cada biocarvão foi acondicionada em cadinho de porcelana e introduzida em um tubo de quartzo acoplado a um forno tubular, devidamente vedado. Inicialmente, o sistema foi submetido à passagem de N_2 para remoção do oxigênio residual. Em seguida, foi estabelecido fluxo de CO_2 de 10 mL min^{-1}, enquanto a temperatura foi elevada a uma taxa de 10 °C min^{-1} até atingir 700 °C. Após atingir a temperatura de ativação, os biocarvões permaneceram por 60 min sob fluxo contínuo de CO_2.

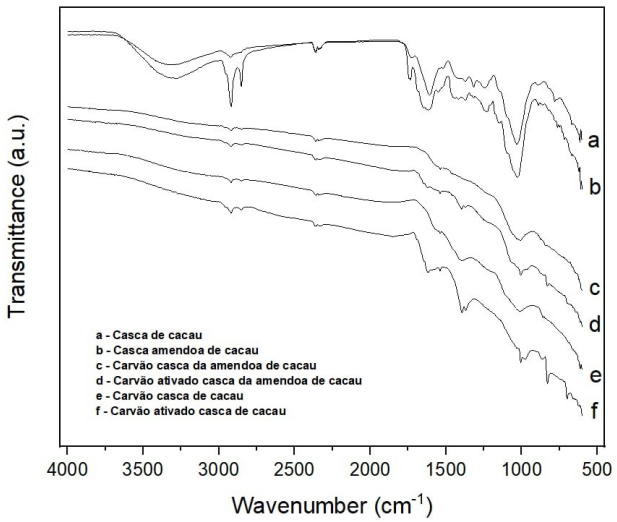
Avaliação do processo de adsorção

Os ensaios de adsorção do corante Vermelho Congo (VC) em solução aquosa foram realizados em sistema de batelada, utilizando 0,0499 ± 0,0004 g de adsorvente e soluções com concentrações iniciais de 100, 300 e 500 mg L^{-1}. Os ensaios foram conduzidos nos tempos de contato de 3 e 24 h, sob agitação de 100 rpm e temperatura controlada de 25 °C. Cada condição experimental foi realizada em duplicata.

Após os períodos de contato estabelecidos, as amostras foram coletadas e separadas por filtração utilizando filtro de seringa. A concentração remanescente do Vermelho Congo em solução foi determinada por espectrofotometria na região do visível com comprimento de onda em 500 nm, a partir de uma curva de calibração previamente construída.

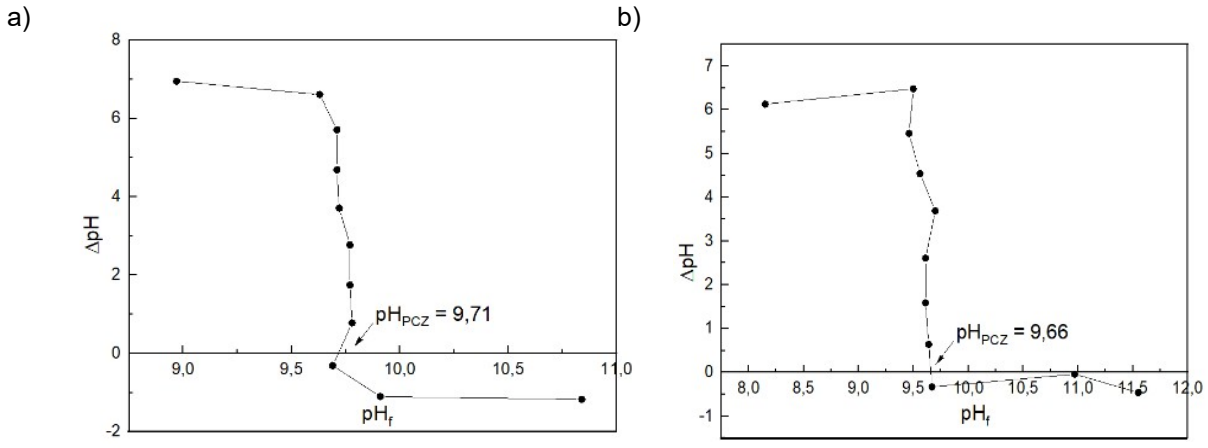
Resultados

Figura 1. Espectros na região do infravermelho para o as cascas de cacau e os biocarvões (sem ativar e ativados)



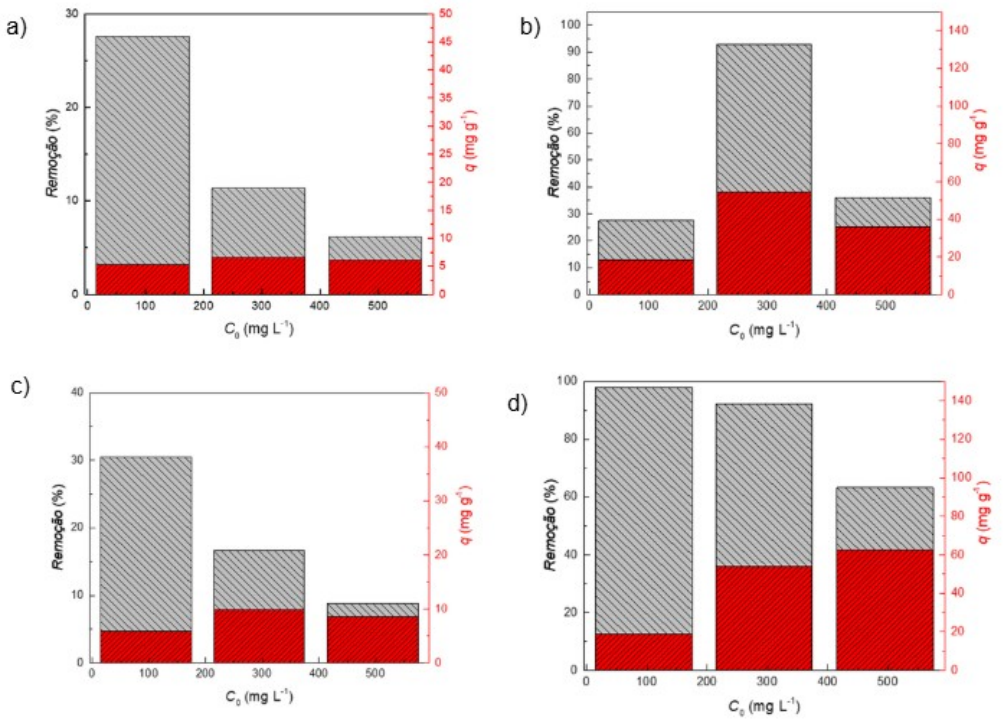
Fonte: Os autores, 2026.

Figura 2. pH do ponto de carga zero do biocarvões. a) Casca de Cacau; b) Casca de amêndoa de cacau.



Fonte: Os autores, 2026.

Figura 3. Remoção de vermelho congo em biocarvão ativado de casca de cacau e de casca de amêndoa de cacau, respectivamente. a) 3h; b) 24h, c) 3h; d) 24h.



Fonte: Os autores, 2026.

Discussão

Os espectros de FTIR (Figura 1) evidenciam alterações na composição química das cascas de cacau e de amêndoa após a pirólise e ativação. Nas biomassas precursoras, destaca-se a banda em 3200–3600 cm^{-1}, atribuída ao estiramento O–H, relacionada principalmente a grupos hidroxila presentes nos constituintes lignocelulósicos e à umidade absorvida. As bandas na região de 2920–2850 cm^{-1} correspondem aos estiramentos C–H de grupos alifáticos, associados principalmente a estruturas $–CH_2–$ e $–CH_3$, enquanto a região próxima a 1700 cm^{-1} está relacionada ao estiramento C=O de grupos carbonílicos. A banda em aproximadamente 1020 cm^{-1}, atribuída a vibrações de estiramento C–O, associadas a grupos oxigenados presentes na estrutura da biomassa (Marsolla, et al., 2025; Romero-Bonilla, et al., 2025).

Após a pirólise e ativação, a redução da intensidade dessas bandas indica a degradação de grupos funcionais oxigenados e de estruturas alifáticas durante o tratamento térmico. Essas alterações são compatíveis com a transformação dos componentes lignocelulósicos e com a formação de uma estrutura carbonácea progressivamente mais aromatizada e termicamente estável.

O ponto de carga zero (pHPZC) da casca da amêndoa de cacau e da casca de cacau foi determinado em 9,66 e 9,71, respectivamente. A proximidade entre os valores indica que ambos os materiais apresentam características superficiais semelhantes. Como o pHPZC é elevado, a superfície dos adsorventes permanece positivamente carregada em valores de pH inferiores a aproximadamente 9,7 e negativamente carregada em pH superiores a esse valor (Veja *et al.,* 2024).

As Figuras 3 e 4 apresentam a porcentagem de remoção e a capacidade de adsorção (q) do Vermelho Congo pelos biocarvões de casca de cacau e de casca de amêndoa de cacau, respectivamente. Em 3 h de contato, observou-se uma redução da remoção com o aumento da concentração inicial. Para o biocarvão de casca de cacau, os valores passaram de aproximadamente 28% em 100 mg L^{-1} para 6% em 500 mg L^{-1}. No biocarvão de casca de amêndoa de cacau, a remoção variou de aproximadamente 30% para 9% nas mesmas condições.

Com o aumento do tempo de contato para 24 h, a remoção foi significativamente maior, sobretudo para o biocarvão de casca de amêndoa de cacau. Nesse período, foram obtidas remoções de aproximadamente 27, 92 e 36% para o biocarvão de casca de cacau e de 98, 92 e 63% para o biocarvão de casca de amêndoa de cacau, nas concentrações de 100, 300 e 500 mg L^{-1}, respectivamente. A maior eficiência observada em 24 h indica que o período de 3 h ainda não foi suficiente para atingir o desempenho obtido em maior tempo de contato.

A capacidade de adsorção apresentou tendência de aumento com a concentração inicial, principalmente após 24 h. Esse aumento no tempo de contato processos de cinética de adsorção lentos, elevando a quantidade adsorvida por unidade de massa. Como esperado, esse aumento não resulta necessariamente em maior remoção percentual. Em 500 mg L^{-1}, por exemplo, a maior quantidade de corante disponível foi acompanhada por menor percentual de remoção. Isso se deve a condição de equilíbrio atingida nessa condição, onde a alta concentração remanescente de VC faz o valor da porcentagem de remoção diminuir.

Os resultados podem ser relacionados aos valores de pHPZC de 9,66 para a casca de amêndoa de cacau e 9,71 para a casca de cacau. Como o Vermelho Congo apresenta caráter aniônico, em valores de pH inferiores ao pHPZC as superfícies dos biocarvões tendem a apresentar carga predominantemente positiva, favorecendo a interação eletrostática com as espécies aniônicas do corante. Assim, as características superficiais dos materiais podem ter contribuído para a remoção observada, especialmente em condições nas quais o pH do sistema se encontra abaixo do pHPZC.

Conclusão

Os resultados demonstraram que a pirólise e ativação promoveram alterações nos grupos funcionais das biomassas, com redução das bandas associadas a O–H, C–H, C=O e C–O e formação de uma estrutura carbonácea mais aromatizada. Os valores de pHPZC de 9,66 e 9,71 indicaram características superficiais semelhantes entre os biocarvões e favoreceram a adsorção do Vermelho Congo, de caráter aniônico, em condições de pH inferiores ao pHPZC. O aumento do tempo de contato de 3 para 24 h proporcionou maior remoção do corante demonstrando uma cinética de adsorção lenta. Como esperado, o aumento da concentração inicial proporcionou um aumento da quantidade adsorvida e uma diminuição na porcentagem de remoção.

Referências

AFOLALU, Sunday A. et al. Waste pollution, wastewater and effluent treatment methods–an overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 3282-3288, 2022.

AL-SAEEDI, Sameerah I.; ASHOUR, Mohamed; ALPROL, Ahmed E. Adsorption of toxic dye using red seaweeds from synthetic aqueous solution and its application to industrial wastewater effluents. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1202362, 2023.

CUSIOLI, Luís Fernando et al. Preparation of a new adsorbent material from agro-industrial waste and comparison with commercial adsorbent for emerging contaminant removal. **Processes**, v. 11, n. 8, p. 2478, 2023.

JAHAN, Sarwat; SINGH, Ajay. Causes and impact of industrial effluents on receiving water bodies: a review. **Malaysian Journal of Science and Advanced Technology**, p. 111-121, 2023.

MANNA, Madhumita; SEN, Sujit. Advanced oxidation process: a sustainable technology for treating refractory organic compounds present in industrial wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 10, p. 25477-25505, 2023.

MARSOLLA, Lorena Dornelas et al. Sustainable enhancement of biochar and biochar composite properties through temperature-controlled pyrolysis of agricultural biomass and marble waste. **Waste Management**, v. 201, p. 114799, 2025.

OLADIMEJI, T. E. et al. Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. **Heliyon**, v. 10, n. 23, 2024.

RAJI, Zarifeh et al. Adsorption of heavy metals: mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation—a review. In: **Waste**. MDPI, 2023. p. 775-805.

RANINGA, Milan et al. Modification of activated carbon-based adsorbent for removal of industrial dyes and heavy metals: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 77, p. 286-294, 2023.

ROCHA, Camila Santos et al. Análise do desempenho competitivo do mercado brasileiro de cacau e derivados. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 23, n. 1, jan./dez., 2026.

ŠABIĆ RUNJAVEC, Monika; VUKOVIĆ DOMANOVAC, Marija; MEŠTROVIĆ, Ernest. Removal of organic pollutants from real pharmaceutical industrial wastewater with environmentally friendly processes. **Chemical Papers**, v. 76, n. 3, p. 1423-1431, 2022.

SATHYA, K. et al. A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. **Applied Water Science**, v. 12, n. 4, p. 70, 2022.

SIMÓN, Daiana et al. Agro-industrial waste as potential heavy metal adsorbents and subsequent safe disposal of spent adsorbents. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3298, 2022.

VEGA, Michael Ariel et al. Synthesis and application of ZIF-08 supported on *Theobroma cacao* L. biochar for the adsorption of loratadine in aqueous media. In**: INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON SYNTHETIC ORGANIC CHEMISTRY**, 28., 2024. *Proceedings...* 15–30 nov. 2024.

ROMERO-BONILLA, H. et al. Cocoa shell biochars for sustainable biodiesel production in Ecuador Biocarbón de cáscara de cacao para la producción sostenible de biodiesel en Ecuador. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**. Vol. 24, No. 1. 2025.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à FAPES, ao CNPq e à Chocosol (Ilhéus) pela doação dos resíduos de cacau.