UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

HELOYSE REGES CHAVES

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CASCA DE ABACAXI COMO BIOADSORVENTE PARA REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO: ESTUDOS CINÉTICOS E ISOTÉRMICOS

CAMPINA GRANDE - PB

2026

HELOYSE REGES CHAVES

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CASCA DE ABACAXI COMO BIOADSORVENTE PARA REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO: ESTUDOS CINÉTICOS E ISOTÉRMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Química, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do grau de bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Meiry Gláucia Freire Rodrigues

CAMPINA GRANDE - PB

2026

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Sistema de Bibliotecas - SISTEMOTECA
Catalogação de Publicação na Fonte. UFCG - Biblioteca Central

C512v Chaves, Heloyse Reges.

Valorização de resíduos de casca de abacaxi como bioadsorvente para remoção de azul de metileno: estudos cinéticos e isotérmicos / Heloyse Reges Chaves. – 2026.

47 f. : il. color.

Monografia (bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2026.

"Orientação: Profa. Dra. Meiry Gláucia Freire Rodrigues".

Referências.

1. Resíduo Agroindustrial. 2. Casca de abacaxi. 3. Tratamento de Efluentes Têxteis. 4. Azul de Metileno. 5. Adsorção. 6. Biomassa do Abacaxi. I. Rodrigues, Meiry Gláucia Freire. II. Título.

UFCG/PB

CDU 628.3.034.2(04)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MEIRE EMANUELA DA SILVA MELO CRB-15/568

HELOYSE REGES CHAVES

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CASCA DE ABACAXI COMO BIOADSORVENTE PARA REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO: ESTUDOS CINÉTICOS E ISOTÉRMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Química, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do grau de bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Meiry Gláucia Freire Rodrigues

BANCA EXAMINADORA

_____

Dr.ª Meiry Gláucia Freire Rodrigues (UAEQ/CCT/UFCG)
Orientadora

_____

Dr. Vimário Simões Silva (UAEQ/CCT/UFCG)
Examinador 1

_____

Dr. Laércio Gomes de Oliveira (UAEQ/CCT/UFCG)
Examinador 2

_____

Dr.ª Larissa Fernandes Maia (UAEQ/CCT/UFCG)
Examinador 3

Aos corações que pulsaram junto ao meu nessa jornada. À minha mãe pelos imensuráveis esforços em toda a vida. À minha avó por todo amor dedicado.

AGRADECIMENTOS

Aprendi com uma grande doutora da Igreja Católica que Deus não nos inspira desejos irrealizáveis e, assim, com este conforto que vem se tornando uma certeza, O rendo infinitas graças por ter sido meu sustento na realização desse sonho que Ele plantou tão cedo. A trajetória de um curso superior é, sem dúvidas, desafiadora e sei que somente a total entrega e confiança nos planos do Senhor me trouxeram até aqui. Agradeço pela intercessão sempre presente da Virgem Santíssima, que me trouxe acalento e discernimento em tantos momentos de deserto.

A pessoa que sou hoje foi construída através de muitas mãos firmes, mas não há sombra de dúvidas de que minha mãe, Socorro Reges, sempre foi e será meu maior alicerce e minha maior incentivadora. Obrigada por ter apoiado todos os meus anseios, mesmo sem entendê-los por tantas vezes. Obrigada por ter acreditado em mim quando eu não consegui acreditar, por ter renunciado tanto de si para que eu pudesse seguir novos caminhos. Só nós sabemos o porquê de estarmos aqui. Tudo que sou e tenho, é graças a você.

À minha avó, Nenzinha Reges, que sempre demonstrou tanto orgulho e me dedicou tanto amor. Por todas as vezes que, debaixo de chuva ou de sol, me colocou nos braços para que eu pudesse ir mais longe. Quando a vontade de desistir queria tomar de conta, foi pensando na senhora que levantei e apressei os passos até este momento. Não importa o que eu conquiste, ser “menina criada por vó” é o título que carrego com mais honra.

Ao meu pai, Hélio Chaves, por me lembrar constantemente pelo que luto e por nunca permitir que eu esquecesse o valor dos meus sonhos. O seu jeito, com suas palavras de incentivo, desde o tempo de escola, sempre foram uma fonte de força e motivação nos momentos de dúvida. Seu apoio incondicional às minhas decisões sobre minha vida profissional e o seu nítido desejo de me ver criar asas para voar foram fundamentais para que eu tivesse coragem de seguir.

Ao meu irmão, meu Emanuel, por me enxergar com tanto carinho, humanidade e cuidado. Obrigada por fazer questão de me entender, por ser atento e interessado ao que tenho para falar e por seus olhos que sempre brilham nas nossas conversas mais genuínas. O que estou vivendo e construindo hoje, é para que você também possa desfrutar no futuro. Certa vez li a seguinte frase: “Não desista, tem alguém se inspirando em você”; nas inúmeras vezes que você demonstrou que me tinha como exemplo, saiba que você quem me inspirou.

À minha família, que me deu apoio a todo instante. Agradeço pelas demonstrações de amor e por sempre exaltarem meu potencial, nos quatro cantos do mundo. Sou muito abençoada por ter vocês.

Agradeço de forma muito especial e respeitosa à minha orientadora, Prof.ª Dr.ª Meiry Gláucia Freire Rodrigues, pela orientação, paciência e pela oportunidade de voltar a ser sua aluna. Obrigada por dedicar tempo para me ouvir, por ter deixado abertas as portas do LABNOV e pela confiança que sempre manifestou em mim. Sou grata pela evolução que sua orientação, de vida e de academia, me proporcionou.

Aos professores Laércio e Vimário, que são nosso refúgio dentro da universidade. O ambiente acadêmico, por vezes, pode ser duro e em vocês sempre consegui encontrar compreensão, ouvidos atentos, abraços de conforto e corações gigantes. Obrigada por me considerarem para além da sala de aula. As orientações, as conversas e as fofoquinhas com vocês fizeram esse departamento ser meu lar em muitos dias difíceis. Vocês me formaram como profissional e como gente!

Ao grupo mais improvável, aos que escolhi como minha família nesses últimos anos: Fernanda, Ian e Raquel. Vocês sabem que nada do eu escreva aqui será capaz de representar o que vocês significam na minha jornada. Tudo que vivemos está marcado em mim para sempre, desde as incontáveis horas de trabalho até nossas escapadinhas no posto no meio do dia. Vocês serão eternamente a lembrança mais linda do meu tempo de universidade.

Fernanda, você é meu grande presente nessa loucura toda. Em 2017 eu jamais acreditaria se me contassem tudo que viveríamos juntas. Obrigada por fazer o silêncio ser confortável ao seu lado, por suportar meu barulho, por me entender sem que eu precise falar e por segurar minha mão de forma única todos os dias. Obrigada por acreditar em mim e por muitas vezes ter me lembrado de pôr os pés no chão. Com você aprendi que caminhar junto é mais do que dividir o caminho; é compartilhar os sonhos, carregar os fardos e alcançar lugares que não tem graça quando chegamos sozinhos. Sou sua fã.

Ian, nunca imaginei que seria no Piauí que nasceria um cara tão parecido comigo (o que me deixa preocupada, confesso) e que nossos caminhos se cruzariam aqui, em Campina Grande, de forma tão feliz. Você trouxe leveza para os meus dias, soube me ouvir quando necessário e me mostrou que as coisas não precisam ser sempre tão sérias para que sejam importantes. Obrigada por tudo, jabuti!

Raquel, sua determinação e paciência são admiráveis. Obrigada por sempre se mostrar disponível e por não medir esforços para me auxiliar quando fosse preciso. Você me mostrou que o equilíbrio é indispensável para viver nossos propósitos e sou grata por isso.

Aos meus amados João Victor e Ana Vitória. Eu não sei se teria conseguido se não fossem vocês ao meu lado para tudo. Esse último ano não foi fácil em muitos sentidos, mas sempre foi um acalento saber que ao chegar na universidade eu teria vocês. Vocês me mostraram o que merece ser valorizado no dia a dia, com lealdade e leveza. Obrigada por terem construído este trabalho junto comigo, sem vocês não seria possível. Estão guardados no meu coração cada risada, cada coquinha e espetinho que desfrutamos juntos. Vocês são preciosos!

À Francimárcio que tanto me ajudou desde os projetos até a execução deste trabalho final, sempre disponível e dedicado. À Larissa, a pessoa mais generosa que conheci nessa caminhada e que muito me ensinou com sua calmaria. O mundo seria muito melhor se tivéssemos mais profissionais como você, obrigada pela sua solicitude e pelo carinho com que sempre me tratou independentemente de onde nos encontrássemos.

Aos demais do meu primeiro grupinho da graduação, que sempre me rendeu mais bônus, do que ônus: Will e Ianny. Sempre tive em vocês um grande referencial a seguir, obrigada por tornarem tudo mais fácil e tranquilo, por terem ido na frente, me assegurando de que o caminho valia a pena.

Aos que me apoiaram para além dos muros da universidade, agradeço a Vitória Medeiros, Thays França, Talita, Jéssica, Bia, Myke, André, João Erick, Rachel, Alba, Thayane e Mayra pela paciência de muitas vezes me ouvir falar do que escolhi para minha vida (mesmo que não fosse música aos seus ouvidos). Aos meus eternos mestres: Andrey, Glayds, Cícero e Cláudia por terem sido divisores de águas e inspirações na minha formação ainda no ensino médio. Aos professores Severino, Romildo, Líbia, Jailson, Sidinei, Heleno e Eudésio por trazerem brilho aos meus olhos em cada aula lecionada.

Aos amigos que chegaram há pouco, mas que me levaram a enxergar e viver a indústria da maneira mais leve possível: Luciano, Vithoria, Lucas, Big e Leonel, vocês são profissionais exemplares e, a cada dia vivido no estágio, foi através de vocês que meu sonho de adolescência ganhou forma. Entrei naquele laboratório me questionando se havia feito a

melhor escolha profissional e saí de lá totalmente convicta do valor da minha formação. Obrigada por terem tido paciência, acreditado em mim e me honrado com a amizade de vocês.

À Heloyse de 13 anos que, inocentemente, ousou pensar neste futuro. Obrigada!

Nem por isso perdi o ânimo, antes disse para mim mesma:
"Deus, Nosso Senhor, não há de me inspirar desejos
irrealizáveis".

(Santa Teresinha do Menino Jesus)

CHAVES, H. R. **Valorização De Resíduos De Casca De Abacaxi Como Bioadsorvente Para Remoção De Azul De Metileno: Estudos Cinéticos E Isotérmicos**. 2026. 48p. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2026.

RESUMO

O setor têxtil representa um dos maiores consumidores mundiais de água, recurso indispensável à vida e à atividade industrial. Entretanto, a gestão ambiental dos resíduos gerados por esse tipo de indústria ainda é um desafio, visto que há uma considerável geração de efluentes altamente coloridos e tóxicos, especialmente devido à composição de corantes sintéticos que, mesmo em baixas concentrações, afetam a normalidade dos corpos hídricos e, por consequência, os ecossistemas aquáticos. Dado este cenário, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a utilização da casca do abacaxi, um resíduo agroindustrial abundante, em especial no Brasil, como bioadsorvente para o tratamento de efluentes têxteis na remoção do corante sintético azul de metileno. Os ensaios de adsorção foram realizados após secagem e moagem da biomassa, a fim de verificar a influência do pH, realizar os estudos cinéticos e de isotermas. Além disso, realizou-se caracterização por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), com o intuito de identificar os principais grupos funcionais potencialmente envolvidos no processo de adsorção. O bioadsorvente apresentou eficiência de remoção de 93,7% para o azul de metileno, em pH 4, além de terem sido registrados ótimos ajustes dos dados experimentais ao modelo teórico de pseudo-segunda ordem para a cinética e ao modelo das isotermas de Sips, aplicado na regressão.

Palavras-chave: Adsorção; Corantes têxteis; Biomassa; Tratamento de efluentes; Resíduos agroindustriais.

CHAVES, H. R. **Valorization of Pineapple Peel Waste as a Bioadsorbent for the Removal of Methylene Blue: Kinetic and Isothermal Studies.** 2026. 48p. Graduation. Final Paper. Chemical Engineering. Federal University of Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2026.

ABSTRACT

The textile sector is one of the world's largest consumers of water, a resource that is essential to life and industrial activity. However, the environmental management of waste generated by this type of industry is still a challenge, given that there is considerable generation of highly colored and toxic effluents, especially due to the composition of synthetic dyes which, even in low concentrations, affect the normality of water bodies and, consequently, aquatic ecosystems. Given this scenario, the present research aimed to evaluate the use of pineapple peel, an abundant agro-industrial waste, especially in Brazil, for the treatment of textile effluents in the removal of synthetic methylene blue dye. Adsorption tests were performed after drying and grinding the biomass to verify the influence of pH and to conduct kinetic and isothermal studies. In addition, characterization by infrared spectroscopy (FTIR) was performed to identify the main functional groups potentially involved in the adsorption process. The biomass showed a removal efficiency of 93.7% for methylene blue at pH 4, in addition to optimal adjustments of the experimental data to the pseudo-second-order theoretical model for kinetics and to the Sips isotherm model applied in the regression.

Keywords: Adsorption; Textile dyes; Biomass; Effluent treatment; Agro-industrial waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. À esquerda, fruta in natura, à direita, amostra da casca do abacaxi após secagem e trituração.....28
Figura 2. Casca do abacaxi pós-adsorção do corante azul de metileno.....29
Figura 3. Solução mãe de azul de metileno, à esquerda e, à direita, diluída a 50 $mg.L^{-1}$.....30
Figura 4. Espectros de IV da casca do abacaxi. (A) Antes da adsorção. (B) Pós-adsorção....33
Figura 5. Resultados de remoção para o estudo de influência do pH.....35
Figura 6. Estudo da influência do pH.....36
Figura 7. Resultados de remoção para o estudo cinético.....37
Figura 8. Cinética de adsorção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi, incluindo ajustes não lineares para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.....38
Figura 9. Resultados de remoção para o estudo das isotermas.....39
Figura 10. Isoterma de adsorção do azul de metileno e ajuste não linear utilizando os modelos de Freundlich, Langmuir, Sips, Redlich–Peterson e Temkin.....40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do corante azul de metileno.....27
Tabela 2. Modelos matemáticos das isotermas de adsorção.....32
Tabela 3. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo de influência do pH.....34
Tabela 4. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo cinético. Condições experimentais: pH=4; T=25 °C; m=0,5 g; V=50 mL; A=200 rpm.....36
Tabela 5. Parâmetros cinéticos obtidos para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.....38
Tabela 6. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo das isotermas. Condições experimentais: pH=4; T=25 °C; m=0,5 g; V=50 mL; A=200 rpm.....39
Tabela 7. Parâmetros obtidos para as equações de Freundlich, Langmuir, Sips, Redlich-Peterson e Temkin para o corante azul de metileno utilizando a casca do abacaxi.....40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação, propriedades e aplicações de corantes selecionados.....23

Quadro 2. Reagentes, produtos e equipamentos utilizados neste trabalho.....27

LISTA DE ABREVIAÇÃO E SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
CCT	Cento de Ciências e Tecnologia
cm	Centímetro
DRX	Difração de raios X
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
g	Grama
h	Hora
L	Litro
LABNOV	Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mg	Miligrama
min	Minutos
mL	Mililitro
nm	Nanômetro
ºC	Graus Celsius
ppm	Partes por milhão
TG	Análises Termogravimétricas
UAEQ	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 19

2. OBJETIVOS 21

2.1. Geral 21

2.2. Específicos 21

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

3.1. A indústria têxtil e os corantes 22

3.2. Adsorção 24

3.3. Produção de abacaxi e geração de resíduos agroindustriais 25

4. MATERIAIS E MÉTODOS 27

4.1. Materiais 27

4.2. Métodos 28

4.2.1. Preparação do bioadsorvente 28

4.2.2. Caracterização 28

4.2.2.1. Espectroscopia na Região do Infravermelho (IV) 28

4.2.3. Estudos experimentais 29

4.2.3.1. Influência do pH 30

4.2.3.2. Cinética de adsorção 31

4.2.3.3. Isotermas de adsorção 31

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 33

5.1. Espectroscopia na Região do Infravermelho (FTIR) 33

5.2. Avaliação do desempenho do bioadsorvente no processo de adsorção do azul de metileno 34

5.2.1. Influência do pH 34

5.2.2. Estudo cinético 36

5.2.3. Isotermas 39

6. CONCLUSÃO 42

7. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....43

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....44

1. INTRODUÇÃO

A crescente intensificação das atividades industriais tem contribuído significativamente para o aumento da contaminação de corpos hídricos por diferentes tipos de poluentes. Entre esses contaminantes destacam-se os corantes sintéticos utilizados em setores como as indústrias têxtil, farmacêutica, de papel e de alimentos. Muitos desses compostos apresentam elevada estabilidade química, resistência à biodegradação e forte coloração, o que dificulta sua remoção por processos convencionais de tratamento de efluentes e pode comprometer a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos (KANT, 2012).

Dentre os diversos corantes utilizados industrialmente, o azul de metileno é frequentemente empregado como composto modelo em estudos de tratamento de efluentes devido à sua estabilidade e facilidade de detecção em meio aquoso. A presença desse corante em ambientes aquáticos pode reduzir a penetração de luz nos corpos d'água, afetando processos fotossintéticos e alterando o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Além disso, sua presença em efluentes industriais tem motivado o desenvolvimento de diferentes tecnologias voltadas à sua remoção eficiente antes do descarte no meio ambiente (RAFATULLAH *et al*., 2010; AL-ASADI et al., 2025)

Diversas técnicas têm sido investigadas para o tratamento de efluentes contendo corantes, incluindo processos de oxidação avançada, coagulação-floculação, filtração por membranas e biodegradação. Entretanto, muitos desses métodos apresentam limitações relacionadas ao elevado custo operacional, geração de subprodutos ou baixa eficiência para determinados compostos. Nesse contexto, a adsorção destaca-se como uma das tecnologias mais promissoras para remoção de corantes em soluções aquosas, devido à sua simplicidade operacional, elevada eficiência e possibilidade de utilização de materiais adsorventes de baixo custo. Estudos recentes demonstram que diferentes materiais adsorventes podem apresentar elevadas capacidades de remoção de corantes, dependendo de fatores como pH, tempo de contato, concentração inicial do contaminante e características da superfície do adsorvente (JAWAD *et al*., 2023).

Nos últimos anos, tem crescido o interesse na utilização de resíduos agroindustriais como materiais adsorventes alternativos. Esses materiais apresentam vantagens importantes, como ampla disponibilidade, baixo custo e caráter renovável, além de contribuírem para a valorização de resíduos e redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado de biomassa. Diversos estudos relatam o potencial de materiais lignocelulósicos provenientes

de resíduos agrícolas (como cascas de frutas, fibras vegetais e resíduos florestais) na remoção de corantes de soluções aquosas (SILVA *et al*., 2019).

Entre os resíduos agroindustriais com potencial aplicação em processos de adsorção destaca-se a casca do abacaxi, um subproduto gerado em grande quantidade pela indústria alimentícia e pelo consumo doméstico da fruta. Esse material apresenta composição rica em celulose, hemicelulose e lignina, além de possuir diferentes grupos funcionais capazes de interagir com moléculas de corantes presentes em solução. Pesquisas recentes indicam que materiais derivados desse resíduo podem apresentar elevada eficiência na remoção de azul de metileno, atingindo altas taxas de remoção em condições experimentais adequadas (HABIBU *et al*., 2023).

Diante desse contexto, a investigação do potencial de resíduos agroindustriais como adsorventes para remoção de corantes em meio aquoso apresenta grande relevância ambiental e tecnológica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da casca do abacaxi como material adsorvente para a remoção de azul de metileno em solução aquosa, por meio de estudos experimentais em sistemas de adsorção em batelada, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O presente estudo tem como objetivo geral investigar experimentalmente o desempenho da casca de abacaxi como bioadsorvente no tratamento de efluentes têxteis, por meio de experimentos de adsorção conduzidos em sistema batelada.

2.2. Específicos

- Realizar experimentos de adsorção em batelada com agitação (200 rpm) utilizando o bioadsorvente (casca do abacaxi) com a finalidade de investigar o efeito do pH na remoção do corante azul de metileno.
- Determinar a cinética de adsorção do bioadsorvente (casca do abacaxi) utilizando o corante azul de metileno e ajustar modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.
- Utilizar modelos matemáticos (Langmuir, Freundlich, Temkin, Redlich-Peterson e Sips) a partir da construção de isotermas de adsorção (para o corante azul de metileno), mediante ajuste aos dados experimentais para representar o equilíbrio de adsorção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A indústria têxtil e os corantes

A indústria têxtil constitui um dos setores industriais mais importantes mundialmente, do ponto de vista econômico, sendo responsável pela produção de fibras, tecidos e diversos produtos utilizados amplamente pela sociedade. Entretanto, esse setor também é reconhecido como uma das atividades industriais que mais consomem água e produtos químicos durante seus processos produtivos, especialmente nas etapas de preparação, tingimento e acabamento dos tecidos. Durante essas etapas são utilizados diferentes tipos de corantes, auxiliares químicos, sais e agentes oxidantes, que frequentemente acabam sendo incorporados aos efluentes gerados ao longo do processo produtivo (KANT, 2012; ROBINSON *et al*., 2001).

Uma projeção feita pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) para o ano de 2025, era de que o setor de vestuário deveria apresentar um crescimento de 3,1% na produção. Entre os aspectos ambientais associados a esse tipo de indústria destaca-se além geração de resíduos sólidos e emissões atmosféricas, a produção volumosa de efluentes líquidos, com alta e complexa carga poluidora. Globalmente, o setor têxtil e de vestuário é o segundo com maior impacto ambiental, atrás apenas da indústria do petróleo (MARINHO *et al*., 2019; KIM *et al*., 2024).

A Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) define os corantes como compostos químicos, total ou parcialmente solúveis, que em contato com um material lhe conferem cor; esta funcionalidade se dá pela propriedade destes compostos de absorver luz visível seletivamente devido à presença de grupos cromóforos tais como nitro, nitroso, azo e carbonila; por aplicação eles são classificados de acordo com o tipo de fibra a ser usada (SOUZA et al., 2013).

Pesquisas recentes avaliam que existam mais de 10 mil tipos de corantes sintéticos comerciais no mercado, podendo chegar a uma produção anual de 700.000 toneladas. Desse montante, cerca de 40% é despejado em corpos hídricos do mundo todo (ISLAM *et. al.*, 2025).

Para fins de compreensão acerca de estrutura e aplicação de corantes têxteis, Marques (2025) propôs a classificação contida no Quadro 1.

Quadro 1. Classificação, propriedades e aplicações de corantes selecionados.

Classe	Características	Exemplos	Solubilidade / pH de trabalho	Aplicações	Impactos ambientais
Azo	São versáteis, baixo custo, estáveis e cores intensas. Possuem o grupo funcional –N=N– e são classificados em monoazo, diazo e poliazo.	Vermelho Congo; Laranja de Metila.	Solúvel em água; pH: 2–6	Tingir tecidos, couro, calçados, cosméticos e produtos farmacêuticos	Podem desencadear alergias de contato e são conhecidos por serem cancerígenos.
Básicos (Catiônicos)	Usados para tingir fibras aniônicas, mas por serem sensíveis à luz, são aplicados principalmente em papel, náilon e poliésteres modificados.	Rodamina B; Azul de Metileno.	Solúvel em água; pH: 2–6	Tingir tintas, plásticos e revestimentos.	Danos no sistema reprodutivo e câncer nos organismos aquáticos.
Reativos	Usados principalmente em fibras de celulose. Alta pigmentação, fixação permanente e versatilidade, formando ligações covalentes com diferentes tipos de fibras.	Azul Reativo 5; Vermelho Reativo 147.	Solúvel em água; pH: alcalino	Tingimento de fibras de náilon, celulose e proteínas	Toxicidade aguda em embriões e larvas de peixe-zebra
Diretos	São acessíveis e aplicados em fibras de celulose, mas apresentam baixa fixação. Para melhorar sua aderência ao tecido, são usados com sais como Na_2SO_4 ou NaCl.	Vermelho Direto 28; Amarelo Direto 12.	Solúvel em água; pH: 7–8	Tingir tecidos e outros materiais como algodão e papel.	Defeitos esqueléticos e redução dos batimentos cardíacos.

Fonte: Marques, 2025.

Na tentativa de mitigar esse problema do setor têxtil, diversas técnicas têm sido investigadas para o tratamento de efluentes contendo corantes, desde processos de oxidação avançada, coagulação-floculação, filtração por membranas e até a própria biodegradação. Apesar dos esforços em torno desta problemática, essas soluções ainda são limitadas quando consideradas as questões logísticas e de alto custo envolvidas. Nesse contexto, a adsorção destaca-se como uma das tecnologias mais promissoras para remoção de corantes em soluções aquosas, devido à sua simplicidade operacional, elevada eficiência e possibilidade de utilização de materiais adsorventes de baixo custo. Estudos recentes demonstram que diferentes materiais adsorventes podem apresentar elevadas capacidades de remoção de corantes, dependendo de fatores como pH, tempo de contato, concentração inicial do contaminante e características da superfície do adsorvente (JAWAD *et al*., 2023).

3.2. Adsorção

A adsorção é um fenômeno físico-químico amplamente utilizado em processos de separação e purificação, especialmente no tratamento de água e efluentes industriais. Nesse processo, moléculas ou íons presentes em uma fase líquida ou gasosa (adsorvato) são acumulados na superfície de um material sólido denominado adsorvente. Essa retenção ocorre devido a interações físicas ou químicas entre o adsorvato e os sítios ativos presentes na superfície do material adsorvente. Devido à sua eficiência, simplicidade operacional e custo relativamente baixo, a adsorção tem sido amplamente aplicada na remoção de contaminantes como corantes, metais pesados, compostos orgânicos e fármacos presentes em águas residuais industriais (TRAN, 2023).

O mecanismo de adsorção pode ocorrer por meio de diferentes interações, incluindo forças de van der Waals, ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas e formação de complexos químicos entre o adsorvato e grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente. De forma geral, o processo pode ser classificado em dois tipos principais: fisissorção (adsorção física) e quimissorção (adsorção química). A fisissorção é caracterizada por interações intermoleculares relativamente fracas e reversíveis, enquanto a quimissorção envolve a formação de ligações químicas mais fortes entre o adsorvato e o adsorvente (ZENG *et al*., 2023).

Para compreender o comportamento do processo de adsorção, é comum utilizar modelos cinéticos e isotérmicos que descrevem a velocidade e o equilíbrio do processo. Entre os modelos cinéticos mais utilizados destacam-se os modelos de pseudo-primeira ordem e

pseudo-segunda ordem. O modelo de pseudo-segunda ordem é frequentemente observado em sistemas de adsorção envolvendo corantes e metais pesados, indicando que o processo pode ser controlado por interações químicas entre o adsorvato e os sítios ativos da superfície do adsorvente (FADL, 2023).

Dessa forma, a compreensão dos mecanismos de adsorção, bem como a aplicação de modelos cinéticos e isotérmicos adequados, é fundamental para o desenvolvimento e otimização de sistemas de tratamento de efluentes. Esses modelos permitem avaliar a eficiência do adsorvente, compreender os mecanismos envolvidos no processo e projetar sistemas de tratamento mais eficientes e sustentáveis.

3.3. Produção de abacaxi e geração de resíduos agroindustriais

O abacaxi (*Ananas comosus* L. Merrill) é uma fruta tropical originária da América do Sul e amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais do mundo. No Brasil, essa cultura apresenta grande importância econômica e social, sendo cultivada em praticamente todas as unidades da federação. De acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), o país produziu aproximadamente 2,39 milhões de toneladas de abacaxi em 2023, ocupando cerca de 63,9 mil hectares de área cultivada e posicionando-se, segundo os dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) de 2023, como quarto maior produtor mundial da fruta.

Grande parte da produção brasileira é destinada ao consumo interno e a atividade envolve principalmente pequenos e médios produtores, o que reforça sua relevância socioeconômica para diversas regiões agrícolas do país. Estados como Pará, Paraíba, Minas Gerais e Bahia destacam-se entre os principais produtores nacionais, contribuindo significativamente para a produção total do país (TEIXEIRA, 2020).

Apesar da importância econômica da cultura, o processamento e o consumo do abacaxi geram grandes quantidades de resíduos, incluindo cascas, folhas, coroas e polpa residual. Esses resíduos são frequentemente descartados ou queimados, podendo causar impactos ambientais. Entretanto, devido ao seu elevado teor de compostos lignocelulósicos, esses materiais apresentam grande potencial para aplicação em processos de valorização, como a produção de biochar e carvão ativado (HAMZAH *et al*., 2021).

Nos últimos anos, diversos estudos têm investigado o potencial de resíduos de abacaxi como matéria-prima para produção de materiais adsorventes. Rosli *et al*. (2023) produziram

carvão ativado a partir da casca do abacaxi e observaram elevada área superficial e significativa capacidade de adsorção para corantes como azul de metileno e vermelho de metila, demonstrando o potencial desse material para aplicação no tratamento de efluentes industriais.

De forma semelhante, Iamsaard *et al*. (2022) investigaram a utilização de biochar produzido a partir de folhas de abacaxi para remoção de metais pesados como Ni(II), Zn(II) e Cu(II) em soluções aquosas. Os resultados indicaram elevadas capacidades de adsorção, além de evidenciar que mecanismos como troca catiônica e complexação superficial desempenham papel fundamental na remoção dos contaminantes. Além disso, esses materiais apresentam boa capacidade de regeneração e reutilização em múltiplos ciclos de adsorção, o que aumenta sua viabilidade econômica para aplicações em tratamento de água e efluentes industriais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais (LABNOV), localizado na Unidade Acadêmica de Engenharia Química, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UAEQ/CCT/UFCG).

4.1. Materiais

Os reagentes, produtos e equipamentos utilizados neste trabalho estão apresentados no Quadro 2.

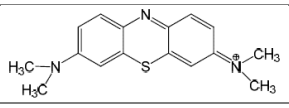
Quadro 2. Reagentes, produtos e equipamentos utilizados neste trabalho.

Equipamentos	Reagentes	Materiais e acessórios
Balança analítica – Marte®, AL500 C	Casca do abacaxi (triturada e seca a 80ºC)	Água destilada
Espectrofotômetro – Shimadzu®, UV – 1600 Pró-Análise	Corante azul de metileno – Synth	Papel de filtro
Estufa – Quimis®	HCl Neon© (Ácido Clorídrico) – Solução 1 mol.L^{-1}	Vidrarias
Mesa Agitadora – CERTOMAT®	NaOH Neon© (Hidróxido de sódio) – Solução 1 mol.L^{-1}	-
pHmêtro – Agilent Technologies®	-	-

Fonte: Autora (2026).

O corante utilizado foi o azul de metileno. Na Tabela 1 constam as características gerais do corante utilizado.

Tabela 1. Características do corante azul de metileno.

Características	Propriedades
Estrutura Molecular	
Nome	Azul de metileno
No. CAS	61-73-4
Absorbância – $\lambda_{máx}$	664 nm

Massa Molecular	319,85 g/mol
Fórmula Molecular	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
Classe química	Catiônico

Fonte: Autora (2026).

4.2. Métodos

4.2.1. Preparação do bioadsorvente

A matéria-prima utilizada como bioadsorvente foi a casca do abacaxi retirada da fruta, adquirida em supermercados diversos da cidade de Campina Grande. O material foi preparado através da secagem em estufa, a 80 °C por 24 h. Após esse período a casca do abacaxi foi triturada grosseiramente em liquidificador e posteriormente submetida a um moinho de facas, para redução da granulometria.

Figura 1. À esquerda, fruta *in natura*, à direita, amostra da casca do abacaxi após secagem e trituração.



Fonte: Autora (2026).

4.2.2. Caracterização

4.2.2.1. *Espectroscopia na Região do Infravermelho (IV)*

A identificação dos grupos funcionais presentes na casca do abacaxi foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Os espectros foram

obtidos utilizando o equipamento VERTEX 70 (Bruker©), operando na faixa de comprimento de onda, com varredura de 4000 a 400 cm^{-1}. Destaca-se que esta análise foi feita para o material antes e após a adsorção.

Figura 2. Casca do abacaxi pós-adsorção do corante azul de metileno.



Fonte: Autora (2026).

4.2.3. Estudos experimentais

Para os estudos de adsorção, inicialmente preparou-se uma solução mãe, com concentração de 1000 $mg.L^{-1}$, do corante azul de metileno. A partir da solução mãe, realizou-se a diluição para uma concentração de 50 $mg.L^{-1}$, através da equação geral de diluição:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (01)$$

Daí obteve-se a solução desejada para continuidade dos ensaios em banho finito, conforme ilustrada na Figura 3.

Figura 3. Solução mãe de azul de metileno, à esquerda e, à direita, diluída a 50 mg.L^{-1}.



Fonte: Autora (2026).

4.2.3.1. *Influência do pH*

Para avaliação da influência do pH, foi utilizada uma solução de corante azul de metileno com concentração de 50 mg.L^{-1}. Em um erlenmeyer de 125 mL pesou-se 0,5g da casca do abacaxi. Após essa etapa, realizou-se o ajuste de pH na solução do corante, utilizando soluções de HCl e NaOH (ambas a 1 mol.L^{-1}), realizando medições diretas com o pHmêtro submerso na solução, percorrendo uma faixa entre 1 e 12. O sistema (solução de corante azul de metileno + casca do abacaxi) foi conduzido à mesa agitadora a 200 rpm por um período de 1h. Decorrido o tempo de contato, cada amostra foi filtrada e em seguida, analisou-se as concentrações restantes do corante com o auxílio do espectrofotômetro UV-VIS.

Na literatura (Von Sperling, 2014), verifica-se que a porcentagem de remoção e a capacidade de remoção de determinado poluente no tratamento de águas residuais podem ser obtidas pelas Equações 02 e 03:

$$\%Rem = \frac{(C_0 - C_f)}{C_f} \cdot 100 \quad (02)$$

$$q = \frac{V}{m}(C_0 - C_f) \quad (03)$$

Onde: C_0 – concentração inicial da solução corante (mg.L^{-1}); C_f – concentração final

restante após a adsorção ($mg.L^{-1}$); V – volume de solução corante (L); m – massa de adsorvente (g).

4.2.3.2. *Cinética de adsorção*

Para execução do estudo cinético foram preparados ensaios com 0,5g da casca do abacaxi e 50 mL de solução do corante, ajustada ao pH de melhor performance na etapa anterior. Cada sistema permaneceu em agitação em intervalos de tempos diferentes, totalizando 12 amostras. Após os tempos decorridos, o material foi filtrado e as concentrações finais determinadas a partir do espectrofotômetro UV-VIS. Os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, segundo Nascimento (2020), estão descritos, respectivamente, nas Equações 04 e 05:

$$\frac{dq_{(t)}}{dt} = k_1 \cdot (q_e - q_{(t)}) \quad (04)$$

$$\frac{dq_{(t)}}{dt} = k_2 \cdot \left(q_e - q_{(t)}\right)^2 \quad (05)$$

Em que: k_1 – Constante da taxa de adsorção do modelo de pseudo-primeira ordem (min^{-1}); k_2 – Constante da taxa de adsorção do modelo de pseudo-segunda ordem ($g.mg^{-1}.min^{-1}$); q_e – Quantidade adsorvida no equilíbrio ($mg.g^{-1}$); $q_{(t)}$ – Quantidade adsorvida no instante t ($mg.g^{-1}$).

Os dados obtidos após os experimentos foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem com o auxílio do software Origin 2021©.

4.2.3.3.*Isotermas de adsorção*

Na determinação das isotermas de adsorção, a partir da solução mãe (1000 $mg.L^{-1}$) foram preparadas 11 soluções com diferentes concentrações do corante azul de metileno entre 20 e 250 $mg.L^{-1}$. O pH de todas as soluções novamente foi ajustado ao de melhor performance nos estudos anteriores e a temperatura em todos os ensaios foi ambiente, em torno de 25 ºC. Para os ensaios, as soluções ficaram em contato com a casca do abacaxi por um período de 60 min, em mesa agitadora com agitação de 200 rpm. Após o tempo estabelecido, as amostras foram filtradas e suas concentrações foram determinadas por espectroscopia UV-VIS.

Na Tabela 2 estão apresentadas as equações dos modelos matemáticos (Nascimento, 2020; Danat *et al*., 2026) utilizados neste trabalho em suas formas não lineares.

Tabela 2. Modelos matemáticos das isotermas de adsorção.

Isoterma	**Modelo**
Langmuir	$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$
Freundlich	$q_e = K_f (C_e)^{\frac{1}{n}}$
Sips	$q_e = \frac{q_0 K_s C_e^{1/n}}{1 + K_s C_e^{\beta \frac{1}{n}}}$
Temkin	$q_e = \frac{RT}{b} \ln(k_t C_e)$
Redlich-Peterson	$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a_{RP} C_e^{\beta}}$

Fonte: Autora (2026).

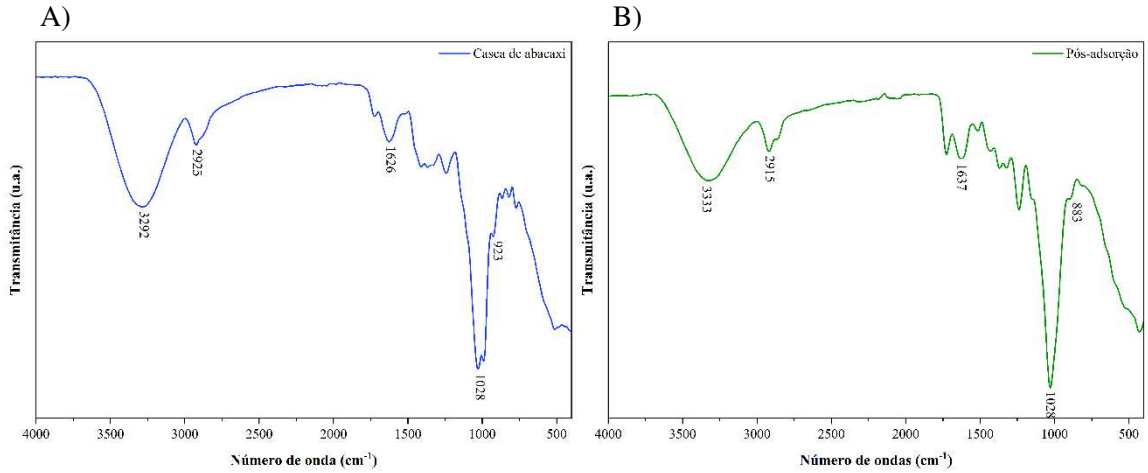
Os dados obtidos após os experimentos foram ajustados aos modelos das isotermas de Langmuir, Freundlich, Sips, Temkin e Redlich-Peterson com o auxílio do software Origin 2021©.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1.Espectroscopia na Região do Infravermelho (FTIR)

As análises de Infravermelho (FTIR) da casca do abacaxi antes e pós adsorção, estão apresentadas na Figura 4.

Figura 4. Espectros de IV da casca do abacaxi. (A) Antes da adsorção. (B) Pós-adsorção.



Fonte: Autora (2026).

A análise dos espectros FTIR da casca do abacaxi revelou a presença de grupos funcionais necessários na adsorção de corantes. A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) opera com base no princípio de que as moléculas absorvem luz infravermelha em frequências específicas, que correspondem aos modos vibracionais de suas ligações químicas. O espectro de absorção resultante serve como uma impressão digital molecular, permitindo a identificação e caracterização de diversas substâncias orgânicas e inorgânicas. As partes das moléculas que determinam as principais propriedades químicas dos compostos, ou seja, os grupos funcionais, absorvem radiação infravermelha na mesma faixa de números de onda, mesmo que façam parte de compostos diferentes (PASIECZNA-PATKOWSKA, *et al*., 2025).

O resultado do IV da casca do abacaxi antes e após a adsorção apresentaram bandas bastante semelhantes, indicando que os grupos funcionais se mantiveram inalterados após o processo. Verificou-se, nos dois espectros, bandas largas, dados nos comprimentos 3292 cm^{-1} e 3333 cm^{-1} que podem ser atribuídos a vibrações características dos grupos hidroxila (O–H) e amina ($N–H_X$). Os picos mais fracos, nos comprimentos de 2925 e 2915 cm^{-1} correspondem às vibrações de alongamento C–H (ROSLI *et al*., 2023; TIAN *et al*., 2025).

As bandas em torno de 1626 cm^{-1} e 1637 cm^{-1} nos espectros foram associados à vibração de estiramento dos grupos carboxílicos (COOH), enquanto que próximo a 1028 cm^{-1} (observado nas duas amostras), atribui-se o a banda às vibrações assimétricas de alongamento do anel C-O-C (TIAN *et al*., 2025).

Aos comprimentos de 923 cm^{-1} e 883 cm^{-1}, relacionou-se as bandas às deformações externas do alongamento aromático C–H, em consonância com os estudos de Nuhoglu e Malkoc (2009).

Dessa forma, fez-se possível verificar a presença de grupos funcionais favoráveis, em termos de afinidade eletrostática, ao processo da adsorção do corante azul de metileno ao bioadsorvente. Além disso, embora haja semelhança entre os dois espectros apresentados, verifica-se a presença de algumas bandas divergentes, podendo indicar a ocupação pelas moléculas do corante dos sítios disponíveis na casca do abacaxi.

5.2. Avaliação do desempenho do bioadsorvente no processo de adsorção do azul de metileno

5.2.1. Influência do pH

Na Tabela 3, constam os resultados para o estudo de influência do pH.

Tabela 3. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo de influência do pH.

pH	Conc. ($mg.L^{-1}$)	%Rem	q_{eq} ($mg.g^{-1}$)
1	14,58	75,4	4,476
2	19,73	66,8	3,961
3	6,87	88,4	5,247
4	3,75	93,7	5,559
5	3,96	93,3	5,538
6	5,95	90,0	5,339
7	3,87	93,5	5,547
8	5,75	90,3	5,359
9	5,06	91,5	5,428
10	4,86	91,8	5,448
11	3,89	93,4	5,545
12	4,73	92,0	5,461

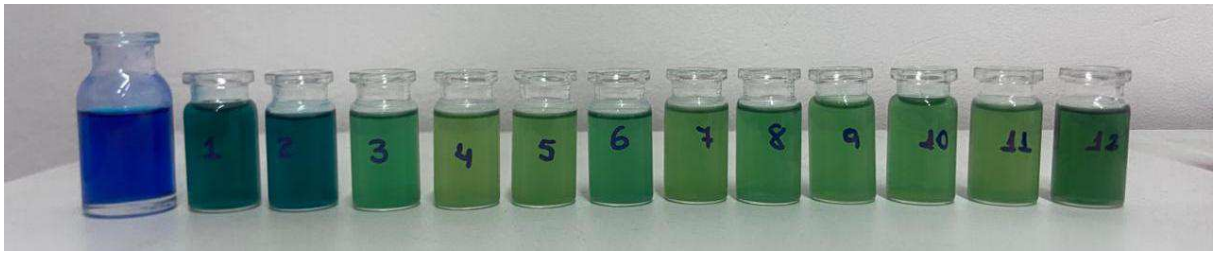
Fonte: Autora (2026).

Nos ensaios de adsorção, a mudança de coloração do filtrado representou um ponto de destaque, evidenciando as interações entre o corante e o bioadsorvente. A casca do abacaxi é um resíduo lignocelulósico composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, materiais que apresentam diversos grupos funcionais superficiais, como hidroxilas, grupos fenólicos e estruturas aromáticas associadas à lignina. Mesmo quando submetida apenas à secagem para remoção de umidade, sem processos de carbonização, esses grupos permanecem presentes e podem atuar como sítios ativos na adsorção de corantes orgânicos.

Quando o azul de metileno entra em contato com superfícies lignocelulósicas, as interações com grupos aromáticos da lignina e com outros grupos funcionais da casca do abacaxi podem favorecer tanto a adsorção quanto a reorganização molecular do corante na superfície do material. Esse rearranjo pode induzir a formação de agregados H ou J, alterando o perfil de absorção no espectro UV-Vis e, consequentemente, a coloração percebida no sistema após o processo de adsorção. Dessa forma, a presença de tonalidades esverdeadas observadas experimentalmente pode estar associada à modificação do ambiente eletrônico do cromóforo do azul de metileno adsorvido, causada tanto pelas interações com os grupos aromáticos da biomassa quanto pela formação de agregados moleculares do corante na superfície do adsorvente (WANG *et al*., 2024; ROSLI *et al*., 2023; JAWAD *et al*., 2024; ROSA, 2025).

Esse fenômeno é comprovado conforme pode ser observado na fotografia apresentada na Figura 5.

Figura 5. Resultados de remoção para o estudo de influência do pH.

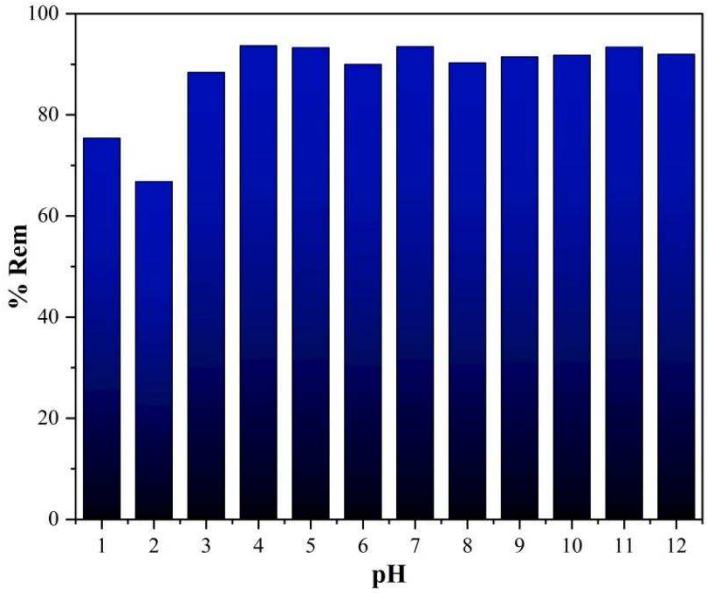


Fonte: Autora (2026).

Nos estudos de adsorção, o pH tem influência na medida em que determina o grau de distribuição das espécies químicas. A intensidade desse efeito pode ser maior ou menor conforme o adsorvente, uma vez que as cargas da superfície do adsorvente dependem da sua composição e das características da superfície (OLIVEIRA *et al*., 2020).

Na Figura 6, verifica-se um comparativo entre os valores de pH estudados.

Figura 6. Estudo da influência do pH.



Fonte: Autora (2026).

De acordo com os resultados observados, nota-se que a eficiência de adsorção do corante azul de metileno foi mais elevada a partir do pH 4, com 93,7% de remoção, mantendo-se praticamente constante em meios mais básicos. Nos estudos de Cárdenas *et al*. (2021), o ponto de carga zero (pH_{pzc}) da casca do abacaxi foi determinado em aproximadamente 5,0, indicando que em pH inferiores a esse valor a superfície tende a apresentar carga positiva, enquanto em pH próximos ou ligeiramente inferiores ocorre equilíbrio de cargas superficiais que ainda permite interação com espécies catiônicas por meio de grupos parcialmente ionizados. Desta forma, dada a natureza eletrônica do corante azul de metileno, comprova-se que a medida que a superfície do corante torna-se mais carregada negativamente, a adsorção é favorecida pelas interações eletrostáticas.

5.2.2. Estudo cinético

Os resultados de remoção para o estudo cinético, considerando o pH ótimo (igual a 4) avaliado no estudo anterior, estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo cinético. Condições experimentais: pH=4; T=25 °C; m=0,5 g; V=50 mL; A=200 rpm.

Tempo de agitação (min)	**Conc. ($mg.L^{-1}$)**	**%Rem**	**q_{eq} ($mg.g^{-1}$)**
2	9,760	82,57	4,62

5	8,020	85,68	4,80
10	7,220	87,11	4,88
15	7,380	86,82	4,86
20	6,070	89,16	4,99
30	5,880	89,50	5,01
40	5,190	90,73	5,08
50	5,550	90,09	5,05
60	5,170	90,77	5,08
80	5,090	90,91	5,09
100	4,860	91,32	5,11
120	4,040	92,79	5,20

Fonte: Autora (2026).

O aspecto visual de remoção pode ser verificado a partir da fotografia apresentada na Figura 7, onde novamente a coloração esverdeada apresentou-se no material filtrado.

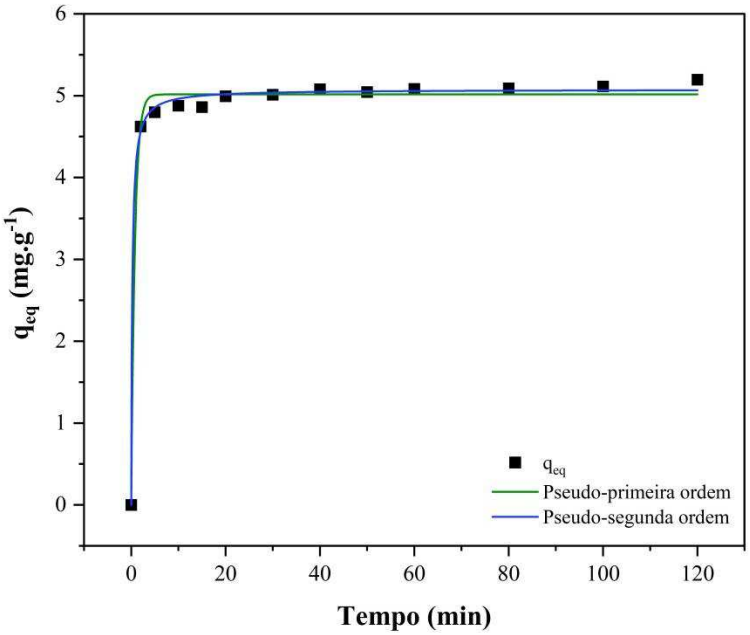
Figura 7. Resultados de remoção para o estudo cinético



Fonte: Autora (2026).

A cinética de adsorção expressa a taxa de remoção do adsorvato em função do tempo. O estudo cinético do corante azul de metileno foi realizado para verificar o tempo necessário para o sistema atingir o equilíbrio de adsorção. A Figura 8 refere-se a aplicação e ajuste dos modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. A partir dos resultados obtidos nos ensaios cinéticos foi verificado que o tempo de adsorção foi muito rápido no estágio inicial do período de contato, estendendo-se gradualmente até o tempo máximo de 120 minutos.

Figura 8. Cinética de adsorção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi, incluindo ajustes não lineares para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.



Fonte: Autora (2026).

Na Tabela 5 estão apresentados os valores dos coeficientes de determinação R^2, bem como os demais parâmetros calculados através da aplicação de regressão sobre os dados experimentais e os respectivos modelos cinéticos.

Tabela 5. Parâmetros cinéticos obtidos para os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Modelo	Parâmetro	Valor
Pseudo-primeira Ordem	$q_e(mg \cdot g^{-1})$	5,01578 ± 0,0347
	$k_1(min^{-1})$	1,25982 ± 0,1476
	R^2	0,99378
	SQR	0,01311
Pseudo-segunda Ordem	$q_e(mg \cdot g^{-1})$	5,07518 ± 0,0254
	$k_2(g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1})$	0,86933 ± 0,1441
	R^2	0,99753
	SQR	0,00521

Fonte: Autora (2026).

O melhor ajuste de modelo cinético, evidenciado pelo valor do R^2, foi o de pseudo-segunda ordem, o que sugere que o processo de adsorção é governado predominantemente por interações químicas entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente, envolvendo

compartilhamento ou troca de elétrons entre as espécies, característica típica de processos de quimissorção (HO; MCKAY, 1999).

5.2.3. Isotermas

De maneira similar aos demais estudos, a Tabela 6 reúne os resultados de remoção do corante azul de metileno para diferentes concentrações, caracterizando o ensaio das isotermas.

Tabela 6. Resultados de remoção do azul de metileno utilizando a casca do abacaxi: Estudo das isotermas. Condições experimentais: pH=4; T=25 °C; m=0,5 g; V=50 mL; A=200 rpm.

Conc. Solução ($mg.L^{-1}$)	Conc. ($mg.L^{-1}$)	%Rem	q_{eq} ($mg.g^{-1}$)
20	1,950	90,3	1,81
40	4,100	89,8	3,59
60	6,740	88,8	5,33
80	9,600	88,0	7,04
100	11,870	88,1	8,81
120	14,330	88,1	10,57
140	16,640	88,1	12,34
160	25,800	83,9	13,42
180	31,100	82,7	14,89
200	40,400	79,8	15,96
250	51,100	79,6	19,89

Fonte: Autora (2026).

Quando o adsorvato entra em contato com o adsorvente, ocorre a transferência de moléculas ou íons da solução aquosa para a superfície do material adsorvente. Esse processo continua até que se estabeleça um balanço entre as espécies presentes na fase líquida e aquelas retidas na superfície do adsorvente. Nesse momento, a concentração do soluto na solução permanece constante (C_{eq}), caracterizando o estado de equilíbrio, no qual é possível determinar a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_{eq}) do adsorvente (NASCIMENTO *et al*., 2014).

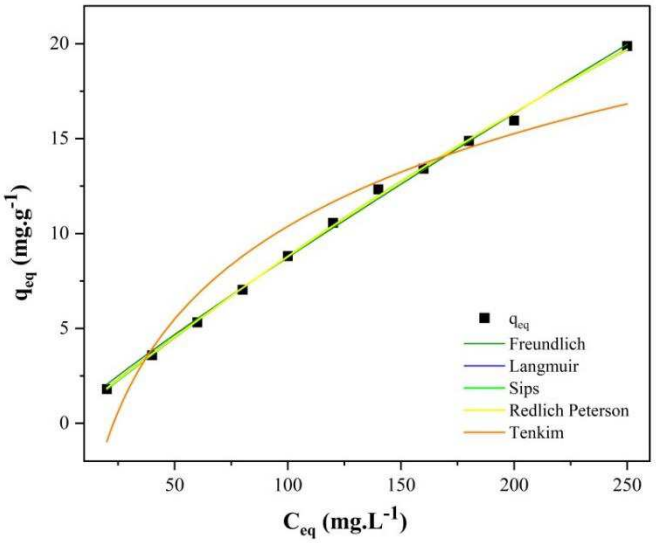
Figura 9. Resultados de remoção para o estudo das isotermas



Fonte: Autora (2026).

Os resultados das curvas obtidas para o equilíbrio de adsorção da casca do abacaxi em pH 4 estão representados na Figura 10. As equações de Langmuir, Freundlich, Temkin, Sips e Redlich-Peterson foram empregadas e ajustadas aos dados experimentais.

Figura 10. Isoterma de adsorção do azul de metileno e ajuste não linear utilizando os modelos de Freundlich, Langmuir, Sips, Redlich–Peterson e Temkin.



Fonte: Autora (2026).

Da análise gráfica, pode-se aferir que a maioria dos modelos se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, de modo que traçam a forma de isoterma linear. Segundo Nascimento (2020), as curvas das isotermas lineares representam uma relação de proporcionalidade entre a massa retida do adsorvato por unidade de massa do adsorvente e a concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. Os principais parâmetros para os modelos implementados estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros obtidos para as equações de Freundlich, Langmuir, Sips, Redlich-Peterson e Temkin para o corante azul de metileno utilizando a casca do abacaxi.

Modelo	Parâmetro	Valor
Freundlich	$K_F\ (mg \cdot g^{-1})$	0,137 ± 0,0128
	$1/n$	1,109 ± 0,0226
	R^2	0,99798
	SQR	0,07035
Langmuir	$q_{sat}(mg \cdot g^{-1})$	116,235 ± 15,726
	$K_L\ (mg \cdot g^{-1})$	8,186E-04 ± 1,27E-04
	R^2	0,99875
	SQR	0,04368

Sips	$q_{sat}(mg \cdot g^{-1})$	93,385 ± 27,882
	K_S	0,0012 ± 5,67E-04
	n	1,044 ± 0,0715
	R^2	0,99881
	SQR	0,04672
Redlich-Peterson	$K_{RB}\ (L \cdot g^{-1})$	0,09343 ± 0,0059
	$a_{RB}\ (mg \cdot L^{-1})$	2,719E-04 ± 0,0011
	β	1,18101 ± 0,6842
	R^2	0,99876
	SQR	0,04851
Temkin	$a_T\ (L \cdot mg^{-1})$	0,0436 ± 0,0073
	b	7,04997 ± 0,7189
	R^2	0,91443
	SQR	2,98337

Fonte: Autora (2026).

Os resultados obtidos para o equilíbrio de adsorção indicaram que o modelo de Sips apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, apresentando coeficiente de determinação (R^2) de 0,99881, superior aos demais modelos avaliados. O bom ajuste do modelo de Sips indica que, em baixas concentrações, o sistema apresenta comportamento semelhante ao modelo de Freundlich, enquanto em concentrações mais elevadas tende a se aproximar do modelo de Langmuir, confirmando a heterogeneidade do sistema de adsorção. Dessa forma, os resultados reforçam a complexidade da superfície do adsorvente e confirmam sua capacidade de interação eficiente com o adsorvato em diferentes condições de concentração (DANAT *et al.*, 2026).

Tem-se que a isoterma de Temkin, a de menor valor de R^2, é muito mais adequada à descrição de processos de adsorção em meio gasoso uma vez que muitos fatores que participam da complexidade dos sistemas em meio líquido não são considerados no desenvolvimento do modelo, como o pH, a organização das moléculas na superfície do adsorvente e até mesmo a solubilidade do soluto no meio líquido em questão (KIM *et al*., 2004; NASCIMENTO, 2020).

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o potencial do bioadsorvente obtido a partir de biomassa residual do abacaxi para a remoção de contaminantes em solução aquosa por meio do processo de adsorção.

A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) permitiu identificar os principais grupos funcionais típicos de materiais lignocelulósicos na superfície do bioadsorvente. Após o processo de adsorção, foram observadas alterações na intensidade e deslocamentos das bandas, indicando a interação entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente. Dessa forma, a análise de FTIR corroborou os resultados cinéticos e isotérmicos obtidos, reforçando a hipótese de que o processo de adsorção envolve interações químicas entre o adsorvato e a superfície do material.

Os estudos de influência do pH demonstraram que a condição mais favorável para o processo de adsorção ocorreu em pH 4, mantendo-se constante até a faixa mais alcalina, indicando que este meio favorece as interações entre o adsorvato e os sítios ativos presentes na superfície do material adsorvente, dada a natureza eletrônica de ambos os materiais.

A análise dos dados cinéticos mostrou que o modelo cinético de pseudo-segunda ordem apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, sugerindo que o processo de adsorção é controlado predominantemente por interações químicas entre o adsorvato e os sítios ativos do adsorvente.

Em relação ao equilíbrio de adsorção, verificou-se que o modelo de isoterma de Sips foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. Esse modelo combina características das isotermas de Langmuir e Freundlich, sendo adequado para descrever sistemas heterogêneos de adsorção. O bom ajuste obtido indica, segundo a literatura, que a superfície do adsorvente apresenta diferentes tipos de sítios ativos, além de sugerir que o processo tende a apresentar comportamento semelhante ao modelo de Langmuir em altas concentrações do adsorvato.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o material adsorvente estudado apresenta potencial para aplicação em processos de remoção de corantes em meio aquoso, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no tratamento de efluentes. Além disso, a utilização de materiais de baixo custo e/ou derivados de resíduos agroindustriais valida a agregação de valor a resíduos e a redução de impactos ambientais.

7. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao longo da execução deste trabalho, observou-se que alguns aspectos relevantes para o processo não foram abordados nesta pesquisa. Essas lacunas podem ser atribuídas tanto às limitações inerentes ao estudo quanto ao surgimento de novas questões ao longo do desenvolvimento do trabalho. Diante disso, são propostas a seguir algumas perspectivas que podem ser exploradas em trabalhos futuros:

- Realizar caracterização, tais como, Difração de raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e análises termogravimétricas (TG) e similares, a fim de conhecer as características do bioadsorvente, direcionando suas aplicações.
- Investigar o efeito dos processos de ativação térmica em diferentes estágios, proporcionando o tratamento de efluentes que contenham outras categorias de cargas poluentes.
- Desenvolver e aplicar o estudo a materiais compósitos a partir da mistura de fibras da casca de abacaxi com outras biomassas fibrosas, como a bucha de coco, a fim de potencializar o processo de adsorção explorando outras propriedades desses materiais.
- Avaliar a possibilidade de regeneração com ultrassom do bioadsorvente, aplicação em efluentes reais e avaliação em sistemas contínuos, a fim de ampliar o conhecimento sobre o desempenho do material e viabilizar sua aplicação em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. Disponível em: <https://www.abit.org.br/>. Acesso em 06 de março de 2026.

AL-ASADI, S. T.; MUSSA, Z. H.; AL-QAIM, F. F.; KAMYAB, H.; AL-SAEDI, H. F. S.; DEYAB, I. F.; KADHIM, N. J.. A comprehensive review of methylene blue dye adsorption on activated carbon from edible fruit seeds: a case study on kinetics and adsorption models. Carbon Trends, [S.L.], v. 20, p. 100507, ago. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100507.

CÁRDENAS, C. V., et al. Determination of the point of zero charge of pineapple (Ananas comosus L.) peel and its application as copper adsorbent. **Agro productividad**, 26 nov. 2021.

DANAT, B.T., WUANA, R.A., CHAHUL, H.F. *et al.* Review of adsorption isotherms models. *Appl Water Sci* **16**, 72 (2026). https://doi.org/10.1007/s13201-025-02682-0

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/international>. Acesso em 06 de março de 2026.

FADL, M. G. Prediction of heavy metal biosorption mechanism through studying isotherm kinetic equations. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 0-1, 28 jan. 2023. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-28655-4.

FAO – Organização Mundial das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. Disponível em: < https://www.fao.org/brasil/pt/>. Acesso em 06 de março de 2026.

HABIBU, S.; LADAN, M.; SAFANA, A. A.; DANDALMA, Z. A.; SALEH, I.; ABDULLAHI, S. R. Optimization of Methylene Blue Adsorption onto Activated Carbon derived from Pineapple Peel Waste using Response Surface Methodology. **Umyu Scientifica**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 45-55, 30 dez. 2023. Umaru Musa YarAdua University Katsina NG. http://dx.doi.org/10.56919/usci.2324.006.

HAMZAH, A. F. A.; HAMZAH, M. H;; MAN, H C.; JAMALI, N. S.; SIAJAM, S. I.; ISMAIL, M. H. Recent Updates on the Conversion of Pineapple Waste (Ananas comosus) to

Value-Added Products, Future Perspectives and Challenges. Agronomy, [S.L.], v. 11, n. 11, p. 2221, 2 nov. 2021. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11112221.

HO, Y.S; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 451-465, jul. 1999. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0032-9592(98)00112-5.

IAMSAARD, K.; WENG, C.; YEN, L.; TZENG, J.; POONPAKDEE, C.; LIN, Y.. Adsorption of metal on pineapple leaf biochar: key affecting factors, mechanism identification, and regeneration evaluation. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 344, p. 126131, jan. 2022. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126131.

ISLAM, M. M.; AIDID, A.R.; MOHSHIN, J.N.; MONDAL, H.; GANGULI, S.; CHAKRABORTY, A.K.. A critical review on textile dye-containing wastewater: ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. **Cleaner Chemical Engineering**, [S.L.], v. 11, p. 100165, dez. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165.

JAWAD, A. H.; ABDULHAMEED, A. S.; KHADIRAN, T.; ALOTHMAN, Z. A.; WILSON, L. D.; ALGBURI, S. Response surface methodology for optimizing methylene blue dye removal by mesoporous activated carbon derived from renewable woody Bambusoideae waste. **International Journal Of Phytoremediation**, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 727-739, 10 out. 2023. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2023.2262040.

JAWAD, A. H.; JUMADI, S. N.; WILSON, L. D.; ALOTHMAN, Z. A. Optimization of methylene blue removal by H3PO4 thermochemically treated mixed pineapple peel and algae adsorbent and insight on the adsorption mechanism. **Biomass Conversion And Biorefinery**, [S.L.], v. 15, n. 7, p. 10225-10239, 4 jun. 2024. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s13399-024-05787-9.

KANT, R. Textile dyeing industry an environmental hazard. **Natural Science**, [S.L.], v. 04, n. 01, p. 22-26, 2012. Scientific Research Publishing, Inc.. http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.41004.

KIM, Y. et al. Arsenic removal using mesoporous alumina prepared via a templating method. Environmental Science and Technology, v. 38, n. 3, p. 924-931, dez. 2004.

KIM, J.Y.; KIM, H.B.; KWON, D.; TSANG, Y.F.; NAM, I.H.; KWON, E.E.. Establishment of circular economy by utilising textile industry waste as an adsorbent for textile dye removal. **Environmental Research**, [S.L.], v. 262, p. 119987, dez. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2024.119987.

MARINHO, P.R.M.; PEQUENO, L.A.B.; BEZERRA, D.E.; MEDEIROS, R.R.; NASCIMENTO, R.S. Resolução CONAMA no 430/2011: Estudo de caso da não conformidade de lançamento de efluentes de uma indústria têxtil localizada no município de Campina Grande – PB. I Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade – III Congresso Internacional de Diversidade do Semiárido, 2019.

MARQUES, A. V. S. Caracterização estrutural e térmica da casca de ovo: Avaliação preliminar do seu potencial na remoção de corantes têxteis**.** 2025. 52p. Relatório de Estágio. Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba. 2025.

NASCIMENTO, R. F. et al. Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária - UFC, 2014.

NASCIMENTO, R. F. et al. Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária – 2 ed. - UFC, 2020.

NUHOGLU, Y.; MALKOC, E.. Thermodynamic and kinetic studies for environmentaly friendly Ni(II) biosorption using waste pomace of olive oil factory. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 100, n. 8, p. 2375-2380, abr. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.016.

OLIVEIRA, F. F. de; MOURA, K. O.; COSTA, L. S.; VIDAL, C. B..; LOIOLA, A. R.; NASCIMENTO, R. F. do. Reactive Adsorption of Parabens on Synthesized Micro- and Mesoporous Silica from Coal Fly Ash: ph effect on the modification process. **Acs Omega**, [S.L.], v. 5, n. 7, p. 3346-3357, 11 fev. 2020. American Chemical Society (ACS). http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.9b03537.

PASIECZNA-PATKOWSKA, S.; CICHY, M.; FLIEGER, J. Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in Characterization of Green Synthesized Nanoparticles. **Molecules**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 684, 4 fev. 2025. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/molecules30030684.

RAFATULLAH, M..; SULAIMAN, O.; HASHIM, R.; AHMAD, A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 177, n. 1-3, p. 70-80, maio 2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047.

ROBINSON, T.; MCMULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 77, n. 3, p. 247-255, maio 2001. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00080-8.

ROSA, L. H. F. **Novos derivados do azul de metileno como potenciais fotossensibilizadores para terapia fotodinâmica em câncer de mama triplo negativo**. 2025. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

ROSLI, N. A.; AHMAD, M. A.; NOH, T. U.; AHMAD, N. A. Pineapple peel–derived carbon for adsorptive removal of dyes. **Materials Chemistry And Physics**, [S.L.], v. 306, p. 128094, set. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128094.

ROSLI, N. A.; AHMAD, M. A.; NOH, T. U. Nature's waste turned savior: optimizing pineapple peel‐based activated carbon for effective remazol brilliant violet dye adsorption using response surface methodology. **Inorganic Chemistry Communications**, [S.L.], v. 153, p. 110844, jul. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110844.

SILVA, F.; NASCIMENTO, L.; BRITO, M.; SILVA, K.; PASCHOAL, W.; FUJIYAMA, R. Biosorption of Methylene Blue Dye Using Natural Biosorbents Made from Weeds. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 15, p. 2486, 5 ago. 2019. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/ma12152486.

SOUZA, K. C.; ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T. Adsorção Do Corante Reativo Azul 19 Em Solução Aquosa Por Lama Vermelha Tratada Quimicamente Com Peróxido De Hidrogênio. Quim. Nova, v. 5, n. 36, p.651-656, 2013.

SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 470 p. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, v. 1. ISBN 978-85-423-0053-6.

TEIXEIRA, C. A. D. (ed.). **Sistema de produção para a cultura do abacaxi no Estado de Rondônia**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2020.

TIAN, Y.; HUANG, R.; CHEN, Y.; WANG, T.; WU, J.; WANG, S. The preparation and characterization of pineapple peel cellulose nanofibers and its application in oil-water emulsions. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 353, p. 123245, abr. 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123245.

TRAN, H N. Adsorption Technology for Water and Wastewater Treatments. **Water**, [S.L.], v. 15, n. 15, p. 2857, 7 ago. 2023. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/w15152857.

WANG, H.; LIU, R.; YUE, J.; ZHAO, W.; CHEN, Y. Removal of methylene blue by Zn-Al layered double oxide/magnetic biochar derived from waste pineapple peel. **Biomass Conversion And Biorefinery**, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 7903-7913, 19 jul. 2024. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s13399-022-02998-w.

ZENG, Z.; LI, Q.; YAN, J.; HUANG, L.; ARULMANI, S. R. B.; ZHANG, H.; XIE, S.; SIO, W. The model and mechanism of adsorptive technologies for wastewater containing fluoride: a review. **Chemosphere**, [S.L.], v. 340, p. 139808, nov. 2023. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139808.