

## VALORIZAÇÃO DA CASCA DO FRUTO DA SACHA-INCHI EM CARVÃO ATIVADO PARA REMOÇÃO DE CORANTE AZO ANIÔNICO

*VALORIZAÇÃO DA CASCA DO FRUTO DA SACHA-INCHI EM CARVÃO ATIVADO PARA REMOÇÃO DE CORANTE AZO ANIÔNICO*

*VALORIZACIÓN DE LA CÁSCARA DEL FRUTO DE SACHA-INCHI EN CARBÓN ACTIVADO PARA LA ELIMINACIÓN DE COLORANTE AZOICO ANIÓNICO*

---

**Mayra Paula de Souza e Sousa**

Mestranda em Engenharia Química. Universidade de São Paulo (USP). E-mail: mayrasousa123@hotmail.com | Orcid.org/ 0009-0005-7621-1212

**Cristiane Daliassi Ramos de Souza**

Professora do Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). E-mail: cdaliassi@ufam.edu.br | Orcid.org/0000-0003-3857-9719

**Yanne Katiussy Pereira Gurgel**

Professora do Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). E-mail: yanne@ufam.edu.br | Orcid.org/0000-0002-8547-0241

**Debora Aline Soares Maia**

Técnica do Laboratório de Pesquisas em Adsorção e Captura de CO<sub>2</sub>. Universidade Federal do Ceará (UFC). E-mail: deboram@ufc.br | Orcid.org/0000-0002-9009-9299

**ABSTRACT:**

Adsorption has emerged as an effective process for synthetic dyes removal from industrial effluents, and the use of sustainable precursors has been investigated for obtaining activated carbon. The objective of this study was evaluate the potential of activated carbon produced from sacha-inchi fruit shell (CSI) as an adsorbent for the removal of anionic methyl orange (ALM). CSI was synthesized by chemical activation with  $H_3PO_4$  and carbonization of sacha-inchi biomass at 500 °C for 1 hour. The materials were characterized in terms of chemical and textural properties. Batch kinetic tests were performed, and experimental data were fitted to pseudo-first order and pseudo-second order models. The adsorption equilibrium characteristics were determined by Langmuir, Freundlich and Temkin isotherms. The results showed the production of high-quality activated carbon with a high specific surface area ( $1255\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ ), with ALM removal of 96.5% and adsorption kinetics described by pseudo-second-order model. The Langmuir isotherm provided the best fit, revealing that adsorption occurs in monolayer, with a maximum capacity of  $250\text{ mg g}^{-1}$ . The valorization of sacha-inchi residues into activated carbon favors greater environmental sustainability and has led to development of an effective adsorbent for ALM removal.

**KEYWORDS:** *Plukenetia Volubilis*; Activated carbon; Methyl orange dye; Adsorption.

**RESUMO:**

A adsorção tem se destacado como um processo eficaz na remoção corantes sintéticos nos efluentes industriais, e a utilização de precursores sustentáveis, tem sido investigada na obtenção de carvão ativado. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do carvão ativado produzido da casca do fruto da sacha-inchi (CSI) como adsorvente na remoção do corante aniónico alaranjado de metila (ALM). O CSI foi sintetizado por ativação química com  $H_3PO_4$  e carbonização da biomassa da sacha-inchi a 500 °C por 1 hora. Os materiais foram caracterizados quanto às propriedades químicas e texturais. Ensaios cinéticos foram realizados em batelada e os dados experimentais ajustados aos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. As características do equilíbrio de adsorção foram determinadas pelas isotermas de Langmuir, Freundlich e Temkin. Os resultados mostraram a produção de um carvão ativado de alta qualidade com área superficial específica elevada ( $1255\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ ), com remoção do ALM de 96,5% e uma cinética de adsorção melhor descrita pelo modelo de pseudo-segunda ordem. A isoterma de Langmuir apresentou o melhor ajuste, revelando uma adsorção em monocamada, com capacidade máxima de  $250\text{ mg g}^{-1}$ . A valorização dos resíduos da sacha-inchi em carvão ativado favorece para uma maior sustentabilidade ambiental e permitiu obter um adsorvente eficaz para a remoção do ALM.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Plukenetia volubilis*; Carvão ativado; Corante alaranjado de metila; Adsorção.

**RESUMEN:**

*La adsorción se ha convertido en un proceso eficaz para la eliminación de colorantes sintéticos de los efluentes industriales, y se ha investigado el uso de precursores sostenibles para la*

obtención de carbón activado. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial del carbón activado producido a partir de corteza de sacha-inchi (CSI) como adsorbente en la eliminación del naranja de metilo aniónico (ALM). El CSI se sintetizó mediante activación química con  $H_3PO_4$  y carbonización de biomasa de sacha-inchi a 500 °C durante 1 hora. Los materiales se caracterizaron en términos de propiedades químicas y texturales. Se realizaron pruebas cinéticas en modo discontinuo, y los datos experimentales se ajustaron a modelos de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden. Las características de equilibrio de adsorción se determinaron mediante las isotermas de Langmuir, Freundlich y Temkin. Los resultados mostraron la producción de carbón activado de alta calidad con una elevada superficie específica ( $1255\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ ), con una eliminación de ALM del 96,5 % y una cinética de adsorción que se describió mejor mediante el modelo de pseudo-segundo orden. La isoterma de Langmuir proporcionó el mejor ajuste, revelando que la adsorción ocurre en monocapa, con una capacidad máxima de 250 mg g<sup>-1</sup>. La valorización de residuos de sacha-inchi en carbón activado favorece una mayor sostenibilidad ambiental y ha llevado al desarrollo de un adsorbente eficaz para la remoción de ALM.

**PALABRAS CLAVE:** *Plukenetia volubilis*; Carbón activado; Colorante naranja de metilo; Adsorción.

## INTRODUÇÃO

A contaminação dos recursos hídricos por compostos orgânicos industriais, principalmente os corantes da classe azo, tem sido comumente reportada, gerando bastante preocupação. Estes poluentes, dependendo da concentração e tempo de exposição, apresentam potencial tóxico e carcinogênico, além reduzirem a oxigenação da água e a passagem de luz solar afetando todo o processo de fotossíntese (Sakr *et al.*, 2020; Arpia *et al.*, 2021).

O alaranjado de metila é um corante de natureza aniónica, de coloração castanho alaranjado, possui ligações do tipo azo (-N=N-) unidas à estrutura aromática, sendo muito utilizado nas indústrias têxtil. Devido à presença do grupo azo apresenta alta estabilidade e baixa degradação, o que implica em uma maior dificuldade na sua remoção (Zayed *et al.*, 2018; AL-Kazragi *et al.*, 2023).

Diversos métodos são utilizados para a remoção de corantes no meio aquático (precipitação química, floculação, ozonização) entretanto, apresentam altos custos operacionais e baixa capacidade de remoção, além de gerar resíduos que causam poluição secundária (Uddin *et al.*, 2017; Crini & Lichfouse, 2019). A adsorção tem se destacado como uma técnica versátil e simples, porém o uso de carvão ativado, muito empregado em virtude da sua alta área superficial específica e porosidade, tem limitado o processo devido ao seu custo elevado (Schettino Jr *et al.*, 2007).

Diante disso, diversos estudos têm mostrado que a adsorção utilizando adsorventes obtidos de resíduos agrícolas é um método efetivo no tratamento de efluentes têxteis (Suhas *et al.*, 2022; Qu *et al.*, 2020; Gupta *et al.*, 2009). Atualmente, existe uma grande variedade de materiais que são utilizados no processo de remoção de corantes, porém, a escolha do adsorvente com características como, baixo valor econômico, fácil disponibilidade, elevadas taxa de adsorção, seletividade e eficiência tem sido bastante pesquisadas. O emprego de resíduos agrícolas na produção de carvão ativado também proporciona uma redução nos problemas de gestão, sendo considerados como renováveis, não tóxicos e sustentáveis (Kosheleva *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2023).

A produção de carvão ativado compreende duas etapas: a carbonização do material precursor e a ativação do material carbonizado. Na etapa de carbonização o material precursor é submetido ao tratamento térmico sob atmosfera inerte à temperatura superior a 450 °C, para que ocorra a remoção de componentes voláteis e gases leves (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>). Já a etapa de ativação é realizada por processos físicos, químicos ou a combinação dos dois métodos, tendo como função a retirada de componentes que possam obstruir os poros (alcatrão e naftas, além de outros resíduos orgânicos). A ativação física é realizada em altas temperaturas (800 a 1100 °C), sob fluxo de gases oxidantes como vapor d'água ou dióxido de carbono. A ativação química consiste na impregnação do material com agentes desidratantes, como cloreto de zinco, ácido fosfórico, hidróxido de sódio sendo posteriormente carbonizados em atmosfera inerte, com temperaturas entre 400 e 900 °C (Aygün *et al.*, 2003; Bag, Tekin, Karagoz, 2020).

Na busca por novas fontes alternativas destaca-se a sacha-inchi (*Plukenetia volubilis* L.), uma planta semi-perene, trepadeira lenhosa, da família *Euphorbiaceae*, que cresce na floresta amazônica. Esta planta apresenta um fruto de formato capsular estrelado, com lóbulos contendo amêndoas oleaginosa com grande teor de óleo. A composição do fruto é de aproximadamente 35% de casca e 65% de amêndoas (Rodrigues *et al.*, 2014). A sacha-inchi possui um grande potencial de aplicação na indústria devido a riqueza de seus óleos (Wang *et al.*, 2018), porém existem poucos estudos quanto ao aproveitamento dos seus resíduos (Kumar *et al.*, 2017; Soongprasit *et al.*, 2020).

Nesse contexto, esta pesquisa buscou produzir um carvão ativado da casca da sacha-inchi para avaliar seu potencial de adsorção na remoção de corante azo em solução aquosa, utilizando o alaranjado de metila (espécie aniónica).

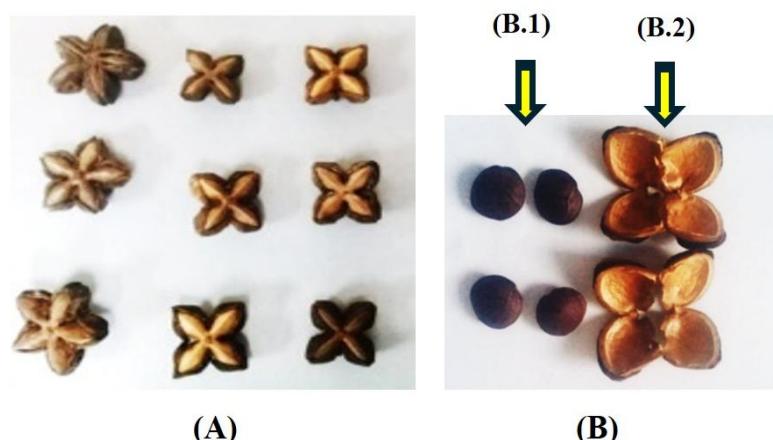
## METODOLOGIA

### Produção do carvão ativado (adsorvente)

Os frutos da sacha-inchi (*Plukenetia volubilis* L.) foram fornecidos pela Embrapa Amazônia Ocidental, empresa localizada na Rodovia AM 010, km 29, Manaus-Itacoatiara. A separação casca/amêndoas (Figura 1) foi realizada na Embrapa e os resíduos (Figura 1-B.2) enviados para o Laboratório de Processos do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

No laboratório do DEQ/UFAM as cascas dos frutos foram submetidas a lavagem com água e secagem em estufa a 80 °C por 24 h. As cascas secas foram trituradas em moinhos, de facas (Marconi MA680I) e de bolas (Spex SamplePrep 8000D), para redução do tamanho das partículas. Assim, realizou-se a classificação granulométrica em um agitador vibratório de peneiras (SPLabor 1100) e o material particulado em pó retido na peneira de 400 mesh (0,038 mm) foi selecionado para o estudo.

Figura 1 – (A) Frutos da sacha-inchi. (B.1) amêndoas e (B.2) cascas.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A etapa seguinte foi a ativação química utilizando ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ; 85%; Nuclear), na proporção mássica 1:2 (biomassa:ativante), por 3 h sob agitação (155 rpm), a 25 °C, em uma incubadora shaker (Newlab NL34302), com posterior secagem (105 °C/24 h). O material impregnado com  $H_3PO_4$  foi carbonizado na mufla (Fanem 413) a 500 °C por 60 min (Wang *et al.*, 2013). O carvão ativado produzido foi submetido a lavagens com água destilada até pH neutro, para remoção de resíduos do ativante e desobstrução dos poros formados, seguido de secagem por 24 h (Dawood & Sen, 2012).

## Caracterização

O carvão ativado produzido (CSI) e a biomassa precursora (SI) foram caracterizados quanto as propriedades químicas e texturais. Para verificar o comportamento térmico foi realizada a análise termogravimétrica (TG/DTG), no equipamento TA Instrument SDTQ600, com massa de 10 mg, intervalo de 20 a 1000 °C e razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, em atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>). Foram determinados também **umidade**, norma NBR 14929 (ABNT, 2003) e **análise imediata** (materiais voláteis, carbono fixo, cinzas) em base seca, norma ABNT NBR 8112 (1986). O **poder calorífico superior** (PCS) e a **composição elementar** foram estimadas por correlações, Parikh *et al.* (2005) e Shen *et al.* (2010), respectivamente, utilizando os dados experimentais da análise imediata (Equações 1-4).

$$PCS = 0,3536 \cdot CF + 0,1559 \cdot MV - 0,0078 \cdot CZ \quad (1)$$

$$C = 0,635 \cdot CF + 0,460 \cdot MV - 0,095 \cdot CZ \quad (2)$$

$$H = 0,059 \cdot CF + 0,060 \cdot MV + 0,010 \cdot CZ \quad (3)$$

$$O = 0,340 \cdot CF + 0,469 \cdot MV - 0,023 \cdot CZ \quad (4)$$

onde, CZ, MV e CF são os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, respectivamente.

As **isotermas de adsorção/dessorção** de N<sub>2</sub> à 77 K foram medidas no Autosorb-iQ3 (Quantachrome Instruments, EUA), sendo realizada desgasificação a 423 K sob vácuo por 6 h, com aquecimento a 2 K min<sup>-1</sup>. Foram calculados a área superficial específica (S<sub>BET</sub>) pela equação BET (Brunauer-Emmett-Teller), o volume dos poros (V<sub>p</sub>) pela regra de Gurvich a P/P<sub>0</sub> ≈ 0,95 e o volume dos microporos (V<sub>mic</sub>) pela equação de Dubinin-Radushkevich (DR). Por fim, a distribuição do tamanho dos poros (*Pore Size Distribution - PSD*) foi determinada pelo método NLDFT (*Non-Local Density Functional Theory*) para poros cilíndricos (Thommes *et al.*, 2015).

### Preparo da solução do corante (adsorvato)

O corante alaranjado de metila (Vetec, CAS) foi utilizado como adsorvato nos estudos de cinética e equilíbrio de adsorção. Preparou-se uma solução “estoque” do corante, em água destilada, com concentração de 1000 mg L<sup>-1</sup>, e a partir desta foram preparadas soluções diluídas para a curva de calibração e demais ensaios. As concentrações do alaranjado de metila (ALM), nos ensaios foram determinadas por espectroscopia UV-Visível (Coleman 35D), no comprimento de onda máximo (λ<sub>máx</sub>), de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do corante alaranjado de metila.

Corante	Alaranjado de Metila
Fórmula Molecular	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
Estrutura Molecular (Sá <i>et al.</i> , 2020)	
Peso Molecular (g mol <sup>-1</sup> )	327,33
Classe química	Azo
$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)	465

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

### Cinética de adsorção

O estudo do potencial cinético de adsorção do corante ALM pelo CSI foi avaliado variando-se o tempo de contato de cada solução do corante com o adsorvente. Os ensaios foram realizados em batelada, triplicata, de modo a investigar como o fator do tempo influencia no processo. Em erlenmeyers de 250 mL foram adicionados 50 mL da solução do ALM, na concentração inicial de 10 mg L<sup>-1</sup>, e 25 mg do CSI. O sistema permaneceu sob agitação (200 rpm), a 25 °C, pH da solução (~6,35), em diferentes tempos, variando de 0 a 60 min.

Após cada tempo, as amostras foram centrifugadas (5 min; 3000 rpm) e alíquotas do sobrenadante analisadas por espectroscopia UV-Visível ( $\lambda_{\text{máx}} = 465$  nm). As capacidades de adsorção, em cada tempo ( $q_t$ ) e no equilíbrio ( $q_e$ ), do CSI foram calculadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente, já para o percentual de remoção do corante (%R) foi utilizada a Equação 7 (Obaid *et al.*, 2019).

$$q_t = \frac{(C_o - C_t)}{m} \cdot V \quad (5)$$

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)}{m} \cdot V \quad (6)$$

$$R(\%) = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \cdot 100 \quad (7)$$

sendo  $C_o$ ,  $C_t$  e  $C_e$  as concentrações inicial, no tempo  $t$  (min) e no equilíbrio do corante (mg L<sup>-1</sup>), respectivamente;  $V$  o volume da solução do corante (L) e  $m$  a massa do adsorvente (g). Os ensaios foram realizados em triplicatas. Para avaliar o mecanismo que controla a cinética de adsorção, os resultados experimentais foram ajustados aos modelos lineares pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-segunda ordem (PSO), conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos cinéticos de adsorção (Kord Mostafapour *et al.*, 2022).

Modelos	Equação	Forma linear	Gráfico
PPO	$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t})$	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$	$\ln(q_e - q_t) \text{ vs } t$
PSO	$q_t = \frac{q_e^2 K_2 t}{1 + K_2 t}$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t ; h = K_2 q_e^2$	$\frac{t}{q_t} \text{ vs } t$

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

### Equilíbrio de adsorção

Os ensaios para determinação das isotermas foram realizados através do contato de 25 mg do adsorvente (CSI) com soluções do adsorvato (ALM) em diferentes concentrações iniciais (40-200 mg L<sup>-1</sup>), em incubadora shaker com agitação (200 rpm) e temperatura (25 °C) controladas, pH da solução (~6,35), por 2 h. Por fim, as soluções foram centrifugadas (5 min; 3000 rpm) e analisadas no equipamento UV-Visível a 465 nm. Para descrever como a interação entre o adsorvato e o adsorvente é importante na otimização do processo foram aplicados os modelos isotérmicos lineares de Langmuir, Freundlich e Temkin (Tabela 3).

Tabela 3 – Isoterma de adsorção (Kord Mostafapour *et al.*, 2022).

Isoterma	Equação	Forma linear	Parâmetros	Gráfico
Langmuir	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}$	$q_m; K_L; R_L^*$	$\frac{C_e}{q_e} \text{ vs } C_e$
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$	$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e$	$K_F; n$	$\ln q_e \text{ vs } \ln C_e$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln K_T C_e$	$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln K_T + \frac{RT}{b_T} \ln C_e$	$K_T; b_T$	$q_e \text{ vs } \ln C_e$

$$* R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i}$$

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

### Análise estatística

O ajuste dos dados experimentais aos modelos cinéticos e de equilíbrio foram realizados no software OriginPro 2024 (versão 8.5 - OriginLab) por análise de regressão linear. Para a avaliação estatística utilizaram-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a raiz do erro quadrado médio (RMSE), representadas pelas Equações 8 e 9 respectivamente (Ghaffari *et al.*, 2017).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_i^n (q_{i,exp} - \bar{q}_{i,exp})^2 - (q_{i,exp} - \bar{q}_{i,pred})^2}{\sum_i^n (q_{i,exp} - \bar{q}_{i,exp})^2} \right] \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_i^n \frac{(q_{i,exp} - q_{i,pred})^2}{N}} \quad (9)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização das cascas dos frutos da sacha-inchi (SI) e do carvão ativado (CSI)

As caracterizações físico-químicas dos materiais foram realizadas com o objetivo de melhor entender cada material e suas composições químicas, os resultados são apresentados na Tabela 4 (média dos ensaios em triplicatas). Observa-se que SI é composta de alto teor de materiais voláteis e baixo teor de cinzas, corroborando com os valores da literatura (Soongprasit *et al.* 2020; Lakkhana *et al.*, 2017).

Tabela 4 – Caracterizações físico-químicas das cascas da sacha-inchi (SI) e do carvão ativado (CSI).

	SI	SI <sup>a</sup>	SI <sup>b</sup>	CSI
Umidade (%)	8,26	5,63	4,69	5,91
Análise Imediata (em base seca)				
Materiais Voláteis (%)	79,19	71,63	68,93	11,53
Cinzas (%)	4,08	8,16	11,70	5,76
Carbono Fixo* (%)	16,73	14,58	13,78	82,71
Composição Elementar				
C (%)	46,66	41,08	41,24	58,27
H (%)	5,78	5,40	6,78	5,63
O (%)	42,74	51,57	50,47	33,40
N* (%)	4,82	1,62	1,51	2,70
Poder Calorífico Superior				
PCS (MJ/kg)	18,22	18,55	18,55	31,0

<sup>a</sup> Soongprasit *et al.* (2020).

<sup>b</sup> Lakkhana *et al.* (2017).

\*Por diferença

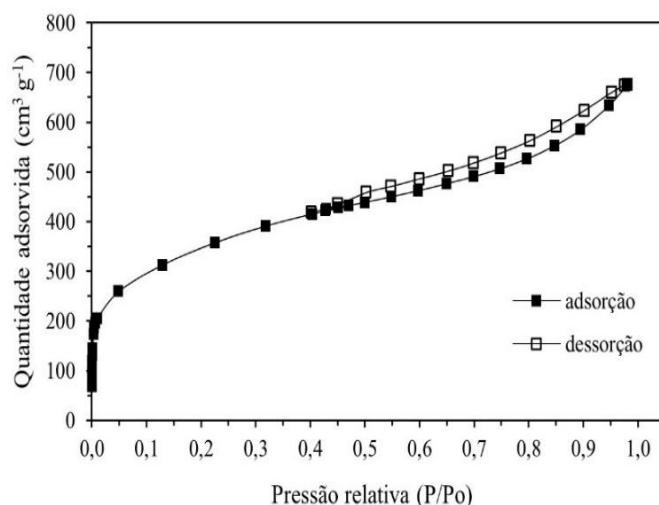
Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A produção do carvão ativado com ácido fosfórico 85% ( $H_3PO_4$ ) favoreceu o aumento do teor de carbono fixo e elementar e a redução dos compostos voláteis. Esse aumento de carbono ocorre durante a carbonização quando os elementos não carbonosos são eliminados por decomposição térmica, enquanto os voláteis são reduzidos e transformados em carbono. As cinzas são indesejáveis no carvão ativado, pois reduz a resistência mecânica e afeta a capacidade de adsorção. O CSI apresentou baixo teor de cinzas, em torno de 5% (Lakkhana *et al.*, 2017).

O poder calorífico superior (PCS), calculado pelas correlações, para SI (18,22 MJ/kg) mostrou-se similar aos valores da literatura (Soongprasit *et al.*, 2020; Lakkhana *et al.*, 2017), o que demonstra a precisão das equações utilizadas. Para o CSI o valor foi bem superior (31 MJ/kg) demonstrando a alta capacidade energética do material.

A Figura 2 apresenta a isoterma de adsorção/dessorção de  $N_2$  a 77 K e, de acordo com a classificação da IUPAC (Thommes *et al.*, 2015), observa-se um perfil híbrido das isotermas tipo I (na faixa de baixas pressões relativas) e do tipo IV (na faixa de pressões moderadas e altas).

Figura 2 – Isoterma de adsorção/dessorção de  $N_2$  a 77K do CSI.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A isoterma I está associada a materiais que têm distribuição de tamanho de poro em uma ampla faixa, incluindo microporos mais largos e mesoporos estreitos. A isoterma IV é típica de adsorventes mesoporosos, com condensação capilar acompanhada de histerese. O tipo de histerese, por sua vez, é semelhante a H4, corresponde à pressão parcial  $P/P_0$  de 0,4 a 0,98, o que sugere a ocorrência de mesoporos no material (Thommes *et al.*, 2015). As características texturais são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades texturais do CSI.

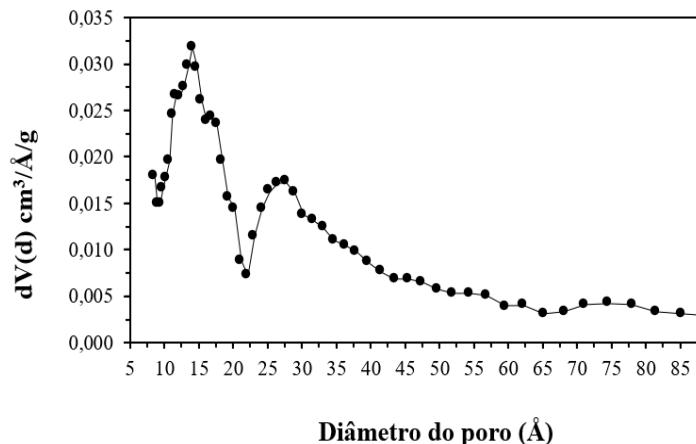
$S_{BET}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$V_p$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{mic} N_2$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{meso}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )*
1255	1,04	0,42	0,62

\* Volume dos mesoporos ( $V_{meso}$ ) =  $V_p - V_{mic}$

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A distribuição do tamanho dos poros (PSD), obtida pelo método NLDFT para a isoterma de  $N_2$  a 77 K, é apresentada na Figura 3. O valor elevado da área superficial ( $S_{BET} = 1255 m^2 g^{-1}$ ) e do volume total dos poros ( $V_p = 1,04 cm^3 g^{-1}$ ) do adsorvente CSI refletem a eficiência do método de carbonização e da ativação com  $H_3PO_4$ , o que foi fundamental para o desenvolvimento dos poros. A isoterma está de acordo com a PSD que apresenta poros com diâmetro de 14 Å, que correspondem a estruturas microporosas (0-20 Å) e poros com diâmetro de 27 Å, indicando presença de pequenos mesoporos (20-500 Å) (Thommes *et al.*, 2015). Características estruturais semelhantes foram encontradas nos estudos de Moulefera *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2013) que também utilizaram  $H_3PO_4$  como agente ativador.

Figura 3 – Distribuição de tamanho de poro do CSI obtida a partir do método NLDFT.

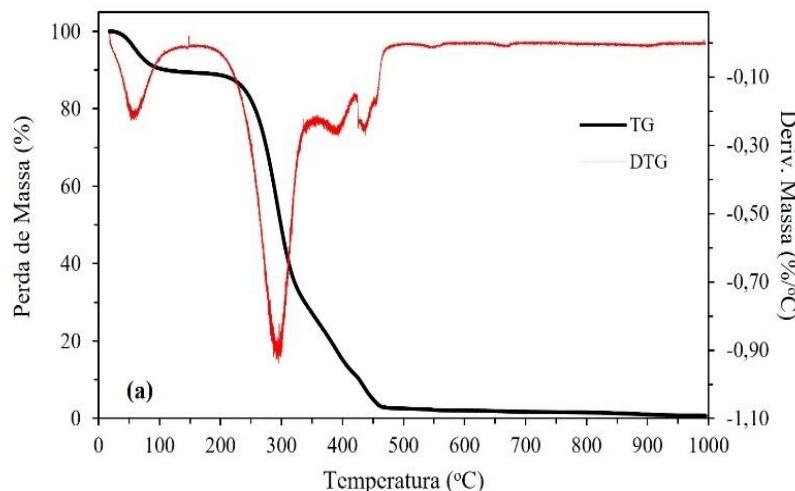


Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A Figura 4 apresenta as curvas TG/DTG da SI em atmosfera de  $N_2$ . O processo de decomposição térmica foi separado em três etapas: secagem, pirólise ou carbonização. A primeira etapa, caracterizada na curva DTG por um pico em torno de 52 °C, está relacionada à secagem e ocorre da temperatura ambiente até 110 °C. O teor de umidade por meio da análise TG foi de 9,7%, menor do que o valor encontrado por Rueda-Ordonez *et al.* (2021). Além disso, na faixa de temperatura entre 100 °C e 200 °C, os extrativos foram volatilizados e apresentaram uma variação de massa inferior a 3% (2,43%). A segunda etapa corresponde à variação de massa entre

200 °C e 350 °C, associada a decomposição térmica ou pirólise, sendo completamente volatilizada a holocelulose (hemicelulose e celulose) e apenas uma parte da lignina. A curva TG indica perda de massa de 61,4% e a DTG é caracterizada por um pico a 300 °C.

Figura 4 – TG/DTG para SI.

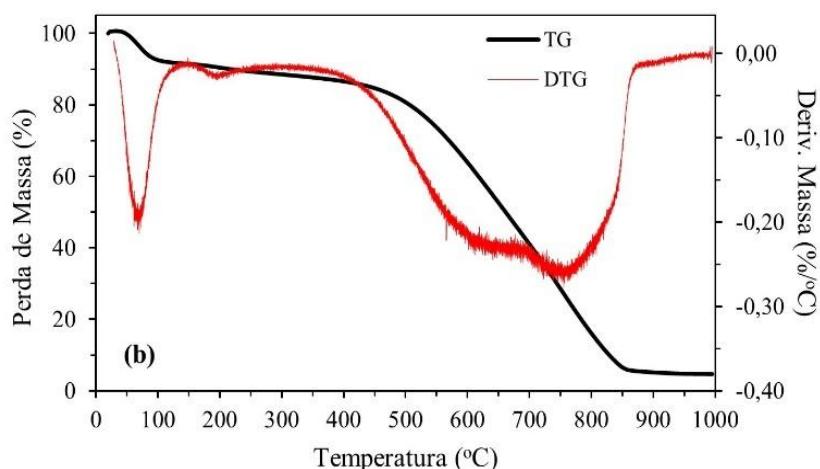


Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A terceira etapa corresponde a combustão, ocorre entre 350 °C e 500 °C, e corresponde a decomposição da lignina, com perda de massa de 24,6%, sendo caracterizada na DTG por dois picos em 392 °C e 442 °C. A massa final remanescente, acima de 500°C, representa o teor de cinzas com 1,87%. Soongprasit *et al.* (2020) e Rueda-Ordonez *et al.* (2021) utilizaram a mesma espécie (sacha-inchi), porém encontraram valores elevados de cinzas e uma menor estabilidade térmica.

A Figura 5 mostra que o carvão ativado utilizando H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> apresenta duas etapas. A primeira referente à secagem, na faixa da temperatura ambiente até 120 °C. Pela TG observa-se uma umidade de 8,1% e pela DTG a presença do pico em 72 °C. A decomposição dos materiais carbonáceos ocorre entre 230 °C até 870 °C, com perda de massa de 83,6% e a DTG mostra a presença de dois picos sequenciais em 648 °C e 761 °C. O teor de cinzas para o CSI foi de 5,5%. Não foi encontrado na literatura carvão ativado das cascas da sacha-inchi, porém este adsorvente apresentou estabilidade térmica superior a diversos carvões obtidos de biomassa com mesmo ativante (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), como casca do coco (Montfort *et al.*, 2025) e casca de arroz (Li *et al.*, 2015).

Figura 5 – TG/DTG para o CSI.

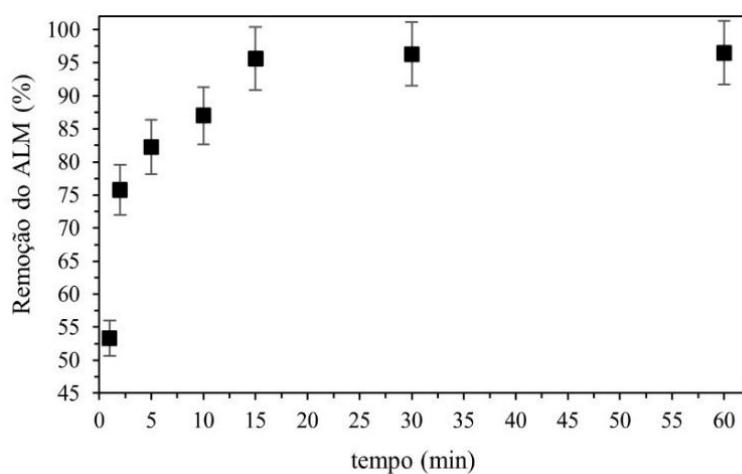


Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

#### Efeito do tempo de contato no processo de adsorção

O estudo da cinética de adsorção refere-se a identificação do tempo necessário para se atingir o equilíbrio químico do sistema adsorvente/adsorvato, verificando a influência do tempo de contato na velocidade de remoção do corante (adsorvato) pelo adsorvente (Zhang *et al.*, 2021). A Figura 6 apresenta o efeito do tempo de contato na adsorção do ALM (adsorvato) pelo CSI (adsorvente).

Figura 6 – Percentual de remoção do corante ALM pelo carvão ativado produzido das cascas dos frutos da sacha-inchi (CSI) em função do tempo de contato.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

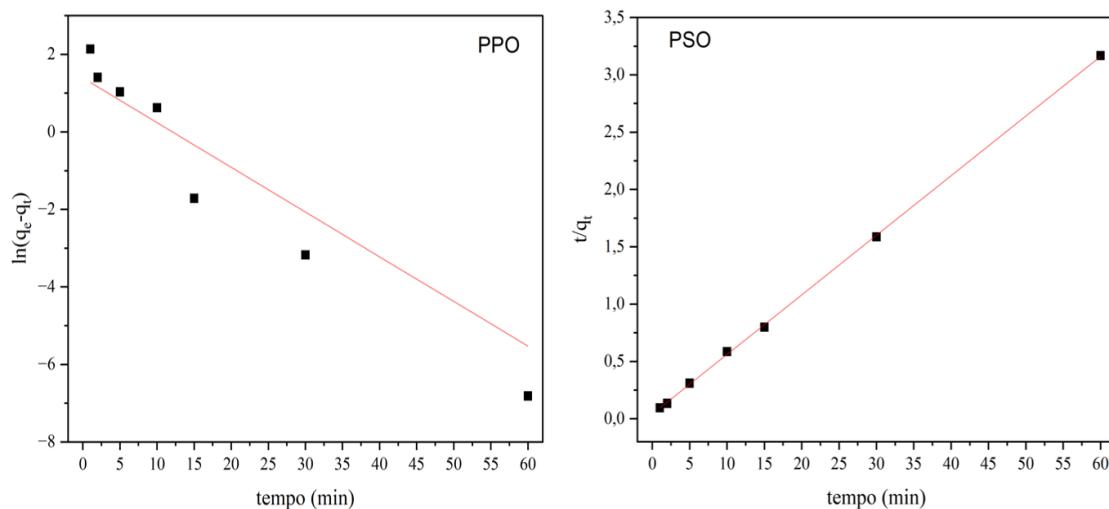
A maior remoção do ALM ocorreu durante o estágio inicial do processo (nos primeiros 5 min), em função da disponibilidade dos sítios ativos livres do adsorvente, porém, à medida que são ocupados, a velocidade do processo diminui, provavelmente causada por forças repulsivas entre as moléculas do adsorvato e pela saturação dos sítios disponíveis para adsorção (Temesgen *et al.*, 2018).

A partir de 15 min observa-se uma tendência ao equilíbrio com a curva na forma de um platô, quando ocorre a saturação do material adsorvente, ou seja, provavelmente existe um número reduzido de sítios ativos livres na superfície do CSI, devido a ocupação das moléculas do adsorvato (Akbar *et al.*, 2020). O equilíbrio foi atingido com 30 min, atingindo uma remoção de 96,3%, e ocorreu a estabilização a 60 min (96,5%).

### Modelagem cinética

Os dados obtidos nos estudos cinéticos foram ajustados utilizando os modelos pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-segunda ordem (PSO), conforme mostra a Figura 7 e os parâmetros são apresentados na Tabela 6.

Figura 7 – Modelos cinéticos Pseudo-Primeira Ordem (PPO) e Pseudo-Segunda Ordem (PSO).



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Os modelos cinéticos foram avaliados com base no coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Assim, é possível perceber que o modelo cinético de pseudo-segunda ordem melhor se ajustou para o processo adsorvente do ALM ( $R^2 = 0,9998$ ; RMSE = 0,0173). Os respectivos ajustes também se confirmam pela proximidade obtida entre o valor de  $q_e$  experimental e  $q_e$  calculado, sugerindo que a etapa limitante do processo seja quimissorção (monocamada) (Wang *et al.*, 2023).

Tabela 6 – Parâmetros cinéticos dos modelos PPO e PSO para a adsorção do ALM ( $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) pelo CSI a  $25^\circ\text{C}$ .

$q_e$ exp ( $\text{mg g}^{-1}$ )	PPO				PSO			
	$q_e$ calc ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE	$q_e$ calc ( $\text{mg g}^{-1}$ )	$k_2$ ( $\text{mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ )	$R^2$	RMSE
18,95	24,65	0,2655	0,8811	0,9833	19,23	0,0669	0,9998	0,0173

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

### Isotermas de adsorção

As isotermas representam uma relação de equilíbrio entre a concentração do corante na fase líquida e a quantidade de corante presente no adsorvente, fornecendo uma estimativa da capacidade máxima de adsorção, assim como outros parâmetros. Os resultados experimentais foram ajustados pelos modelos de isotermia de Langmuir, Freundlich e Temkin (Figura 8) e a Tabela 7 apresenta os respectivos parâmetros.

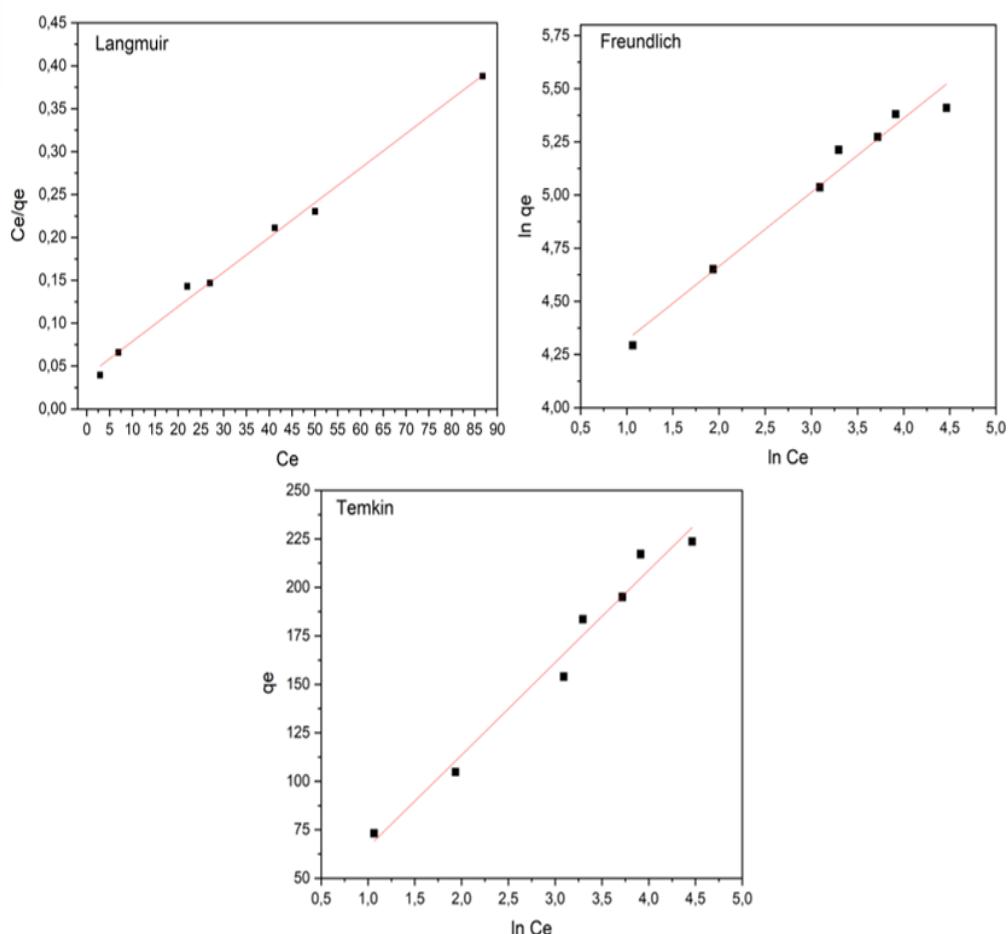
Tabela 7 – Parâmetros dos modelos lineares de Langmuir, Freundlich e Temkin, para a adsorção do ALM (40 a  $200 \text{ mg L}^{-1}$ ) no adsorvente CSI a  $25^\circ\text{C}$ .

Modelos	Parâmetros	$R^2$	RMSE
Langmuir	$q_{\max}$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	250,0	
	$k_L$ ( $\text{L mg}^{-1}$ )	9,6250	0,9939
	$R_L$	0,0005-	
Freundlich		0,0026	
	$K_F$ ( $\text{L mg}^{-1}$ )	53,01	0,9743
Temkin	$1/n$	0,3475	
	$K_T$ [ $(\text{mg g}^{-1})(\text{L mg}^{-1})^{1/n}$ ]	1,4702	0,9764
	$b_T$ ( $\text{J mol}^{-1}$ )	47,62	9,6137

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Os três modelos aplicados correspondem bem aos dados da adsorção, porém Langmuir obteve o melhor ajuste ( $R^2 = 0,9939$ ) com o menor erro (RMSE = 0,0099). Isso significa que a adsorção do ALM pelo CSI ocorre relativamente de forma uniforme e em monocamada (Feng *et al.*, 2020).

Figura 8 – Ajustes lineares dos modelos das isotermas de adsorção de Langmuir, Freundlich e Temkin.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

O parâmetro  $R_L$  descreve uma tendência do processo, ou seja, a adsorção é favorável quando  $0 < R_L < 1$ , irreversível quando  $R_L$  é igual a 0, linear quando  $R_L$  é igual a 1 e desfavorável quando  $R_L > 1$  (Thommes *et al.*, 2015). Conforme dados da Tabela 7, o valor calculado de  $R_L$  ficou entre 0,0026 e 0,0005 para a faixa de concentração do corante (40-200 mg L<sup>-1</sup>). Portanto, o valor de  $R_L$  foi favorável para adsorção em monocamada do adsorvato ALM pelo CSI.

O resultado sugere que a adsorção do corante ALM no CSI ocorreu de forma homogênea, com formação de monocamada sobre a superfície do adsorvente, esse comportamento é típico de superfícies com sítios de adsorção energeticamente equivalentes. Ramutshatsha-Makhwedzha *et al.* (2022) investigou a remoção do ALM utilizando carvão ativado de resíduos obtendo uma capacidade máxima de adsorção de 33 mg·g<sup>-1</sup> nas condições avaliadas.

Comparando com os resultados deste trabalho, observa-se que a capacidade adsorptiva do CSI foi bem superior, o que evidencia o potencial do material. Estes dados indicam que o

adsorvente CSI apresenta desempenho competitivo, similar e superior aos valores reportados na literatura para o corante aniónico ALM (Zayed *et al.*, 2018; Sá *et al.*, 2020; Ramutshatsha-Makhwedzha *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023; Al-Kazragi *et al.*, 2023).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cascas dos frutos da sacha-inchi foram utilizadas com sucesso na síntese do carvão ativado, com ácido fosfórico a 500 °C, para a adsorção do corante reativo da classe azo, ALM, presente em corpos hídricos. A caracterização do CSI mostrou elevada área superficial específica,  $1255\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ , com presença de microporos e mesoporos, assim como um alto teor de carbono fixo (82,71%) e baixo teor de cinzas ( $\leq 5,79\%$ ), além de excelente estabilidade térmica. Os resultados mostraram a adsorção do ALM levou apenas 30 minutos para atingir o equilíbrio apresentando remoção superior a 96%. Os ensaios cinéticos mostraram que os dados experimentais ajustaram-se ao modelo de pseudo-segunda ordem, indicando que o processo é controlado por quimissorção. A isoterma de Langmuir apresentou melhor representatividade com capacidade máxima adsorvida de  $250\text{ mg g}^{-1}$ . Portanto, a remoção de corante reativo ALM utilizando o adsorvente CSI ativado termicamente e quimicamente pode ser empregado com sucesso como alternativa de baixo custo e sustentável para o tratamento dos efluentes aquosos da indústria têxtil.

### *Agradecimentos*

À Embrapa Amazônia Ocidental pela biomassa utilizada neste estudo. Ao apoio financeiro recebido da FAPEAM e do CNPq através das bolsas de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AKBAR ALI, A. M.; KARTHIKEYAN, R. K.; SENTAMIL SELVAN, M.; RAI, M. K.; PRIYADHARSHINI, M.; MAHESWARI, N.; MITHILESH, R.; PADMANABAN, V. C. Removal of reactive orange 16 by adsorption onto activated carbon prepared from rice husk ash: statistical modelling and adsorption kinetics. *Sep. Sci. Technol.*, v. 55, n. 1, p. 26-34, 2018.

AL-KAZRAGI, M. A. U. R.; AL-HEETIMI, D. T. A.; WILSON, L. D. Adsorption of methyl orange on low-cost adsorbent natural materials and modified natural materials: a review. *Int. J. Phytoremediat.*, v. 26, n. 5, p. 639-668, 2023.

ARPIA, A. A.; CHEN, W. H.; LAM, S. S.; ROUSSET, P.; DE LUNA, M. D. G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. *Chem. Eng. J.*, v. 403, p. 126233, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929. **Madeira: Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8112. **Análise imediata.** Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 1986.

AYGÜN, A.; YENISOY-KARAKAS, S.; DUMAN, I. Production of granular activated carbon from fruit Stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. **Microporous and Mesoporous Mater.**, v. 66, p. 189-195, 2003.

BAG, O.; TEKIN, K.; KARAGOZ, S. Microporous activated carbons from lignocellulosic biomass by KOH activation. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v. 28, n. 12, p. 1030-1037, 2020.

CRINI, G.; LICHTFOUSE, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. **Environ. Chem. Lett.**, v. 17, p. 145-155, 2019.

GUPTA, V. K.; CARROTT, P. J. M.; RIBEIRO CARROTT, M. M. L.; SUHAS. Low-Cost Adsorbents: Growing Approach to Wastewater Treatment - a Review. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.**, v. 39, n. 10, p. 783-842, 2009.

DAWOOD, S.; SEN, T. K. Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: Equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design. **Water Res.**, v. 46, n. 6, p. 1933-1946, 2012.

FENG, P.; LI, J.; HUANG, H.; XU, Z. Biomass-Based Activated Carbon and Activators: Preparation of Activated Carbon from Corncob by Chemical Activation with Biomass Pyrolysis Liquids. **ACS Omega**, v. 5, p. 24064-24072, 2020.

GHAFFARI, H. R.; PASALARI, H.; TAJVAR, A.; DINDARLOO, K.; GOUDARZI1, B.; ALIPOUR, V.; GHANBARNEAJD, A. Linear and Nonlinear Two-Parameter Adsorption Isotherm Modeling: A Case-Study. **Int. J. Eng. Sci.**, v. 6, n. 9, p. 01-11, 2017.

HAN, Q.; WANG, J.; GOODMAN, B. A.; XIE, J.; LIU, Z. High adsorption of methylene blue by activated carbon prepared from phosphoric acid treated eucalyptus residue. **Powder Technol.**, v. 366, p. 239-248, 2020.

KORD MOSTAFAPOUR, F.; ZOLGHADR, R.; KHODADADI SALOOT, M.; MAHVI, A. H.; BALARAK, D.; SAFARI, E. Removal of Acid blue 113 from aqueous medium using a novel magnetic adsorbent derived from activated carbon fiber. **Int. J. Environ. Anal. Chem.**, v. 104, n. 17, p. 5732-5747, 2022.

KOSHELEVA, R. I.; MITROPOULOS, A. C.; KYZAS, G. Z. Synthesis of activated carbon from food waste. **Environ. Chem. Lett.**, v. 17, p. 429-438, 2019.

KUMAR, B.; SMITA, K.; CUMBAL, L.; DEBUT, A. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell biomass for synthesis of silver nanocatalyst. **J. Saudi Chem. Soc.**, v. 21, p. S293-S298, 2017.

LAKKHANA, C.; ATONG, D.; SRICHAROENCHAIKUL, V. Fuel Gas Generation from Gasification of Sacha Inchi Shell using a Drop Tube Reactor. **Energy Procedia**, v. 138, p. 870-876, 2017.

LI, Y.; ZHANG, X.; YANG, R.; LI, G.; HU, C. The role of  $H_3PO_4$  in the preparation of activated carbon from NaOH-treated rice husk residue. **RSC Adv.**, v. 5, p. 32626-32636, 2015.

MONTFORT, G. R. C.; AZAMAR-BARRIOS, J. A.; QUINTANA-OWEN, P.; REJÓN-MOO, V.; GONZÁLEZ-GÓMEZ, W. S.; MADERA-SANTANA, T. J. Production and Physicochemical Characterization of Activated Carbon from the Mesocarp of the Coconut (*Cocos nucifera L.*) Variety Alto del Pacifico. **Chemistry**, v. 7, n. 3, p. 88, 2025.

MOULEFERA, I.; GARCÍA-MATEOS, F.; BENYOUCEF, A.; ROSAS, J.; RODRÍGUEZ-MIRASOL, J.; CORDERO, T. Effect of Co-solution of Carbon Precursor and Activating Agent on the Textural Properties of Highly Porous Activated Carbon Obtained by Chemical Activation of Lignin With  $H_3PO_4$ . **Frontiers in Materials**, v. 7, p.153, 2020.

OBAID, A. A.; AL-MASRI, M.; DEGHLES, A.; TAHAN, N.; JODEH, S.; SMAIL, R. Functionalized C,N-Bipyrazole Receptor Grafted onto Silica Surface for Arsenic Adsorption and Its Antibacterial Activity. **Am. J. Anal. Chem.**, v. 10, p. 38-53, 2019.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, A. S.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

QU, W.; HE, D.; HUANG, H.; GUO, Y.; TANG, Y. Characterization of amino-crosslinked hypromellose and its adsorption characteristics for methyl orange from water. **J. Mater. Sci.**, v. 55, n. 17, p.7268-7282, 2020.

RAMUTSHATSHA-MAKHWEDZHA, D.; MAVHUNGU, A.; MOROPENG, M. L.; MBAYA, R. Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. **Helion**, v. 8, p. e09930, 2022.

RUEDA-ORDÓÑEZ, Y. J.; MARIÑO-BOHÓRQUEZ, M. A.; RUEDA-ORDÓÑEZ, D. A. Thermal upgrading of sacha inchi shell: Kinetics and combustion characteristics. **Bioresour. Technol. Rep.**, v. 15, p. 100807, 2021.

SÁ, M. L.; NOBRE, F. X.; MATOS, J. M. E.; SANTOS, M. R. M. C. Remoção do alaranjado de metila em meio aquoso por microcristais de  $h\text{-MoO}_3$  obtidos pelo método micro-ondas hidrotérmico. **Cerâmica**, v. 66, n. 378, p. 197-207, 2020.

SAKR, F.; ALAHIANE, S.; SENNAOUI, A.; DINNE, M.; BAKAS, I.; ASSABBANE, A. Removal of cationic dye (Methylene Blue) from aqueous solution by adsorption on two type of biomaterial of South Morocco. **Mater. Today Proc.**, v. 22, n. 1, p. 93-96, 2020.

SCHETTINO JR, M. A.; FREITAS, J. C. C.; CUNHA, A. G.; EMMERICH, F. G.; SOARES, A. B.; SILVA, P. R. N. Preparação e caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz. **Quím. Nova**, v. 30, n. 7, p. 1663-1668, 2007.

SHEN, J.; ZHU, S.; LIU, X.; ZHANG, H.; TAN J. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. **Energy Convers. Manag.**, v. 51, p. 983-987, 2010.

SOONGPRASIT, C.; AHTONG, D.; SRICHAROENCHAIKUL, V.; VICHAPHUND, S.; ATONG D. Hydrocarbon Production from Catalytic Pyrolysis-GC/MS of Sacha Inchi Residues Using SBA-15 Derived from Coal Fly Ash. **Catalysts**, v. 10, p. 1031, 2020.

SOUZA, C. D. R.; NASCIMENTO, L. O. N.; SOUSA, M. P. S.; OLIVEIRA, M. S. Adsorção do corante alaranjado de metila em carvão ativado obtido da casca do cupuaçu. **Res. Soc. Dev.**, v. 12, p. e17121444394, 2023.

SUHAS, S. K.; INDERJEET, T.; JAHANGEER, A.; CHAUDHARY, S.; CHAUDHARY, M.; BASKARAN, S. I.; GOSCIANSKA, J.; KARRI, R. R.; SRIDHAR, K. Adsorptive Analysis of

Azo Dyes on Activated Carbon Prepared from *Phyllanthus emblica* Fruit Stone Sequentially via Hydrothermal Treatment. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 2134, 2022.

TEMESGEN, F.; GABBIYE, N.; SAHU, O. Biosorption of Reactive Red Dye (RRD) on activated surface of banana and orange peels: Economical alternative for textile effluent. **Surf. Interfaces**, v. 12, p. 151-159, 2018.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

UDDIN, M. K. A Review on the Adsorption of Heavy Metals by Clay Minerals, with Special Focus on the Past Decade. **Chem. Eng. J.**, v. 308, p. 438-462, 2017.

WANG, S.; DOU, J.; ZHANG, T.; LI, S.; CHEN, X. Selective Adsorption of Methyl Orange and Methylene Blue by Porous Carbon Material Prepared From Potassium Citrate. **ACS Omega**, v. 8, n. 38, p. 35024-35033, 2023.

WANG, S.; ZHU, F.; KAKUDA, Y. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses. **Food Chem.**, v. 265, n. 1, p. 316-328, 2018.

WANG, X.; LI, D.; LI, W.; PENG, J.; XIA, H.; ZHANG, L.; GUO, S.; CHEN, G. Optimization of mesoporous activated carbon from coconut shells by chemical activation with phosphoric acid, **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 6184-6195, 2013.

ZAYED, A. M.; ABDEL WAHED, M. S. M.; MOHAMED, E.A.; SILLANPÄÄ, M. Insights on the role of organic matters of some Egyptian clays in methyl orange adsorption: Isotherm and kinetic studies. **Appl. Clay Sci.**, v. 166, p. 49-60, 2018.

ZHANG, Z.; XU, L.; LIU, Y.; FENG, R.; ZOU, T.; ZHANG, Y.; KANG, Y.; ZHOU, P. Efficient removal of methylene blue using the mesoporous activated carbon obtained from mangosteen peel wastes: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. **Microporous Mesoporous Mater.**, v. 315, p. 110904, 2021.