

ESTUDOS DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO UTILIZANDO O RESÍDUO AGROINDUSTRIAL PALHA DE MILHO

Davi Luz Fonseca¹

Carina Contini Triques de Almeida²

Resumo: A presença de corantes em efluentes têxteis representa um problema ambiental devido à sua persistência no meio ambiente e aos impactos que pode causar aos ecossistemas aquáticos. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos agroindustriais como adsorventes surge como uma alternativa sustentável para o tratamento desses efluentes. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da palha de milho na remoção do corante azul de metileno por adsorção. Para isso, o material foi lavado, seco, triturado e caracterizado por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Em seguida, foram realizados ensaios de adsorção em batelada para o estudo da cinética e do equilíbrio. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem e às isotermas de Langmuir e Freundlich nas temperaturas de 20, 30 e 40 °C. Também foi calculado o fator de separação de equilíbrio para avaliar a favorabilidade do processo. A análise por FTIR confirmou a presença de grupos funcionais associados ao processo adsorptivo. O equilíbrio foi atingido em aproximadamente 90 minutos, e o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados cinéticos. Para o equilíbrio, ambos os modelos representaram adequadamente os resultados experimentais, com superioridade para Freundlich. A capacidade máxima de adsorção (Q_{max}) obtida foi de aproximadamente 49 mg/g. Conclui-se que a palha de milho apresenta potencial como adsorvente de baixo custo para a remoção de azul de metileno, contribuindo para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no tratamento de efluentes.

Palavras-Chave: Adsorção. Palha de milho. Azul de metileno.

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é uma parte do DNA de Santa Catarina, ultrapassando São Paulo no valor de transformação industrial e atingindo o primeiro lugar em produção de vestuário e acessórios (Negócios, 2026). Apesar da sua importância econômica, o processo de lavagem de tecidos têxteis resulta em uma quantidade significativa de resíduos líquidos contendo corantes e pigmentos. Estes corantes podem afetar tanto a saúde humana como o meio ambiente e sua presença é problemática por serem moléculas recalcitrantes (Meili *et al.*, 2019).

Dentre estes corantes, destaca-se o azul de metileno, amplamente utilizado na indústria têxtil para o tingimento de fibras e tecidos (Wanderley *et al.*, 2019).

¹ Acadêmico(a) do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages; daviluzyt@gmail.com

² Orientador(a) - Docente do curso de Engenharia Química do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Lages; carina.triques@ifsc.edu.br

Quando descartado sem tratamento adequado, esse corante pode provocar irritações na pele, nos olhos e no trato gastrointestinal, além de apresentar potencial tóxico para organismos aquáticos (Lu et al., 2019). O processo de tingimento têxtil caracteriza-se por elevado consumo de água, podendo demandar dezenas de litros por quilograma de tecido processado, o que contribui para a geração de grandes volumes de efluentes contendo corantes e outros compostos químicos (Kant, 2012).

Apesar de ser um recurso natural renovável, apenas 0,03% das reservas de água estão disponíveis para o consumo. Além disso, com o aumento populacional, tende-se a consumir mais água, aumentando a preocupação com este recurso. Neste sentido, faz-se necessário um tratamento para as águas contaminadas provenientes das indústrias têxteis e a adsorção pode ser uma opção vantajosa, ajudando na remoção de compostos indesejados e na melhora da qualidade (Schmitt, 2011).

A adsorção é uma operação de transferência de massa, em que é avaliada a capacidade de diversos sólidos, chamados adsorventes, em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos, chamados adsorvatos, possibilitando a separação destes componentes. A adsorção é um dos processos mais eficientes no tratamento de água, utilizado para a diminuição dos compostos que sejam prejudiciais para o meio ambiente (Nascimento, 2020), além de ter vantagens relacionadas ao seu custo inicial, flexibilidade e simplicidade de projeto, facilidade de operação e insensibilidade à toxicidade dos poluentes (Meili et al., 2019).

Para que o processo de adsorção seja eficaz, tem-se uma série de requisitos com relação à escolha do adsorvente. Dentre os requisitos, tem-se a área superficial, capacidade de adsorção, porosidade e afinidade com o adsorvato presente na solução. Além disso, é importante que o material seja amplamente disponível, resultando em baixo custo (Crini, 2006).

Resíduos agrícolas, em geral, possuem baixo valor econômico e, muitas vezes, representam um problema na hora do descarte. Por isso, estudos de adsorção com esses materiais são frequentes para que se possa agregar valor a estes resíduos e promover a economia circular. A utilização de resíduos como palha de milho (He et al., 2023), casca de alho (Wang et al., 2025) ou até mesmo casca de pinhão (Eroglu et al., 2025), se torna interessante pois seu preço é relativamente baixo e todos possuem uma ampla afinidade com corantes.

Na busca por um resíduo industrial, é importante que ele seja de relevância regional e abundante. Neste contexto, Santa Catarina também se destaca na produção do milho, abastecendo a cadeia produtiva de suínos e aves (Epagri, 2023). Com isso, há a geração da palha de milho como resíduo, que proporcionalmente aumenta conforme acontece o aumento produtivo, podendo ser um material interessante para o aproveitamento em estudos de adsorção. Esse material foi avaliado como adsorvente por He et al., (2023) para remover dodecilbenzeno sulfonato de sódio e por Wang et al. (2023) para remover íons de chumbo e cobre de águas residuais. Contudo, ainda percebe-se a necessidade de mais estudos que avaliem o potencial da palha de milho na remoção de azul de metileno.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar o resíduo agroindustrial palha de milho como adsorvente para remover o corante azul de metileno, amplamente utilizado na indústria têxtil, de uma solução sintética. Para

auxiliar na interpretação do processo de adsorção, serão avaliadas as isotermas e a cinética do processo. Enquanto as isotermas prestam informações de dados em diferentes condições, as cinéticas proporcionam dados de taxa de adsorção, performance do material e mecanismos de transferência de massa (Majd *et al.*, 2022).

2 METODOLOGIA

2.1 Preparo e Caracterização do Adsorvente

A palha de milho foi lavada em água corrente e depois submetida à secagem em estufa a 60 °C por 24 horas. Em seguida, foi triturada em um liquidificador para que aumentasse a área de contato com as soluções de corante (Fagundes *et al.*, 2024). Posteriormente, a palha triturada foi peneirada utilizando uma peneira com abertura de 4,8 mm para uma padronização no tamanho do adsorvente.

A caracterização química da palha de milho foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando-se um espectrofotômetro (Shimadzu) equipado com acessório de reflexão total atenuada (ATR). As amostras foram previamente secas e trituradas, sendo os espectros coletados com 32 varreduras na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} com resolução de 4 cm^{-1} . A técnica foi empregada com a finalidade de identificar os principais grupos funcionais presentes no adsorvente e avaliar seu potencial para a adsorção do azul de metileno.

2.2 Preparo das Soluções de Azul de Metileno e Determinação da Concentração de Corante

Preparou-se inicialmente uma solução de azul de metileno na concentração de 25 mg/L (Êxodo Científica). Posteriormente, obtiveram-se as seguintes concentrações através de diluição variando de 10 a 0,1 $\mu\text{g/L}$. Essas soluções tiveram suas absorbâncias aferidas em espectrofotômetro (Biospectro, SP-22) no comprimento de onda de 660 nm conforme Oliveira *et al.* (2013). Posteriormente, os dados de absorbância foram correlacionados com os dados de concentração para obtenção de uma curva de calibração, que obteve coeficiente de correlação de $R^2=0,997$. A partir desta curva de calibração, determinou-se as concentrações iniciais e finais dos ensaios de adsorção.

2.3 Ensaios de Adsorção

Preparou-se 1 L de solução de azul de metileno na concentração de 250 mg/L e a partir desta solução, diluiu-se as concentrações para cada ensaio. Todos os ensaios foram realizados em batelada em erlenmeyers de capacidade total 250 mL contendo 0,25 g de palha de milho e 75 mL da solução de azul de metileno em concentrações previamente definidas e submetidos à agitação constante em incubadora shaker (SP labor, SP-222) a 100 rpm. Os ensaios foram realizados em duplicatas.

O pH é um parâmetro que pode influenciar o processo de adsorção, uma vez

que interfere na interação entre o adsorvente e o adsorvato, podendo afetar a eficiência da remoção do corante (Alfredo *et al.*, 2015). Neste trabalho, a partir de ensaios preliminares, verificou-se que a adsorção no pH original da solução (4,4) (TecnoPON, mPA-210p) foi satisfatória. Dessa forma, não foi avaliada a influência do ajuste de pH, evitando uma etapa extra no processo de remoção do azul de metileno de soluções aquosas.

Após cada intervalo de tempo pré-definido, o conteúdo dos erlenmeyers foi filtrado e o permeado teve sua absorbância aferida para posterior determinação da concentração. Uma fração do azul de metileno permaneceu retida no papel-filtro. Assim, para quantificar a influência dessa retenção, foram realizadas leituras da solução antes e após a filtração, sem ser submetido à adsorção, para finalidade de comparação. A diferença obtida foi considerada nos cálculos finais.

Ao fim de cada ensaio, calculou-se a capacidade de adsorção (Q) utilizando a Equação 1 (Alfredo *et al.*, 2015).

$$Q = \frac{(C_o - C_f).V}{m.10^6} \quad (1)$$

Onde:

Q - Capacidade adsorção do adsorvato (mg/g);

Co - Concentração inicial do adsorvato (µg/L);

Cf - Concentração final do adsorvato (µg/L);

V - Volume da solução (mL);

m - Massa do adsorvente (g);

10⁶ - Conversão de unidade

2.3.1 Estudo Cinético

Os tempos de contato avaliados variaram de 0 a 90 minutos a uma temperatura constante de 30 °C para concentração inicial de corante de 25 mg/L. Posteriormente, os dados foram avaliados com relação aos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, conforme as Equações 2 e 3 (Alfredo *et al.*, 2015), respectivamente.

$$Q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

Onde:

Qt - quantidade adsorvida no tempo t (mg/g);

qe - capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g);

k1 - constante cinética de adsorção (min⁻¹)

t - tempo de contato (min).

$$Q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (3)$$

Onde:

Qt - quantidade adsorvida no tempo t (mg/g);

qe - capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g);

k2 - constante cinética do modelo (g/mg.min)

t - tempo de contato (min);

2.3.2 Estudo de Equilíbrio - Isotermas de adsorção

O estudo do equilíbrio consistiu na realização de três isotermas: 20, 30 e 40 °C. Para isso, variou-se as concentrações iniciais de adsorvato de 1 a 200 mg/L com 0,25 g de adsorvente para 75 mL de solução e cada ensaio permaneceu por 24 horas na incubadora Shaker (SP labor, SP-222).

Os dados experimentais obtidos no estudo de equilíbrio foram ajustados aos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich, com o objetivo de avaliar o comportamento da adsorção do azul de metileno pela palha de milho. Para o modelo de Langmuir utilizou-se a Equação 4 (Langmuir, 1918), enquanto para o modelo de Freundlich utilizou-se a Equação 5 (Freundlich, 1906).

$$Q_e = Q_{max} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

Onde:

Q_e - Capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g)

Q_{max} - Capacidade máxima de adsorção do adsorvato (mg/g)

K_L - Constante de Langmuir (L/mg)

C_e - Concentração quando o adsorvato atinge o equilíbrio (mg/L)

O parâmetro K_L está relacionado à afinidade do adsorvato pela superfície do adsorvente, valores elevados indicam maior interação entre adsorvato e adsorvente, favorecendo o processo de adsorção, enquanto valores baixos sugerem menor afinidade (Sousa Neto, 2012). Já o Q_{max} , indica a capacidade máxima de adsorção do adsorvente, representando a quantidade máxima que pode ser adsorvida pelos sítios disponíveis; quanto maior o Q_{max} , maior é a quantidade de sítios disponíveis, quanto menor o Q_{max} , menor é a quantidade de sítios disponíveis (Sousa Neto, 2012).

$$Q_e = k_f (C_e)^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

Onde:

Q_e - Capacidade máxima de adsorção no equilíbrio (mg/g);

k_f - Constante de Freundlich ((mg/g)(L/mg)^{1/p});

C_e - Concentração no equilíbrio (mg/L);

$1/p$ - Coeficiente de afinidade;

$1/p$ está relacionado a capacidade de adsorção do sólido, indicando se o processo é favorável ou não favorável. Valores de p acima de 1, indicam processos favoráveis. Se o valor de p for negativo, tem-se indicativo de que o solvente tem mais afinidade pelo adsorvente que o adsorvato. O valor de p entre 0 e 1 indica uma adsorção não favorável (Santana, 2018).

2.3.3 Estudo de favorabilidade do processo

Para verificar se o processo de adsorção do azul de metileno em palha de

milho é favorável, foi calculado o fator de separação de equilíbrio (RL), um parâmetro utilizado para verificar quanto o processo de adsorção é favorável. Esse fator é determinado pela Equação 6 (Hall et al., 1966).

$$RL = \frac{1}{(1+K_L.C_o)} \quad (6)$$

Onde:

RL - fator de separação de equilíbrio;

K_L - Constante de Langmuir (L/mg);

C_o - Concentração inicial (mg/L);

O parâmetro RL possui uma faixa de operação para identificar se foi favorável, desfavorável ou linear. RL maior que 1, indica um processo desfavorável, RL igual a 1 indica uma adsorção linear, RL entre 0 e 1 indica uma adsorção favorável (Hall et al., 1966).

2.4 Tratamento dos Dados

Os dados experimentais obtidos nos ensaios de adsorção foram tratados e analisados com o software Origin, utilizado para construção dos gráficos, e obtenção dos dados necessários para a avaliação de cada isoterma. Utilizando o software, foi possível determinar o coeficiente de correlação R^2 e os parâmetros ajustados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

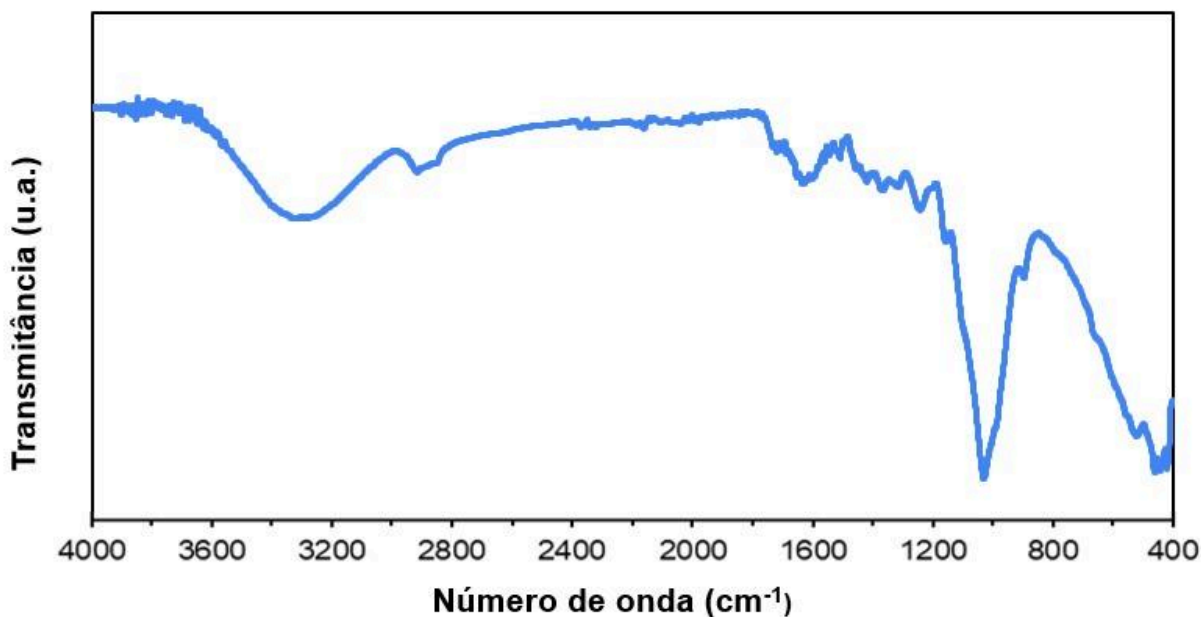
A avaliação do processo de adsorção foi realizada por meio de estudos de cinética e equilíbrio, visando compreender o comportamento da remoção do azul de metileno utilizando a palha de milho como adsorvente. Inicialmente, o adsorvente foi caracterizado por Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier. Em seguida, os dados cinéticos foram analisados pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. Então, os dados de equilíbrio foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich nas temperaturas de 20, 30 e 40 °C. Também, com os valores ajustados de Langmuir, foi possível avaliar a espontaneidade do processo pelo cálculo de energia livre de Gibbs. Dessa forma, foi possível avaliar a capacidade de adsorção do material, a influência da temperatura e a interação entre adsorvato e adsorvente.

3.1 FTIR (Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier)

O FTIR é uma técnica analítica utilizada para a identificação de grupos funcionais presentes nos materiais, permitindo avaliar sua composição química e correlacionar com o processo de adsorção, uma vez que este processo ocorre devido à presença de grupos funcionais (Da Silva *et al.*, 2022; Honorato *et al.*, 2015). Neste trabalho, o FTIR foi utilizado para analisar a palha de milho antes e após o processo de adsorção, no entanto, os espectros obtidos foram praticamente idênticos, apresentando sobreposição dos picos, o que indica que não foram

observadas diferenças significativas entre as amostras. Dessa forma, apresentou-se apenas o espectro obtido para a palha de milho antes da adsorção.

Figura 1 - FTIR da palha de milho utilizada no processo de adsorção na condição de comprimento de onda de 4000 a 400 cm^{-1} .



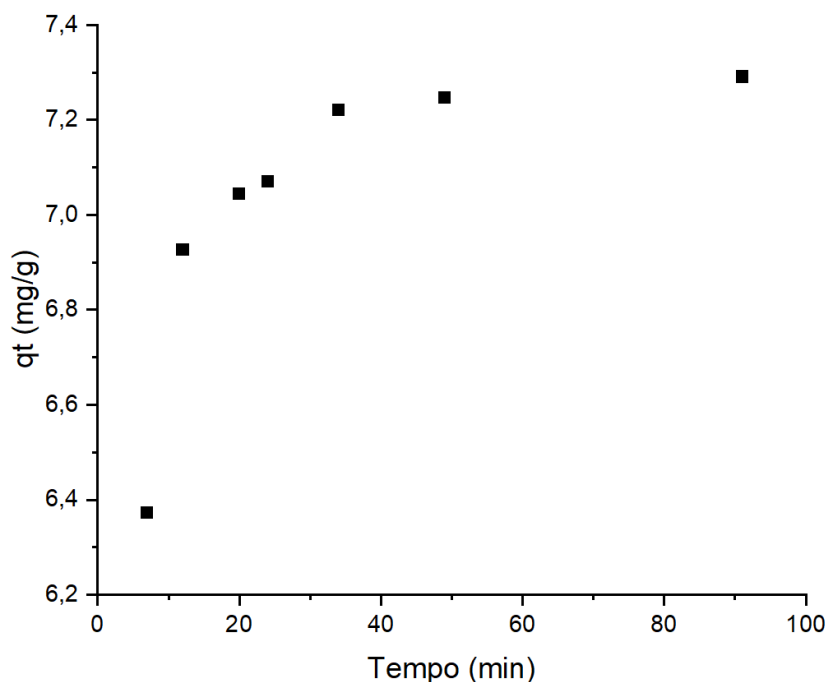
Fonte: Autoral

A comparação do espectro FTIR obtido neste trabalho com aqueles reportados para a palha de milho na literatura demonstra boa concordância quanto à presença dos principais grupos funcionais. Segundo Honorato *et al.* (2015) e Nascimento *et al.* (2019), são observadas bandas características associadas ao estiramento da ligação O–H na região próxima a 3250 cm^{-1} , ao alongamento vibracional da ligação C–H em torno de 2900 cm^{-1} . Também são identificadas absorções na faixa de 1700 a 1100 cm^{-1} , atribuídas principalmente aos estiramentos das ligações C–O. De acordo com esses autores, a presença de grupos funcionais como hidroxilas (3400 cm^{-1}), carbonilas (1400 e 1150 cm^{-1}) e ácidos carboxílicos (1020 cm^{-1}) favorece a interação entre o adsorvente e o corante, indicando o potencial da palha de milho para processos de adsorção de azul de metileno (Honorato *et al.*, 2015; Nascimento *et al.*, 2019).

3.2 Cinética de adsorção

A cinética de adsorção foi utilizada para a compreensão do comportamento da adsorção do azul de metileno em contato com a palha de milho ao longo do tempo. A Figura 5 apresenta os dados de quantidade adsorvida (qt) pelo tempo de contato da solução de azul de metileno com o adsorvente palha de milho.

Figura 2 – Ensaio cinético de adsorção do azul de metileno utilizando a palha de milho como adsorvente realizado na temperatura de 30 °C. Condições: 100 rpm; 0,25 g de adsorvente; 75 mL de solução; 30 °C.



Fonte: Autoral

Com base na Figura 2, observa-se um rápido aumento da capacidade de adsorção nos minutos iniciais, seguida de estabilização. Atingida a estabilização, nota-se uma capacidade de adsorção de 7,29 mg/g em aproximadamente 90 minutos. Esse comportamento indica que os sítios ativos disponíveis foram ocupados mais rapidamente no início da adsorção, visto que, em 45 minutos, a capacidade de adsorção já atingia 7,24 mg/g.

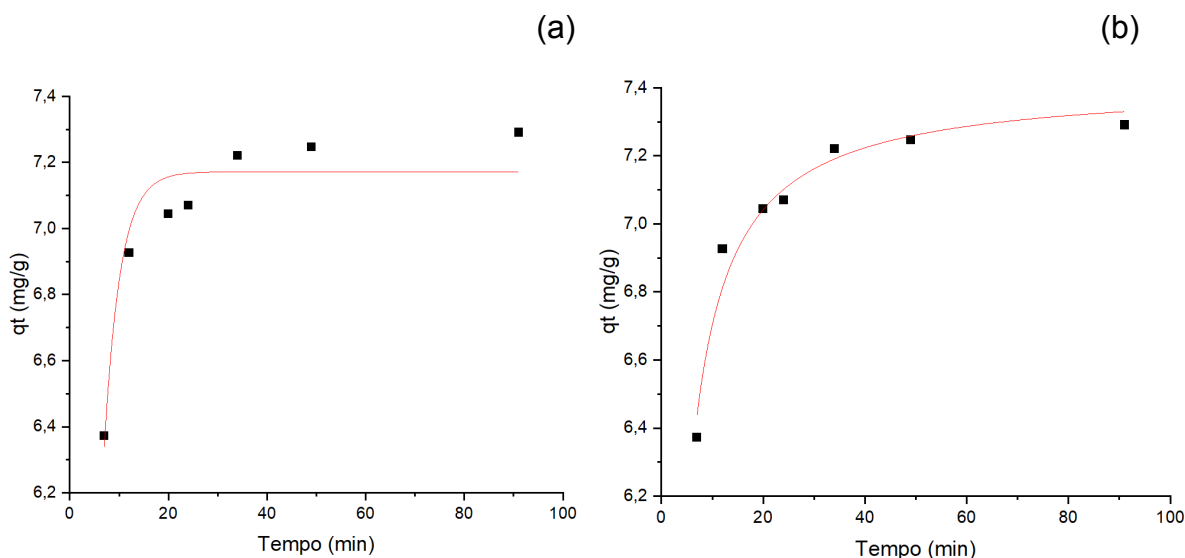
A palha do milho contém, inicialmente, mais sítios ativos disponíveis para a adsorção do azul de metileno, fazendo com que a taxa nos tempos iniciais seja alta devido à existência de gradientes de concentração maiores entre o adsorvato na solução e na superfície do adsorvente (Uddin *et al.*, 2009). Conforme a adsorção acontece e o azul de metileno ocupa a superfície do adsorvente, há menos sítios disponíveis, reduzindo, então, a taxa de adsorção com o tempo (Uddin *et al.*, 2009).

3.2.1 Pseudo-primeira ordem e Pseudo-segunda ordem

O modelo cinético de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem são utilizados para determinar a velocidade da ocupação dos sítios ativos ao longo do tempo (Alfredo *et al.*, 2015). Utilizando as Equações 2 e 3, ajustou-se os modelos aos dados experimentais e, na Tabela 1, estão apresentados os valores dos parâmetros de pseudo-primeira e segunda ordem, bem como os coeficientes de

determinação (R^2).

Figura 3 - Cinética de adsorção de azul de metileno em palha de milho ajustados aos modelos cinéticos (a) de pseudo-primeira ordem; e de (b) pseudo-segunda ordem para a taxa de ocupação dos sítios ao longo do tempo.



Fonte: Autoral

Tabela 1 - Parâmetros ajustados dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para a adsorção de azul de metileno em palha de milho.

Pseudo-primeira ordem			Pseudo-Segunda ordem		
R^2	k_1 (min^{-1})	Q_e (mg/g)	R^2	k_2 ($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$)	Q_e (mg/g)
0,91646	$0,31 \pm 0,02$	$7,17 \pm 0,04$	0,96506	$0,13 \pm 0,01$	$7,42 \pm 0,04$

Fonte: Autoral

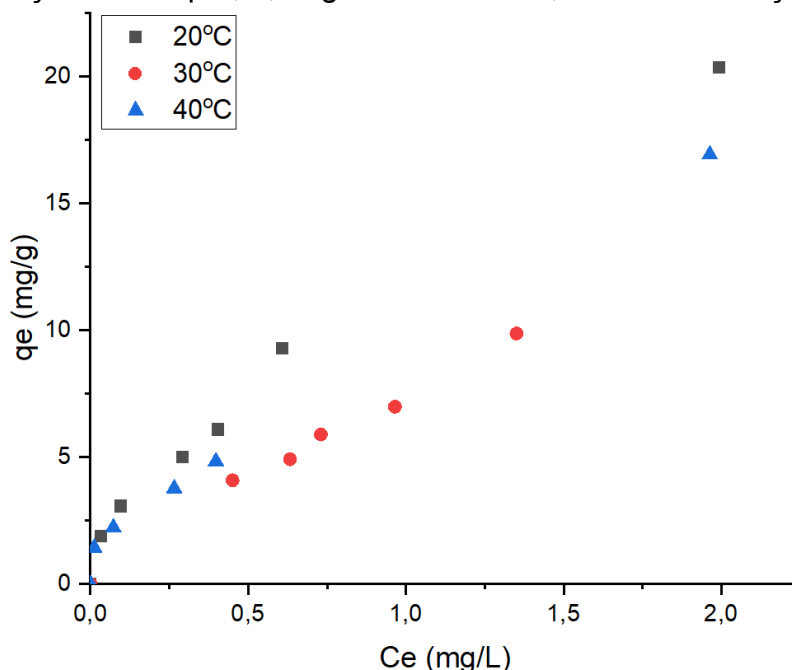
Com relação ao ajuste dos modelos, para o modelo de pseudo-primeira ordem, percebe-se que a curva não se adequou totalmente, apresentando um R^2 de 0,91373, enquanto no de pseudo-segunda ordem teve um R^2 de 0,97101, indicando que nesse processo prático o modelo de segunda-ordem é mais indicado. Outro indicativo de bom ajuste seria a proximidade dos valores de Q_e obtidos experimentalmente e pelo ajuste. Neste estudo, como os valores de Q_e foram semelhantes entre os dois modelos, logo, este parâmetro não pode ser utilizado para fins comparativos.

3.3 Isoterma experimental

Os dados obtidos no estudo das isotermas a 20, 30 e 40 °C encontram-se na Figura 4, que relaciona a capacidade de adsorção no equilíbrio (Q_e) pela

concentração no equilíbrio (C_e). O tempo de adsorção foi de 24 horas, suficiente para atingir o tempo de equilíbrio.

Figura 4 – Isotermas de adsorção experimental do azul de metileno em palha de milho. Condições: 100 rpm; 0,25 g de adsorvente; 75 mL de solução; 24 horas.



Fonte: Autoral

Da Figura 4, observa-se que conforme ocorre o aumento da concentração de equilíbrio, há um aumento da capacidade de adsorção, o que indica uma maior ocupação dos sítios ativos disponíveis no adsorvente. Ainda, o aumento contínuo de Q_e mostra uma boa interação entre o azul de metileno e a superfície da palha de milho, o que mostra um potencial do adsorvente para a remoção do corante, demonstrando um perfil favorável. Esse comportamento sugere que o processo de adsorção ocorre de maneira eficiente, favorecendo a remoção do corante da solução (Silva et al., 2015).

Nota-se também que a temperatura influenciou o processo adsorptivo, sendo os melhores resultados obtidos a 20 °C, seguido da isoterma a 40 °C e depois 30 °C. Esse comportamento não está coerente com o esperado, uma vez que os resultados obtidos seguiram a ordem de 20 °C como a melhor, 40 °C como a intermediária e 30 °C a pior, enquanto o esperado seria que a temperatura de 30 °C apresentasse comportamento intermediário entre as demais. Uma possível explicação para essa divergência está relacionada à ausência de padronização completa da palha de milho utilizada como adsorvente. Apesar do material ter sido triturado e peneirado, o tamanho da peneira disponível não foi adequado, fazendo com que não houvesse heterogeneidade no tamanho das partículas. Considerando que os experimentos a 30 °C foram os primeiros a serem realizados apesar de duplicata, existe a possibilidade de terem sido utilizadas partículas maiores em comparação às outras temperaturas experimentais, o que pode ter influenciado os resultados obtidos. Dessa forma, sugere-se como trabalhos futuros uma melhor padronização dos

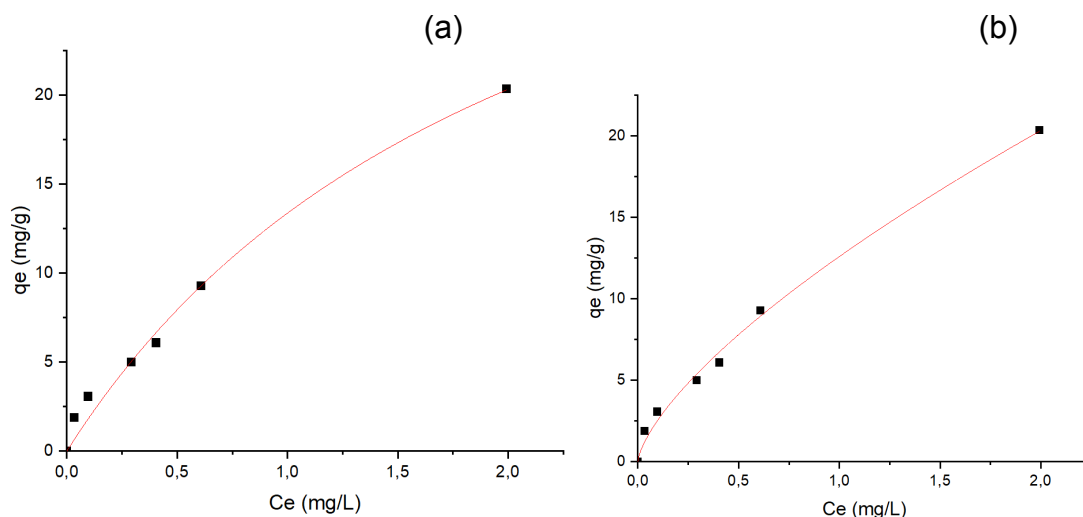
tamanhos, além de repetição do estudo de equilíbrio. Contudo, ressalta-se que, mesmo que houve essa incoerência, ainda foi possível observar um comportamento favorável de adsorção.

3.3.1 Ajuste dos dados aos modelos de Langmuir e Freundlich

Os dados de equilíbrio foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich apresentados anteriormente (Equações 4 e 5). O modelo de Langmuir assume que a superfície do adsorvente é homogênea, energeticamente equivalente, com número finito de sítios ativos, formando uma monocamada de adsorção. Já o modelo de Freundlich considera uma superfície heterogênea de multicamada, com distribuição de energia não uniforme, assim a capacidade de adsorção não prevê uma saturação definida da superfície (Sousa Neto, 2012). Os dados experimentais e as curvas ajustadas encontram-se nas Figuras 5, 6 e 7 em suas respectivas temperaturas, e, na Tabela 2, estão apresentados os valores dos parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich, bem como os coeficientes de determinação (R^2).

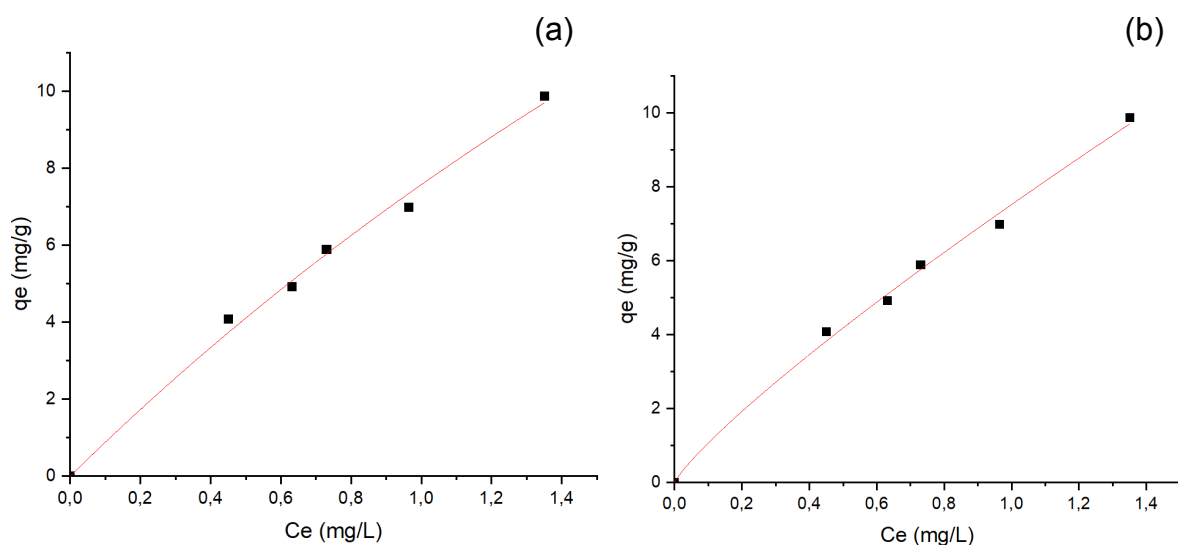
Os gráficos apresentaram um bom ajuste aos modelos nas temperaturas estudadas, obtendo R^2 que variaram de 0,98380 até 0,99552. Logo, os modelos demonstraram de forma satisfatória o comportamento da adsorção do azul de metileno usando a palha de milho. Dentre os modelos, o de Freundlich representou melhor os dados por apresentar valores de R^2 ligeiramente superiores, indicando uma superfície heterogênea do material adsorvente.

Figura 5 – Isoterma de adsorção de azul de metileno em palha de milho realizada na temperatura de 20 °C com os modelos ajustados de (a) Langmuir; e (b) Freundlich. Condições: 100 rpm; 0,25 g de adsorvente; 75 mL de solução; 24 horas.



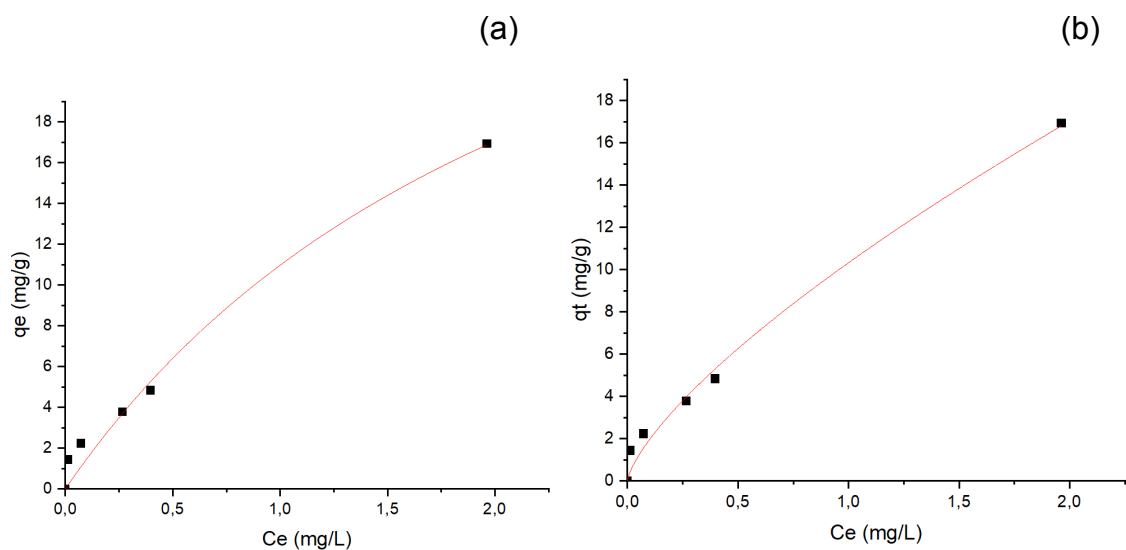
Fonte: Autoral (2026)

Figura 6 – Isoterma de adsorção de azul de metileno em palha de milho realizada na temperatura de 30 °C com os modelos ajustados de (a) Langmuir; e (b) Freundlich. Condições: 100 rpm; 0,25 g de adsorvente; 75 mL de solução; 24 horas.



Fonte: Autoral (2026)

Figura 7 – Isoterma de adsorção de azul de metileno em palha de milho realizada na temperatura de 40 °C com os modelos ajustados de (a) Langmuir; e (b) Freundlich. Condições: 100 rpm; 0,25 g de adsorvente; 75 mL de solução; 24 horas.



Fonte: Autoral

Tabela 2 - Comparação dos parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich nas temperaturas avaliadas.

Temp. (°C)	Langmuir			Freundlich		
	R ²	K _L (L/mg)	Q _{max} (mg/g)	R ²	K _f (mg/g)(L/mg) ^{1/p}	p
20	0,98758	0,46 ± 0,12	42,39 ± 6,72	0,99476	12,59 ± 0,30	1,45 ± 0,06
30	0,99398	0,18 ± 0,08	48,65 ± 18,86	0,99552	7,52 ± 0,12	1,18 ± 0,07
40	0,98380	0,40 ± 0,18	38,29 ± 10,42	0,99080	10,33 ± 0,44	1,39 ± 0,11

Fonte: Autoral

Com relação aos parâmetros ajustados, K_f está relacionado com a capacidade de adsorção do adsorvente no modelo de Freundlich, indicando a afinidade entre o adsorvato e a superfície do material adsorvente (Sousa Neto, 2012), enquanto p indica a capacidade de adsorção do sólido. Como os valores ficaram na faixa de 1,18 até 1,45, eles indicam um processo de adsorção favorável (Santana, 2018).

O K_L, ajustado pela isoterma de Langmuir, indica afinidade do adsorvato e adsorvente. Os valores obtidos na faixa de 0,18 a 0,46 são variáveis na literatura, que reporta valores desde 0,01 L/mg (Wang et al., 2020) até 18,85 L/mg (Hasani et al., 2022), ambos para adsorção de azul de metileno.

Já o parâmetro Q_{max} indica a capacidade de adsorção e é um parâmetro útil para comparação entre adsorventes, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação de Q_{max} em diferentes estudos de adsorção utilizando resíduos para remoção de azul de metileno.

Adsorvente	Q _{max} (mg/g)	Referências
Casca de coco	62,5	Sousa Neto, 2012
Casca de batata	49	Alfredo et al., 2015
Casca de arroz	13,5	Labaran et al., 2019
Serragem de noz	59	Wafwo et al., 2009
Resíduo agrícola de	167	Holliday et al., 2024

ervilha		
Bagaço de azeitona	42,3	Banat <i>et al.</i> , 2007
Resíduo de chá	113,15	Liu <i>et al.</i> , 2018
Casca de avelã	38,22	Dogan; Alkan, 2008
Casca de amendoim	68,03	Gong <i>et al.</i> , 2005
Palha de milho	48,65	Presente estudo

Fonte: Autoral

A comparação da capacidade máxima de adsorção de diversos adsorventes é para evidenciar a diferença de valores conforme a variação de adsorvente se utiliza.

Entre os adsorventes avaliados, o resíduo agrícola de ervilha apresentou o maior valor de Q_{max} , com 167 mg/g (Holliday *et al.*, 2024), seguida pelo resíduo de chá com 113,15 mg/g (Liu *et al.*, 2018). Em contrapartida, a casca de arroz apresentou uma das menores capacidades de adsorção, com 13,5 mg/g (Labaran *et al.*, 2019). Alguns materiais apresentaram valores próximos, como a casca de batata e o bagaço de azeitona, com 49 e 42,3 mg/g respectivamente.

A palha de milho se comporta como um resíduo de eficiência de adsorção intermediário na remoção do azul de metileno, já que seu melhor resultado ficou em aproximadamente 49 mg/g. Entretanto, ela pode ser ainda mais destacada pela sua facilidade na coleta e preparo para uso.

3.3.2 Favorabilidade do processo

Utilizando a Equação 6, foi possível determinar os valores do fator de separação no equilíbrio (RL), com o objetivo de avaliar o quão favorável é o processo de adsorção. com base nos valores apresentados na Tabela 2 para a constante de Langmuir K_L , calcularam-se os valores de RL para cada temperatura, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Fator de separação RL conforme a variação da temperatura.

Temperatura (°C)	K_L (L/mg)	RL
20	0,46	0,02
30	0,18	0,1
40	0,40	0,02

Os valores obtidos para o fator de separação ficaram na faixa de 0 a 1, isso indica uma adsorção favorável e, ainda, pelos valores baixos, evidencia uma elevada afinidade entre adsorvente e adsorvato (Hall *et al.*, 1966).

4 CONCLUSÕES

A palha de milho apresenta potencial para ser utilizada como adsorvente na remoção do corante azul de metileno em solução aquosa, configurando-se como uma alternativa de baixo custo para o aproveitamento de resíduos agroindustriais. A análise por FTIR evidencia a presença de grupos funcionais característicos de materiais lignocelulósicos, como hidroxilas, carbonilas e carboxilas, que contribuem para a interação entre o adsorvente e o corante durante o processo de adsorção. Os resultados cinéticos mostram que a adsorção ocorre de forma rápida nos instantes iniciais, atingindo o equilíbrio em aproximadamente 90 minutos, o melhor ajuste foi o modelo de pseudo-segunda ordem que indica a quantidade de sítios de adsorção disponíveis. Os modelos de Langmuir e Freundlich descrevem adequadamente os dados de equilíbrio obtidos, sendo o modelo de Freundlich o que apresenta os melhores ajustes. Esse resultado indica que a adsorção ocorre em uma superfície heterogênea. Além disso, os valores do parâmetro p indicam que o processo é favorável nas temperaturas avaliadas. Quando comparada a outros resíduos reportados na literatura, a palha de milho apresenta capacidade adsorptiva intermediária, demonstrando desempenho compatível com diversos materiais utilizados para a remoção de azul de metileno. A temperatura influencia o processo de adsorção, embora os resultados não apresentem uma tendência claramente definida entre as condições estudadas. Ainda assim, a palha de milho mantém sua capacidade de remoção do corante em todas as temperaturas avaliadas, demonstrando boa aplicação. Com base no fator de separação, confirma-se que o processo de adsorção foi favorável. Essa conclusão é corroborada não apenas pelo valor obtido para esse parâmetro, mas também pelos demais resultados experimentais, que demonstram a eficiência da adsorção nas condições avaliadas.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a palha de milho possui potencial para aplicação como adsorvente na remoção de azul de metileno, apresentando desempenho satisfatório e características compatíveis com outros materiais na literatura. Além disso, sua utilização contribui para a valorização de resíduos agroindustriais, agregando valor a um material amplamente disponível e de baixo custo. Dessa forma, a palha de milho mostra-se promissora para aplicações ambientais, podendo ser objeto de estudos futuros voltados à otimização de suas propriedades adsorptivas e à avaliação de seu desempenho em sistemas reais de tratamento de efluentes.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Bonaterra pela disponibilização da palha de milho utilizada na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALFREDO, A. P. C.; GONÇALVES, G. C.; LOBO, V. S.; MONTANHER, S. F.
Adsorção de azul de metileno em casca de batata utilizando sistemas em batelada e

coluna de leito fixo. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 1909-1920, 2015.

AL-GHOUTI, Mohammad A.; AL-ABSI, Rana S. Mechanistic understanding of the adsorption and thermodynamic aspects of cationic methylene blue dye onto cellulosic olive stones biomass from wastewater. **Nature Publishing Group Scientific Reports**, [S.l.], v. 10, n. 15928, p. 1–18, 2020.

BANAT, F. A.; AL-ASHEH, S. R.; AL-HMAD, F. B. Niihalil, Bench-scale and packed bed sorption of methylene blue using treated olive pomace and charcoal. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 16, p. 3017–3025, 2007.

CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 9, p. 1061–1085, 2006.

DA SILVA, et al. Comprehensive characterization of industrial wastewaters using EEM fluorescence, FT-IR and ¹H NMR techniques. **Science of The Total Environment**, v. 805, 2022.

DOGAN, M.; ALKAN, M. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by hazelnut shells: equilibrium, parameters and isotherms. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 192, n. 1–4, p. 141–153, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA (EPAGRI). **Santa Catarina pode produzir 1 milhão de toneladas de milho a mais sem ampliar a área plantada. 2023**. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/balancosocial/2023/Santa-Catarina-pode-produzir-1-milhao-de-toneladas-de-milho-a-mais-sem-ampliar-a-area-plantada.html>. Acesso em: 3 maio 2026.

EROĞLU, Handan Atalay; KADIOĞLU, Elif Nihan; AKBAL, Feryal. High-efficiency removal of Rhodamine B using modified biochar from agricultural waste pine nut shell: investigation of kinetics, isotherms, and artificial neural network modeling. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, p. 12137–12150, 2025.

FAGUNDES, A. C. et al. Application of Corn Straw, an Agro-Waste, to Remove Dyes in an Aqueous Medium, Producing Blue or Red Fibers. **Processes**, v. 12, n. 4, 694, 2024.

FREUNDLICH, H. M. F. Über die Adsorption in Lösungen. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**, v. 57, p. 385–470, 1906. DOI: 10.1515/zpch-1907-5723.

GONG, R.; LI, M.; YANG, C.; SUN, Y.; CHEN, J. Removal of cationic dyes from aqueous solution by adsorption on peanut hull. **Journal of Hazardous Materials**, v. 121, n. 1–3, p. 247–250, 2005.

HASANI, N.; SELIMI, T.; MELE, A.; THAÇI, V.; HALILI, J.; BERISHA, A.; SADIKU, M. Theoretical, equilibrium, kinetics and thermodynamic investigations of methylene

blue adsorption onto lignite coal. **Molecules**, Basel, v. 27, n. 6, p. 1856, 2022.

HALL, K. R.; EAGLETON, L. C.; ACRIVOS, A.; VERMEULEN, T. **Pore- and solid-diffusion kinetics in fixed-bed adsorption under constant-pattern conditions**. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 5, n. 2, p. 212–223, 1966.

HE, Zhiqin; LI, Yun; QI, Benkun. A new and low-cost surface-functionalized corn straw adsorbent for adsorptive removal of sodium dodecylbenzene sulfonate: Adsorbent preparation and adsorption performance. **Separation and Purification Technology**, v. 309, 122999, 2023.

HOLLIDAY, Mathew C.; PARSONS, Daniel R.; ZEIN, Sharif H. Agricultural pea waste as a low-cost pollutant biosorbent for methylene blue removal: adsorption kinetics, isotherm and thermodynamic studies. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, p. 6671–6685, 2024. DOI: 10.1007/s13399-022-02865-8.

HONORATO, A. C.; MACHADO, J. M.; CELANTE, G.; BORGES, W. G. P.; DRAGUNSKI, D. C.; CAETANO, J. Biosorption of methylene blue using agro-industrial residues. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 7, p. 705–710, 2015.

KANT, R. Textile dyeing industry an environmental hazard. **Natural Science**, v. 4, n. 1, p. 22–26, 2012.

LABARAN, A. N.; ZANGO, Z. U.; ARMAYA'U, U.; GARBA, Z. N. Rice husk as biosorbent for the adsorption of methylene blue. **Science World Journal**, v. 14, n. 2, p. 65–69, 2019.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361–1403, 1918.

LIU, L.; FAN, S.; LI, Y. Removal behavior of methylene blue from aqueous solution by tea waste: kinetics, isotherms and mechanism. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 7, p. 1321, 2018.

LU, K.; WANG, T.; ZHAI, L.; WU, W.; DONG, S.; GAO, S.; MAO, L. Adsorption behavior and mechanism of Fe-Mn binary oxide nanoparticles: Adsorption of methylene blue. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 539, p. 553–562, 2019.

MAJD, M. M.; KORDZADEH-KERMANI, V.; GHALANDARI, V.; ASKARI, A.; SILLANPÄÄ, M. Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010–2020). **Science of the Total Environment**, v. 812, art. 151334, 2022.

MEILI, L.; LINS, P. V. S.; COSTA, M. T.; ALMEIDA, R. L.; ABUD, A. K. S.; SOLETTI,

J. I.; DOTTO, G. L.; TANABE, E. H.; SELLAOUI, L.; CARVALHO, S. H. V.; ERTO, A. Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, v. 141, p. 60–71, 2019.

NASCIMENTO, Cleuciane Tillvitz do; CARVALHO, Drielly Gama; VIEIRA, Melissa Gurgel Adeodato; SILVA, Edson Antonio da; BORBA, Carlos Eduardo. Estudo da adsorção de carbendazim em biocarvão ativado de palha de milho. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental do IBEAS, 2019. **Anais**. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/II-026.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2026.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020. (Estudos da pós-graduação). Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271>. Acesso em: 03 maio 2026.

NEGÓCIOS SC. **Santa Catarina é líder no setor têxtil no Brasil**. Disponível em: <https://www.negociossc.com.br/noticia/santa-catarina-e-lider-no-setor-textil-no-brasil/>. Acesso em: 03 maio 2026.

OLIVEIRA, S. P.; SILVA, W. L. L.; VIANA, R. R. Avaliação da capacidade de adsorção do corante azul de metileno em soluções aquosas em caulinita natural e intercalada com acetato de potássio. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 338–344, 2013.

SANTANA, Antonio Hamilton. **Remoção de metais pesados utilizando resíduos agroindustriais como biossorventes**. 2018. Dissertação (Mestrado em Química Biológica) – Universidade Regional do Cariri, Crato, 2018. Disponível em: <https://www.urca.br/portal2/wp-content/uploads/sites/38/phocadownload/userupload/Dissertacoes/2018/antonio%20hamilton%20santana.pdf?>. Acesso em: 31 maio 2026.

SCHMITT, Dalila Maria Formentini. **Tratamento de águas residuárias da indústria de laticínios pelos processos combinados coagulação/floculação/adsorção/ultrafiltração utilizando semente de Moringa oleífera como coagulante**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2011.

SILVA, T. L. et al. Biossorção de azul de metileno utilizando resíduos agroindustriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 7, p. 705-710, 2015.

SOUSA NETO, Vicente de Oliveira. **Modificação química da casca do coco bruto (Cocos nucifera) para remoção de Cu(II) de efluente sintético e industrial: estudo de isoterma de adsorção, cinética e coluna de leito fixo**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4428/1/2012_tese_vosousaneto.pdf. Acesso

em: 31 maio 2026.

UDDIN, M. T.; ISLAM, M. A.; MAHMUD, S.; RUKANUZZAMAN, M. Adsorptive removal of methylene blue by tea waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 1, p. 53–60, 2009.

WAFWO, O. M.; MAMBOLEO, J.; HAZARD, M. Adsorption equilibrium studies using mansonina wood sawdust as biosorbents. **Desalination and Water Treatment**, v. 3, p. 2091–2110, 2009.

WANDERLEY, Isabela Felix et al. Avaliação da capacidade de adsorção de adsorventes em efluente com azul de metileno. SEMPESq - Semana de Pesquisa da Unit - Alagoas, 2019. **Anais eletrônicos**. Disponível em: https://eventos.set.edu.br/al_sempesq/article/view/12480. Acesso em: 12 maio 2026.

WANG, Dongchenyi; ZHU, Laiying; LIU, Xiao; ZENG, Zihan; LIU, Shenli; CAI, Jinjun. Melamine-assisted hierarchical nitrogen-doped biochar from garlic peel hydrochar as efficient adsorbent for tetracycline removal. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 716, 136726, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136726>. Acesso em: 12 maio 2026.

WANG, Xiang et al. Adsorption of Pb²⁺ and Cu²⁺ in wastewater by lignosulfonate adsorbent prepared from corn straw. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 247, p. 125820, 2023.

WANG, Y. et al. One-step fabrication of carbonaceous adsorbent from corncob for enhancing adsorption capability of methylene blue removal. **Scientific Reports**, v. 10, 12515, 2020.