

**Development and evaluation of a new bioadsorbent from Amazonian tucuma
(Astrocaryum aculeatum) waste**
**Desenvolvimento e avaliação de um novo bioadsorvente a partir de resíduos do
tucumã da Amazônia (Astrocaryum aculeatum)**

Article Info:

Article history: Received 2024-02-02 / Accepted 2024-05-20 / Available online 2024-06-17

doi: 10.18540/jcecv110iss4pp18851



Tamyris Thaise Costa de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5532-6177>

UNIFESSPA, Brasil

E-mail: tcsouza@unifesspa.edu.br

Mariana Lima de Aquino

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8269-3241>

UNIFESSPA, Brasil

E-mail: marianaquino13@unifesspa.edu.br

Denise Rodrigues Marinho

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7683-6453>

UNIFESSPA, Brasil

Cadyson Moraes Duarte

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0192-4495>

UNIFESSPA, Brasil

Abstract

Adsorption is a technique frequently used in the treatment of contaminated water. The agro-industrial waste used to obtain bioadsorbents has been studied as an alternative with low operational costs and a positive impact on the environment. This manuscript evaluated the efficiency of tucumã peel (common waste from the Amazon region) as an adsorbent for methylene blue. The removal efficiency, adsorption capacity, and process kinetics were evaluated in the adsorption process developed. Adsorption tests achieved dye removal efficiencies of 74% to 91%. The best fit to the experimental data was obtained to pseudo-second order kinetic model and the Freundlich isotherm. Thus, waste tucumã peel can be used as a low-cost biocompatible adsorbent to remove of methylene blue dye.

Keywords: Adsorption. Bioadsorbent. Tucumã. Waste reuse.

Resumo

A adsorção é uma das técnicas mais aplicadas quando se trata de tratamento de águas contaminadas. O aproveitamento de resíduos agroindústrias para produção de bioadsorventes tem sido estudado como uma alternativa de baixo custo operacional e com impacto positivo ao meio ambiente. Esse trabalho busca avaliar o potencial da casca de tucumã (rejeito comum da região amazônica) como um adsorvente para o corante azul de metileno. Foi avaliada a eficiência na remoção do corante, a capacidade de adsorção, e a cinética do processo. Os testes de adsorção resultaram em significativa eficiência de remoção do corante, com resultados variando de 74% a 91%. O melhor ajuste aos dados experimentais foi obtido com o modelo cinético de pseudo-segunda ordem e para a isoterma de Freundlich. Dessa forma, resíduos de casca de tucumã podem ser utilizados como adsorvente biocompatível e de baixo custo para a remoção do corante azul de metileno.

Palavras-chave: Adsorção. Bioadsorvente. Tucumã. Aproveitamento de resíduo.



1. Introdução

Na Amazônia, dentre as variadas espécies nativas de frutos, há duas espécies de tucumã, que são distribuídas, principalmente, com finalidade alimentícia. Uma dessas espécies é a espécie ocidental (*Astrocaryum aculeatum*) na qual tem uma grande procura crescente centrada na região de Manaus, capital do Amazonas, Brasil (Oliveira *et al.*, 2018). Considerada uma fruta ilustre nas feiras, o tucumã possui um rendimento econômico e porta grande atributo para a criação de produtos com notáveis características organolépticas (pães, tapioca, sorvetes e outros), que o torna desejado ao ponto de valorizar o empreendimento de produtores rurais e empresários do Amazonas (Vieira *et al.*, 2017).

De acordo com Didonet (2012), o fato da produção e comercialização do tucumã ter como foco a exploração do mesocarpo, resulta na geração de elevada quantidade de resíduos, incluindo o epicarpo e endocarpo. Isso foi evidenciado, nos anos de 2017 e 2018, quando foi produzido em torno de 12.460 kg de resíduo de casca e 49.840 kg de resíduo de caroço, dos quais 91,9% são descartados irregularmente, sem reaproveitamento (Kieling *et al.*, 2019). A falta de estrutura adequada para a venda de tucumã não apenas resulta na produção de resíduos, mas também ocasiona perdas significativas e frequentes. O *Astrocaryum aculeatum* possui uma vida útil muito curta, de apenas 3 a 4 dias, tornando-se um fruto altamente perecível, conforme relatado pela FAO (1986).

Deste modo, melhores formas de controlar o descarte de resíduo do tucumã, derivado da atividade comercial, devem ser avaliadas, considerando que, conforme Didonet (2012), “o fácil acesso aos resíduos de tucumã, somado a sua grande abundância, pode favorecer ganhos socioeconômicos futuros”.

Sendo assim, o material residual proveniente do processamento do tucumã pode ser considerado para aplicação como adsorvente. Quando se precisa de remoção de poluentes encontrados em sistemas líquidos e/ou gasosos, a adsorção aparece como um dos métodos mais aplicados e com respostas mais eficientes (R. F. Nascimento *et al.*, 2014). Para o tratamento de águas e águas residuárias, esta operação foi sendo empregada nas indústrias com a finalidade de diminuir os níveis de compostos tóxicos, dos seus efluentes, ao meio ambiente.

Nesse contexto, é possível citar a indústria têxtil, a qual é a segunda maior causadora de poluição de rios e mares. Dentro dessa indústria, o uso da água ocorre, essencialmente, em todas as fases, o que solicita uma grande concentração de água que, posteriormente, acaba sendo contaminado pelos produtos químicos tóxicos, como corantes, que participam da produção, exigindo depois que a água seja tratada (Andrade, 2020).

Mesmo em pequena concentração, o lançamento não controlado do corante intervém na absorção da luz pela flora e fauna aquática, o que desequilibra o ecossistema e debilita a atividade biológica da vida aquática (Albuquerque, 2009). Ademais, a degradação dos corantes, no meio ambiente, não ocorre com facilidade, o que causa em um longo tempo de permanência.

No mundo, 15% de toda a água consumida é destinada para a indústria têxtil, sendo que apenas no tingimento, são usados 183.750.000 litros de água diariamente (Andrade, 2020). Com a elevada poluição dos recursos hídricos, pesquisas por soluções para os problemas ambientais causados pela ação humana é constante, tendo em vista que qualquer solução, simples ou complexa, é válida para a diminuição dos impactos ambientais.

Na literatura, vários estudos foram efetuados na utilização de adsorventes, usando resíduos agroindustriais, como casca do limão (Costa & Melo, 2018), casca de pequi (Barroso *et al.*, 2019), casca de arroz (Silva & Santos, 2019), carvão ativado de casca de tucumã (C. D. R. Souza *et al.*, 2023), serragens de *Pinus elliotti* (Castro *et al.*, 2021; Müller *et al.*, 2019), bagaço de laranja, casca de ovo (Castro *et al.*, 2021), além de palha de milho e bainha do palmito pupunha (Honorato *et al.*, 2015).

Portanto, com uma alternativa para remoção de corantes de efluentes, será avaliado o reaproveitamento do resíduo de casca de tucumã como um adsorvente, proporcionando uma destinação mais nobre e gerando valor agregado para esse material, o que possibilitará redução dos impactos ambientais de forma econômica.

2. Metodologia

2.1 Obtenção do bioadsorvente

O fruto, utilizado para o estudo, foi o tucumã, da palmeira *Astrocaryum aculeatum*. Para garantir a utilização de amostras limpas, livre de sujidades, e em perfeito estado (sem qualquer resquício de putrefação), os frutos foram, criteriosamente, lavados em água corrente e selecionados.

A partir das unidades de tucumã selecionadas foi feita a separação das diferentes partes do fruto: (epicarpo), polpa (mesocarpo) e amêndoa (endocarpo). As cascas foram então submetidas à etapa de cominuição, sendo trituradas por meio de um liquidificador doméstico.

Com base no estudo de T. T. C. Souza *et al.* (2021), foi realizada a secagem da casca do tucumã. O tempo de secagem foi de 7 horas e 30 minutos a 60°C, e apresentou um índice de umidade (b.s) de, aproximadamente, 10%, resultado em conformidade para realização de testes de adsorção.

A casca seca foi triturada novamente e logo após peneirada (Tyler/MESH 24). A Figura 1 mostra o fruto tucumã (a), a sua casca na forma in natura (b) e a casca seca e peneirada (c), apresentando um diâmetro médio menor ou igual a 0,71mm.

A casca do tucumã seca e peneirada foi submetida a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a fim de de observar a estrutura microscópica da superfície do adsorvente e identificação da composição deste.

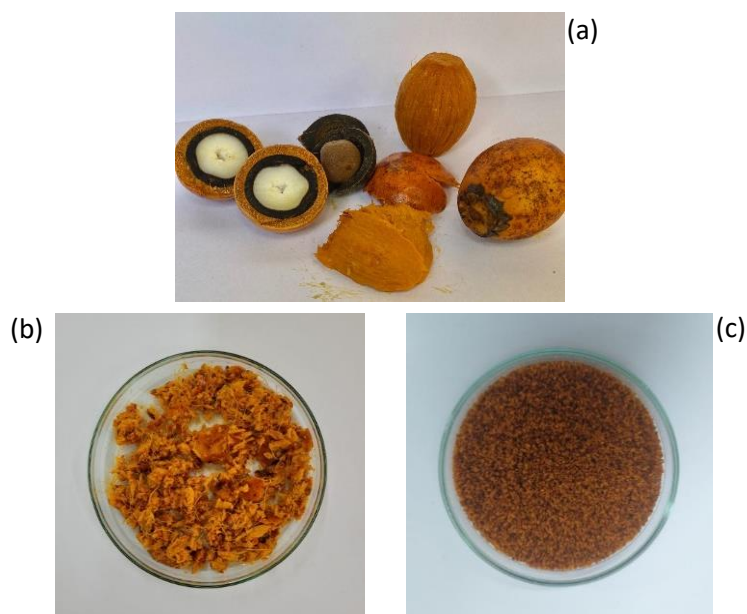


Figura 1 - Fruto tucumã (a) e, cascas de tucumã in natura (b) e seca e peneirada (c).

2.2 Testes de adsorção

Com o objetivo de avaliar o potencial de utilização da casca de tucumã como adsorvente alternativo, foram conduzidos testes de adsorção em batelada para interações sólido-líquido. As concentrações da solução de azul de metileno em água destilada foram de 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100 ppm, como mostra a Figura 2.

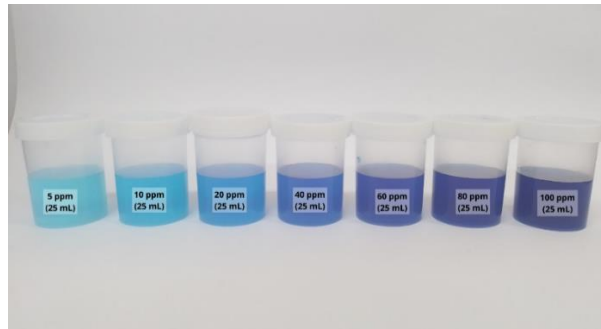


Figura 2 - Soluções de Azul de metileno.

Os testes de adsorção foram realizados utilizando 0,5 gramas do adsorvente e 25 mL da solução de corante. O sistema adsorvente-adsorbato foi adicionado a um frasco coletor universal e mantido sob agitação. A agitação dos frascos foi realizada em um shaker de bancada a uma velocidade de 90 rotações por minuto (RPM).

Após a agitação, todas as amostras foram submetidas a uma centrifugação durante 15 minutos, utilizando uma centrífuga analógica modelo 80-2B para facilitar a separação da amostra líquida. Cada ensaio foi conduzido em triplicata e a temperatura de 30°C.

As concentrações das soluções de azul e metileno, após o tempo de contato sólido-líquido foram determinados por análise de UV-Vis (Espectrofotômetro - marca BIOVERA, modelo Bel SPECTRO S05) no comprimento de onda relativo ao azul de metileno (665 nm).

2.3 Cinética de adsorção

Para a análise da cinética de adsorção foram realizados ensaios em batelada de concentração de corante em função do tempo até atingir o equilíbrio. Na análise os dados experimentais coletados foram aplicados modelos matemáticos de Pseudoprimeira ordem, Pseudosegunda ordem, Elovich e Difusão Intrapartícula, como mostra na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos modelos cinéticos aplicados aos resultados de adsorção.

Modelo	Equação
Pseudoprimeira ordem	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$ (1)
Pseudosegunda ordem	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$ (2)
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t$ (3)
Difusão intrapartícula	$q_t = C + K_d t^{0,5}$ (4)

Os parâmetros mostrados na Tabela 1 são: K_1 - constante de velocidade da adsorção de pseudoprimeira ordem, [min^{-1}]; q_e e q_t - quantidades de adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t , respectivamente, [mg g^{-1}]; K_2 - valor da constante de velocidade/taxa de adsorção de pseudosegunda ordem [$\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$]; α - constante do modelo de Elovich relacionada à taxa de quimiossorção; β - constante do modelo de Elovich relacionada à extensão da cobertura da superfície; C - parâmetro sem dimensão associado a espessura da camada limite do modelo de difusão intrapartícula; K_d - constante do modelo de difusão intrapartícula [$\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-0,5}$].

2.3 Isotermas de adsorção

A representação gráfica da isoterma de equilíbrio, a uma temperatura constante e sob condições de equilíbrio, pode ser feita através da relação entre a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) e concentração

do adsorvato no equilíbrio (C_e). Para isso foram utilizados a isoterma de Langmuir e a isoterma de Freundlich a fim de identificar o tipo de do processo de adsorção e a natureza da interação que se estabelece entre o adsorvato e o adsorvente (Honorato *et al.*, 2015).

A Equação (5) mostra a representação matemática da isoterma de Langmuir.

$$q_e = \frac{q_{max}K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

Onde K_L é a constante de interação adsorvente/adsorvato do modelo de Langmuir, [$L\ mg^{-1}$], e q_{max} é a capacidade máxima de adsorção, [$mg\ g^{-1}$].

Para a equação de Freundlich, pode-se aplicar a sua representação matemática, mostrada na Equação 6.

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

Onde K_F é uma constante que mede a capacidade de adsorção do modelo de Freundlich [$L\ mg^{-1}$] e $1/n$ é o fator de heterogeneidade.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização do bioadsorvente

A Figura 3 mostra uma extensão ampliada da superfície da casca de tucumã, capturada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que é uma técnica bastante usada para investigar a morfologia física da superfície de amostras sólidas.

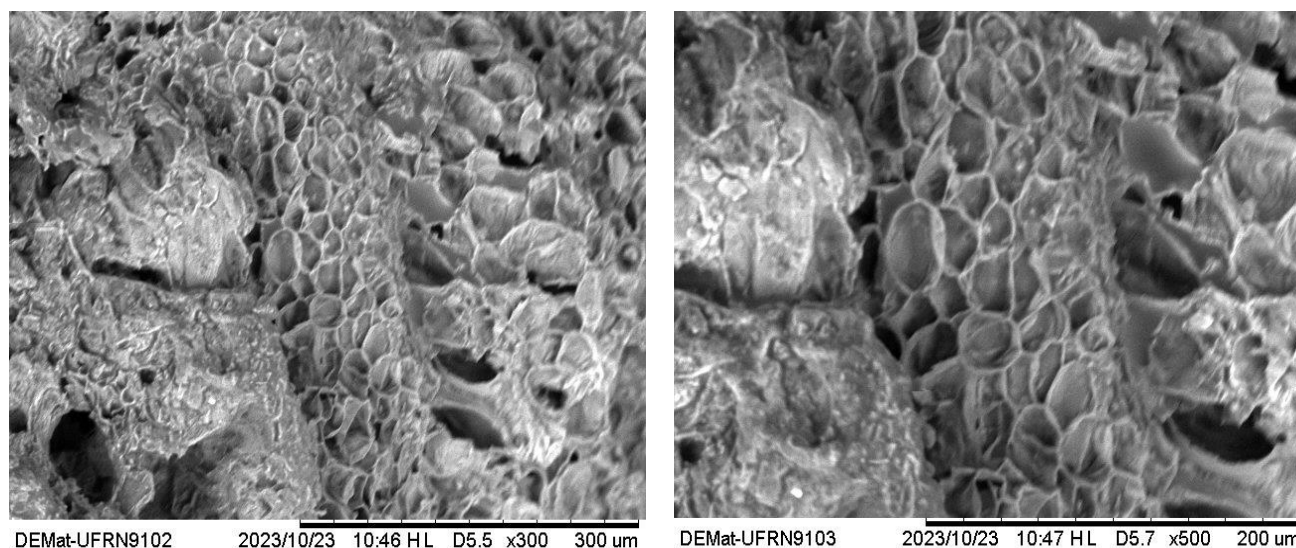


Figura 3 - Micrografia da casca de tucumã seca com aumentos de 300 e 500 X.

A amostra de casca de tucumã exibe uma superfície irregular e porosa sob o MEV. As áreas porosas são facilmente identificadas e as estruturas irregulares apresentam variações significativas em termos de forma. A porosidade parece variar em tamanho e distribuição, com alguns poros pequenos e outros maiores, criando uma textura complexa.

Devido à sua porosidade e área superficial exposta, é esperado que haja uma capacidade significativa de adsorver substâncias em sua superfície (Borba, 2006). Ou seja, haverá uma grande quantidade de locais de adsorção disponíveis para moléculas ou íons. Além disso, esse tipo de material pode se tornar útil em uma variedade de aplicações de purificação e separação, dependendo da natureza da adsorção e seletividade.

Para a determinação dos grupos funcionais aos quais compõem a amostra da casca de tucumã seca, foi utilizada a análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Através do FTIR é possível observar a intensidade das bandas de absorção, a qual é equivalente à concentração do respectivo grupo funcional.

Na Figura 4 é apresentado o resultado da análise de espectroscopia no infravermelho para a amostra de grãos da casca de tucumã.

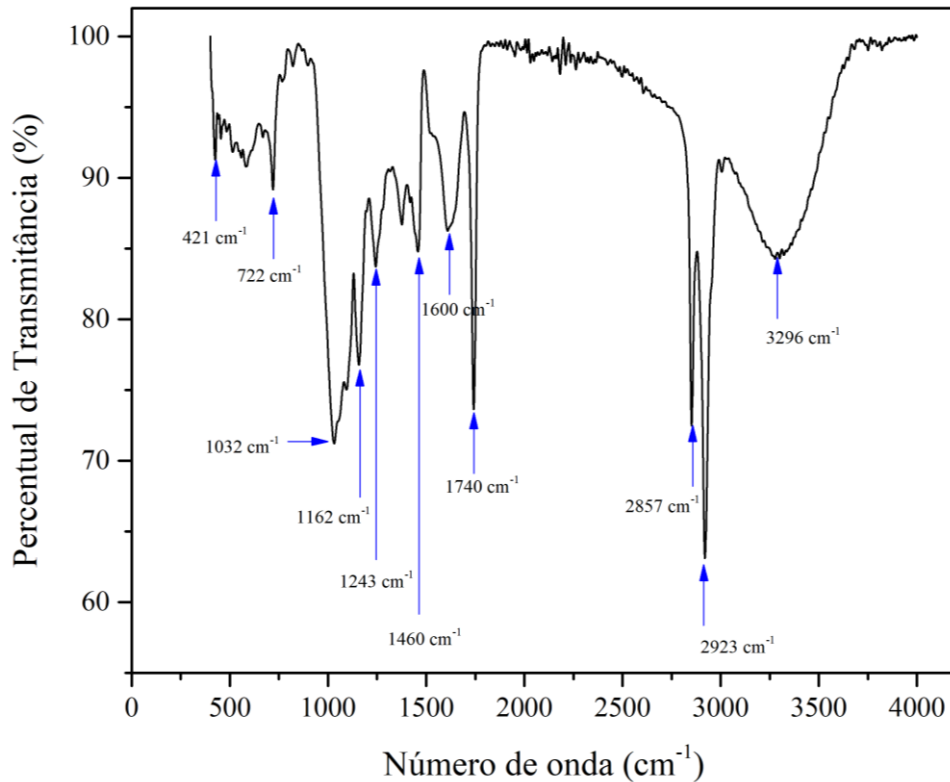


Figura 4 - Espectro de FTIR da amostra de casca de tucumã.

A Figura 4 mostra o gráfico de análise de espectroscopia no infravermelho para grãos secos da casca de tucumã. Com base nesse resultado, observa-se: i) banda mais larga em 3296 cm^{-1} é atribuído ao alongamento vibracional da ligação O-H; ii) maior intensidade de absorção no intervalo de 3000 a 2850 cm^{-1} . Nesse faixa de número de onda os grupos funcionais estão associados a ligação C-H, presentes em espectros de ácidos graxos e triacilgliceróis. Esse resultado aponta que existe elevada quantidade de grupos metilas na amostra, com estiramento assimétrico (2923 cm^{-1}) e simétrico (2857 cm^{-1}); iii) Os picos em 1740 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} estão relacionados a ligação C=O. A literatura aponta que o número de onda da absorção da ligação C=O em compostos com grupos éster e carboxila aparecem no intervalo de número de onda de 1850 a 1600 cm^{-1} ; iv) na região de número de onda de 1460 cm^{-1} é típica de deformação do CH_2 , presente nos espectros de ácidos graxos; v) absorção com comprimento de onda no intervalo de 1300 a 1000 cm^{-1} são característicos de grupos C-O, resultado que corrobora com a presença de éster na estrutura geral de um triglicérido (Dragunski *et al.*, 2012; Leonardi *et al.*, 2019; Silverstein., 2005).

Com base nos resultados da espectroscopia no infravermelho para a casca do tucumã observa-se picos mais acentuados na faixa de comprimento de onda entre 3000 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} , sendo associado a presença de ácidos graxos, triacilgliceróis e ésteres. Ou seja, esse resultado corrobora com a literatura no que diz respeito a composição da casca do tucumã.

3.2 Caracterização do bioadsorvente

A Figura 5 mostra o percentual de remoção de azul de metileno em função do tempo.

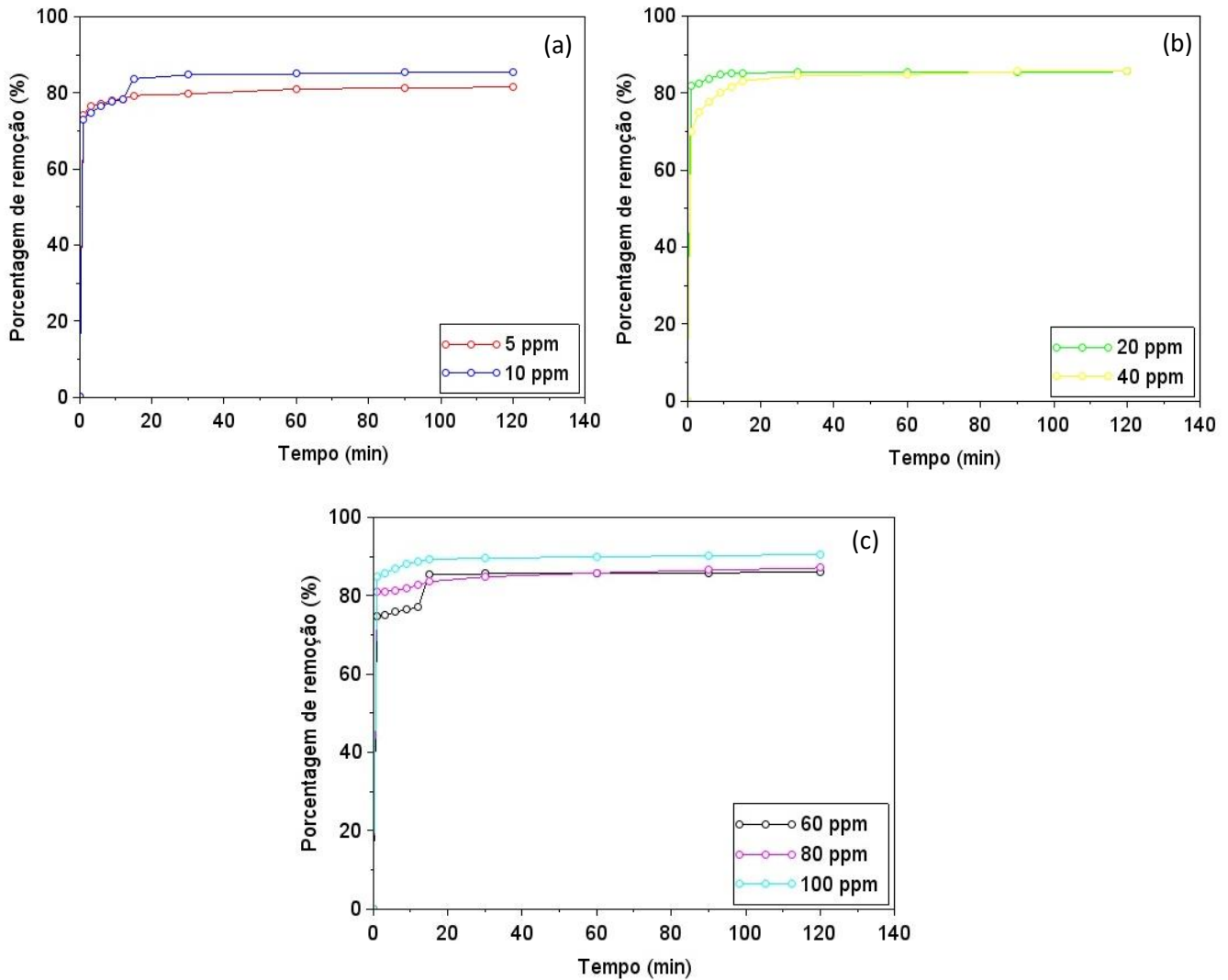


Figura 5 - Avaliação da remoção de azul de metileno para as concentrações de 5 e 10 ppm (a), 10 e 20 ppm (b) e 60, 80 e 100 ppm (c).

Na Figura 5 observa-se que todos os testes tiveram eficiência satisfatória na remoção do corante, com percentuais de remoção superiores a 74%. Os testes de adsorção foram realizados até o tempo de 120 min. No entanto, nota-se, que a remoção de corante é significativamente crescente até 15 minutos, seguida por uma desaceleração gradual até atingir a estabilidade nos 60 minutos. Ademais, aos 120 min, a adsorção teve a capacidade de remoção máxima de 90,5%.

À medida que esses sítios vazios vão sendo ocupados pelo composto, sua disponibilidade diminui, o que eventualmente leva ao estabelecimento de um equilíbrio entre a adsorção e a liberação do corante no adsorvente (Henrique, 2022). Possivelmente, uma maior quantidade de sítios ativos é rapidamente ocupada pelas moléculas do corante. Na Tabela 2 é mostrada a remoção máxima de corante para cada concentração de corante.

Tabela 2 - Máxima remoção do corante Azul de metileno em 120 min.

Concentração (ppm)	Remoção máxima (%)
5	81,5
10	85,5
20	85,6
40	85,6
60	86,1
80	87,1
100	90,5

Analisando os dados da Tabela 2, é possível observar que com o aumento da concentração de corante, em solução, o percentual de remoção, no geral, também cresce. Um aumento na concentração de adsorbato pode acelerar a propagação das partículas adsorvidas da solução para a superfície sólida. Isso ocorre porque uma maior concentração de adsorbato resulta em uma maior probabilidade de colisões entre as partículas do adsorbato e a superfície sólida, o que, por sua vez, aumenta a taxa de adsorção (Borba, 2006). Isso significa que a quantidade de adsorbato adsorvida por unidade de tempo é maior em concentrações mais elevadas.

O alto índice de remoção do corante azul de metileno foi obtido no estudo de C. D. R. Souza *et al.* (2023) O autor avaliou a eficiência de adsorção do carvão ativado de casca de tucumã na remoção do corante azul de metileno e obteve uma eficiência de remoção de 99,47%. Similarmente, ao estudo de Costa & Melo (2018), que analisou a capacidade de adsorção das fibras da casca do limão taiti, e obteve capacidades de remoção de 91,49% a 99%, dependendo da forma que a fibra foi tratada.

Dessa forma, observa-se que a maior concentração de adsorbato cria um gradiente de concentração mais acentuado, incentivando as partículas a se moverem em direção à superfície sólida e se adsorverem mais rapidamente. A casca de tucumã se mostrou eficaz como bioadsorvente, e assim, uma alternativa viável para processos de remoção do corante azul de metileno.

3.3 Cinética de adsorção

A análise da cinética de adsorção foi conduzida para identificar o tempo necessário para que o sistema alcance um estado de equilíbrio do processo de adsorção. Essa análise é essencial para determinar o padrão do comportamento da taxa de adsorção com o tempo (R. F. Nascimento *et al.*, 2014). Na Figura 6 é possível observar a capacidade de adsorção (q) em função do tempo de interação adsorvente-adsorbato.

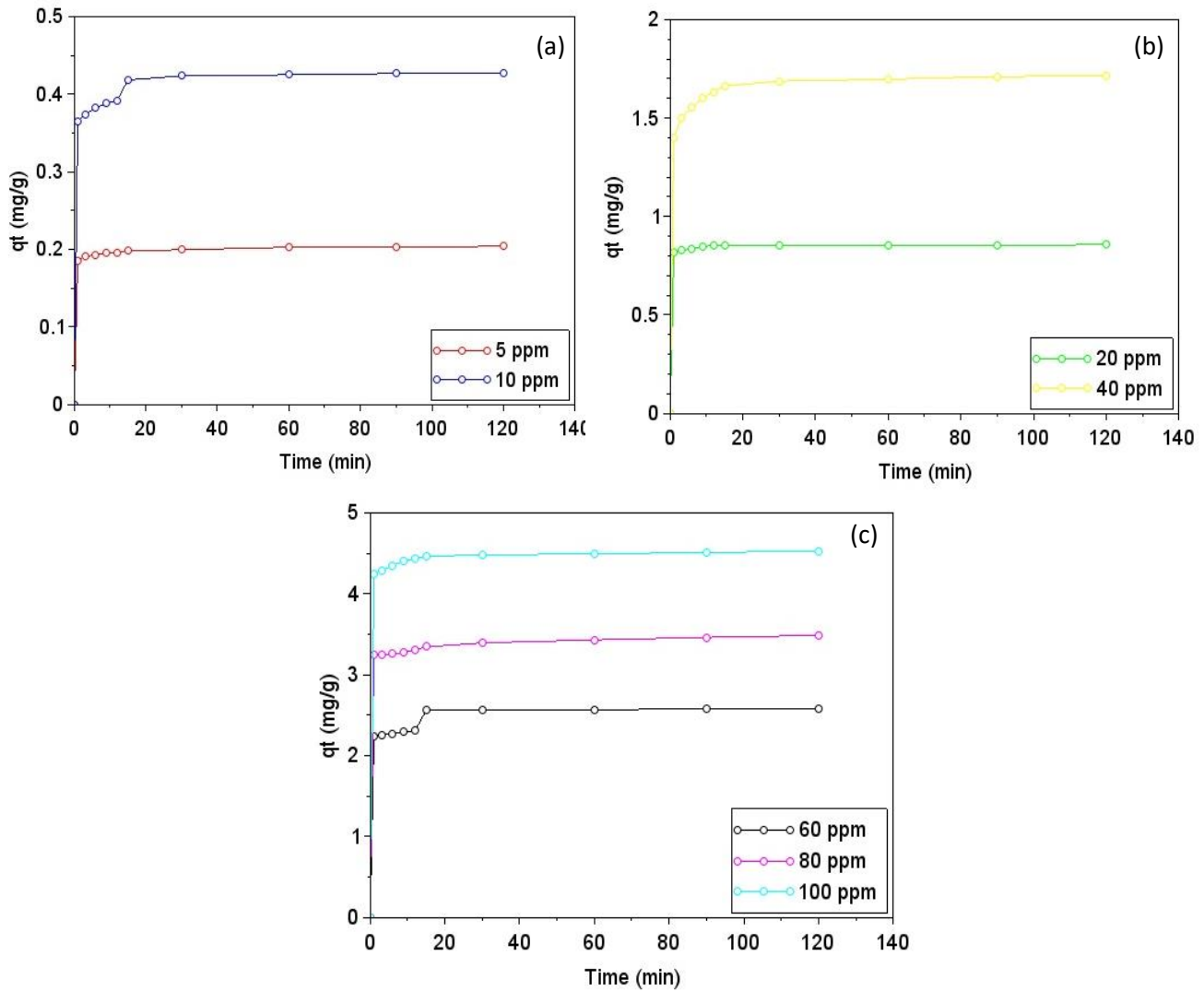


Figura 6 - Cinética de adsorção do azul de metileno para as concentrações de 5 e 10 ppm (a), 10 e 20 ppm (b) e 60, 80 e 100 ppm (c).

Verifica-se, na Figura 6, que a taxa de remoção é mais alta, no início, e desacelera progressivamente ao longo do tempo, até atingir um ponto de estabilidade. Para investigar e compreender o método que rege o processo de adsorção estudado foram aplicados quatro tipos de modelos cinéticos: Pseudoprimeira Ordem, Pseudossegunda Ordem, Elovich e Difusão Intrapartícula. Esses modelos ajudam a analisar fatores como transferência de massa na solução e reações químicas envolvidas na adsorção. Os resultados da cinética de adsorção foram ajustados aos referidos modelos, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros cinéticos para adsorção do azul de metileno.

Modelo	Parâmetro	Concentração (ppm)						
		5	10	20	40	60	80	100
Pseudoprimeira Ordem	K_1	-0.015	-0.007	-0.009	-0.014	-0.01	-0.005	-0.005
	q_e	0.025	0.151	0.090	0.314	0.835	1.314	1.319
	R^2	0.943	0.917	0.921	0.936	0.921	0.918	0.918
Pseudossegunda Ordem	K_2	15.168	4.448	14.604	1.275	0.663	0.655	1.109
	q_e	0.204	0.429	0.856	1.718	2.594	3.484	4.527
	R^2	0.993	0.998	0.999	0.998	0.997	0.992	0.994
Elovich	α	11.208	9.344	89.59	32.90	56.33	215.78	346.36
	β	49.020	21.186	12.315	5.171	3.520	2.931	2.272
	R^2	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982	0.982
Difusão Intrapartícula	K_d	0.008	0.019	0.032	0.078	0.118	0.141	0.177
	C	0.142	0.279	0.624	1.120	1.674	2.412	3.225
	R^2	0.976	0.976	0.975	0.977	0.977	0.975	0.975

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 3, o modelo de pseudossegunda ordem apresentou ajuste de dados experimentais mais adequado, em comparação aos demais, já que R^2 é mais próximo de 1. Os resultados para os modelos de Elovich e difusão intrapartícula também mostraram ajustes satisfatórios. Dessa forma, com base nos valores dos coeficientes de correlação, há uma correspondência forte entre os valores previstos pelos modelos matemáticos e os dados experimentais (Coelho, 2006).

Segundo Honorato *et al.* (2015), que estudo a cinética de adsorção utilizando resíduos agroindustriais para remoção do corante azul de metileno, o modelo cinético de pseudossegunda ordem foi o mais condizente com os dados experimentais obtidos. No estudo de Müller *et al.* (2019), os autores utilizaram pinus e bambu como adsorventes para o azul de metileno, o modelo cinético de pseudossegunda ordem obteve o melhor ajuste aos dados experimentais.

Sendo assim, é possível afirmar que o mecanismo que mais se aproxima do processo de adsorção em questão é o da fisiossorção (adsorção física), pois o modelo de pseudossegunda ordem indica que a taxa de reação varia conforme a quantidade de soluto adsorvida na superfície do material adsorvente e a quantidade de soluto adsorvida na condição de equilíbrio. Esse comportamento é comum em processos de adsorção física (Ho & Ofomaja, 2006).

3.4 Isotermas de adsorção

Uma isoterma de adsorção caracteriza o equilíbrio entre a concentração de um fluido e a concentração das partículas do adsorvente, considerando indicadores específicos como temperatura e pressão. Isso possibilita uma análise quantitativa do processo de adsorção (É. V. Nascimento, 2021). A Figura 7 mostra os resultados experimentais de capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) e a concentração de equilíbrio (C_e) correspondente, e os resultados dos modelos de Langmuir e Freundlich.

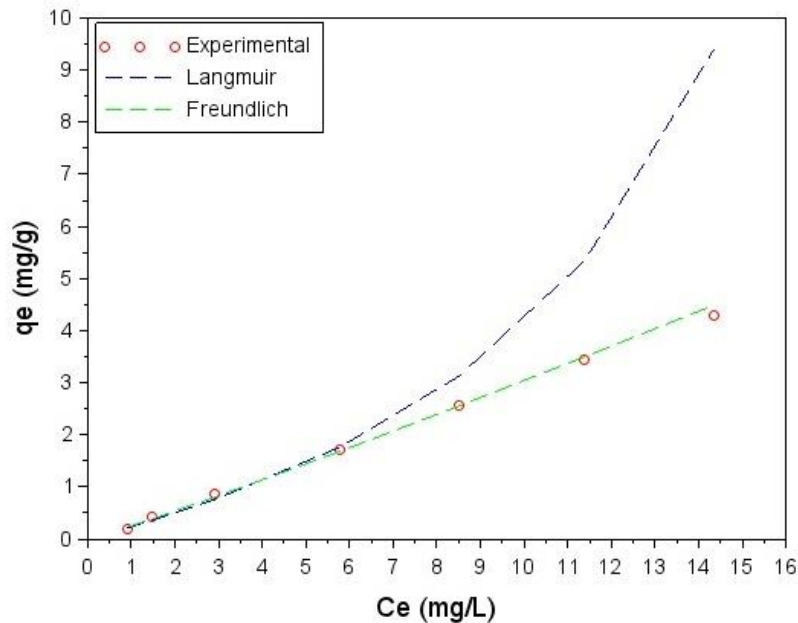


Figura 7 - Ajuste das isotermas de adsorção do corante utilizando a casca do tucumã como adsorvente.

As isotermas de adsorção podem ser classificadas com base na sua inclinação e curvatura. Uma classificação feita com base no comportamento da tendência dos dados experimentais, porém não traz avaliação no que diz respeito ao processo e a forma da isoterma. É possível considerar, com base no comportamento dos dados experimentais (Figura 7), que dentro da faixa de concentração de corante analisada, a isoterma de adsorção se assemelha a uma isoterma do tipo C, subgrupo 1. Esse comportamento de caracteriza pela afinidade de sorção constante e adsorção de soluções diluídas (Giles *et al.*, 1960; Hinz, 2001).

Segundo Leandro-Silva *et al.* (2020), para uma análise quantitativa é necessário ajustar a curva através de modelos matemáticos. A Tabela 4 mostra os parâmetros matemáticos referentes aos modelos aplicados aos dados experimentais.

Tabela 4 - Parâmetros de Langmuir e Freundlich.

Isotermas	Parâmetros	Valores
Langmuir	K_L	-0.0459
	q_{max}	-4.8852
	R^2	0.9623
Freundlich	K_F	0.2521
	$1/n$	1.0814
	R^2	0.9913

Tomando como base os coeficientes de correlação (Tabela 4) e a tendência das curvas dos modelos, observa-se que a isoterma de Freundlich teve melhor ajuste. No estudo de Costa & Melo (2018) sobre a capacidade de adsorção das fibras da casca do limão taiti, o modelo de Freundlich teve o melhor ajuste aos seus dados experimentais. Antunes *et al.* (2018) observou que a isoterma de Freundlich descreveu mais adequadamente a remoção de azul de metileno utilizando casca de abacaxi como adsorvente.

O coeficiente $1/n$, no modelo de Freundlich, caracteriza a heterogeneidade da superfície. Quando $1/n$ entre 0 e 1, a superfície é favorável ao processo de adsorção (Do, 1998). A superfície se torna mais heterogênea e a interação do adsorbato com o adsorvente se torna mais forte, quanto mais próxima de 0 ela chegar. Quando $1/n$ maior que 1 demonstra que a superfície do adsorvente interage mais favoravelmente com o solvente, ou seja, uma possível maior atração intermolecular entre adsorvente-solvente, tendendo a uma

adsorção desfavorável. A solução é linear quando o valor de $1/n$ é igual a 1, caracterizando energias semelhantes nos sítios de adsorção.

Para esse processo de adsorção têm-se o valor de $1/n$ aproximadamente igual a 1, o que é um indicativo de um processo linear, logo, a energia de adsorção é linear para todos os sítios, o que pode ocorrer em concentrações baixas do soluto e com baixa carga do solvente (Delle-Site, 2001).

A isoterma de Freundlich é amplamente reconhecida por ser descritiva em relação à adsorção em superfícies de materiais heterogêneos e é particularmente eficaz no detalhamento de dados experimentais relacionados à adsorção física (Botelho *et al.*, 2016).

Os parâmetros q_{max} e KL (da isoterma de Langmuir) são negativos. Esse resultado não é esperado para um ajuste desse modelo. q_{max} pode ser definido como a quantidade de sítios disponíveis na amostra, o que mostra que um valor negativo não é aceitável (Leandro-Silva *et al.*, 2020). Uma possível alternativa para melhor avaliar o ajuste da isoterma de Langmuir seria realizar testes em concentrações superiores as testadas nesse trabalho.

4. Conclusão

Nesse estudo, os resultados demonstraram que a casca do tucumã é uma alternativa para produção de bioadsorvente com alta eficiência para remoção do corante azul de metileno em compostos líquidos. A eficiência do processo de remoção chegou a 90,5%.

Na modelagem cinética do processo, o modelo de pseudossegunda ordem mostrou-se ser o mais apropriado para descrever os resultados experimentais. A partir desse modelo, sugere-se que o processo é predominantemente controlado por adsorção física.

Na análise das isotermas, verificou-se que os dados experimentais se adequaram, de forma mais satisfatória, ao modelo de Freundlich.

De forma geral, a casca de tucumã tem potencial promissor na aplicação como adsorvente. Essa aplicação pode ser uma alternativa para a destinação da alta produção de resíduos sólidos associados a essa biomassa na região Amazônica. Uma aplicação prática que busca minimizar os impactos ambientais de forma barata e sustentável. Por fim, sugere-se a avaliação da aplicação da casca do tucumã como adsorvente para soluções de corante em elevadas concentrações.

Referências

- Albuquerque, L. F. (2009). *Aplicação da água residuária das salinas no tratamento de efluente têxtil*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Andrade, L. L. de. (2020). *MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS POR PEÇAS DO VESTUÁRIO DESCARTADAS PÓS FABRICAÇÃO: UMA PROPOSTA DE MODELO DE NEGÓCIO E PLATAFORMA WEB PARA O POLO CONFECIONISTA*. Universidade de Ribeirão Preto.
- Antunes, E. C. E. S., Pereira, J. E. S., Ferreira, R. L. S., Medeiros, M. F. D., & Barros Neto, E. L. (2018). REMOÇÃO DE CORANTE TEXTIL UTILIZANDO A CASCA DO ABACAXI COMO ADSORVENTE NATURAL. *HOLOS*, 03(34), 81–97. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.5334>.
- Barroso, J. A. D., Lopes, L. R., & Cunha, R. N. Da. (2019). *Estudo da adsorção de azul de metileno utilizando cascas de pequi / Study of methylene blue adsorption using small peels*. *Brazilian Journal of Development*, 5(12), 29349–29356. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-092>.
- Borba, C. E. (2006). *MODELAGEM DA REMOÇÃO DE METAIS PESADOS EM COLUNA DE ADSORÇÃO D ELEITO FIXO*. Universidade Estadual e Campinas.
- Botelho, L., Silva, B., Neto, A., Sousa, R., Bellato, C., & Silva, D. (2016). ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE ÍONS CÁLCIO (Ca²⁺) EM MATERIAIS CELULÓSICOS. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 2, 132–145. <https://doi.org/10.18540/jcecvl2iss3pp132-145>.
- Castro, M., Alves, E., Saqueti, B., & Montanher, S. (2021). Utilização de azul de metileno para investigar a capacidade adsorvente de biomassas. *Research, Society and Development*, 10(14), 1–11. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22034>.

- Coelho, T. C. (2006). *ESTUDOS DE ADSORÇÃO DE COBRE (II) EM MICROESFERAS DE QUITOSANA RETICULADAS COM EPICLORIDRINA E IMPREGNADAS COM HEPARINA*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Costa, D. M. A. da, & Melo, J. J. S. de. (2018). ESTUDO DA CAPACIDADE DE REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO PELA BIOMASSA DA CASCA DO LIMÃO TAITI (*Citrus Latifolia*). *Holos Environment*, 2(18), 271–282. <https://doi.org/10.14295/holos.v18i2.12285>.
- Delle-Site, A. (2001). Factors Affecting Sorption of Organic Compounds in Natural Sorbent Water Systems and Sorption Coefficients for Selected Pollutants: A Review. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 30(1), 187–439. <https://doi.org/10.1063/1.1347984>.
- Didonet, A. A. (2012). *O mercado de um produto florestal não madeireiro e o resíduo sólido gerado pela sua comercialização: o caso do tucumã (*Astrocaryum aculeatum* G. Mey.) nas feiras de Manaus*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.
- Do, D. D. (1998). *ADSORPTION ANALYSIS: EQUILIBRIA AND KINETICS* (R. T. Yang (ed.); 1st ed.). Imperial College Press.
- Dragunski, C., Souza, J. V. T. M., Massocatto, C. L., Diniz, K. M., Tarley, C. R. T., & Caetano, J. D. (2012). Adsorção de cromo (III) por resíduos de laranja in natura e quimicamente modificados. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 33(1), 03–16. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2012v33n1p3>.
- FAO, A. (186 C.E.). *Examples from Latin America*. In *Food and fruit-bearing forest species* (1st ed., p. 260). FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.
- Giles, C. H., MacEwan, T. H., Nakhwa, S. N., & Smith, D. (1960). Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. *Journal of the Chemical Society*, 786(0), 3973–3993. <https://doi.org/10.1039/JR9600003973>.
- Henrique, D. C. (2022). *PRODUÇÃO DE CaAI/HDL A PARTIR DE RESÍDUO CALCINADO DE CONCHA DE *Mytella falcata* PARA REMOÇÃO DOS CORANTES AZUL DE METILENO E ALARANJADO DE METILA*. Universidade Federal de Alagoas.
- Hinz, C. (2001). Description of sorption data with isotherm equations. *Geoderma*, 99(3), 225–243. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00071-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00071-9).
- Ho, Y.-S., & Ofomaja, A. E. (2006). Pseudo-second-order model for lead ion sorption from aqueous solutions onto palm kernel fiber. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1), 137–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.020>.
- Honorato, A. C., Machado, J. M., Celante, G., Borges, W. G. P., Dragunski, D. C., & Caetano, J. (2015). Biossorção de azul de metileno utilizando resíduos agroindustriais. In *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19. Scielo.
- Kieling, A., Santana, G., Dos-Santos, M., S., Cassia, H., Jaqinon, C., César, C., & Monteiro, P. (2019). CADEIA DO TUCUMÃ COMERCIALIZADO EM MANAUS-AM. *Scientia Amazonia*, 8(2), 9.
- Leandro-Silva, E., Pipi, A. R. F., Magdalena, A. G., & Piacenti-Silva, M. (2020). Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. *Matéria* (Vol. 25). Scielo. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1056>.
- Leonardi, B., Arauz, L., & Baruque-Ramos, J. (2019). Chemical characterization of Amazonian non-polar vegetal extracts (buriti, tucumã, Brazil nut, cupuaçu, and cocoa) by infrared spectroscopy (FTIR) and gas chromatography (GC-FID). *Infarma - Ciências Farmacêuticas*, 31, 163. <https://doi.org/10.14450/2318-9312.v31.e3.a2019.pp163-176>.
- Müller, L. C., Alves, A. A. de A., Mondardo, R. I., & Sens, M. L. (2019). Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24, pp. 687–695). scielo. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019160344>.
- Nascimento, É. V. (2021). *ADSORÇÃO DE CORANTES EM ÓXIDOS MISTOS: ESTUDOS CINÉTICOS, DE EQUILÍBRIO E DE REÚSO DO ADSORVENTE*. Universidade Federal de Sergipe.
- Nascimento, R. F., Lima, A. C. A., Vidal, C. B., Melo, D. de Q., & Raulino, G. S. C. (2014). *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais* (1st ed.). Imprensa Universitária.

- Oliveira, S. F. de, Moura Neto, J. P. de, & Silva, K. E. R. da. (2018). Uma revisão sobre a morfoanatomia e as propriedades farmacológicas das espécies *Astrocaryum aculeatum* Meyer e *Astrocaryum vulgare* Mart. *Scientia Amazonia*, 7(3), 1–11.
- Silva, M. B. da, & Santos, J. H. P. dos. (2019). Estudo experimental do uso da casca de arroz na adsorção do azul de metileno/ Experimental study of rice use in methylene blue adsorption. *Brazilian Journal of Development*, 5(10), 19389–19394. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n10-165>.
- Silverstein, R. M., Francis, W. X., & Kiemle, D. J. (2005). *Spectrometric identification of organics compounds* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Souza, C. D. R. de, Teixiera, M. M., & Fernandes, S. R. L. (2023). Influência dos parâmetros na síntese do carvão ativado da casca do *Astrocaryum aculeatum* no processo de adsorção. *Revista Principia*, 60(3), 1–19. <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6436>.
- Souza, T. T. C., Monteiro, E. R., Ribeiro, C. T., Souza, D. S., & Santos, T. T. (2021). Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem do epicarpo, mesocarpo e endocarpo do tucumã (*Astrocaryum aculeatum*). *Brazilian Journal of Food Technology*, 24(e2020032), 1–13. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03220>.
- Vieira, L., Azevedo, S., Silva, G., & Albuquerque, P. (2017). ESTUDO DO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DA POLPA DO TUCUMÃ (*Astrocaryum aculeatum*) IN NATURA ARMAZENADA EM EMBALAGENS A VÁCUO. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 3(4), 1–6. <https://doi.org/10.18540/24469416030420170672>.