



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CÂMPUS DE PALMAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

ANNAYDY MARTINS BORGES

**ACETATO DE QUITOSANA COMO ADSORVENTE NATURAL PARA REMOÇÃO
DE FERRO EM ÁGUA**

Palmas - TO

2025

ANNAYDY MARTINS BORGES

**ACETATO DE QUITOSANA COMO ADSORVENTE NATURAL PARA REMOÇÃO
DE FERRO EM ÁGUA**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador (a): Dr Emerson Adriano Guarda

Palmas - TO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- M386a Martins Borges, Annaydy.
ACETATO DE QUITOSANA COMO ADSORVENTE NATURAL PARA
REMOÇÃO DE FERRO EM ÁGUA. / Annaydy Martins Borges. – Palmas, TO,
2025.
39 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2025.
Orientador: Emerson Adriano Guarda

1. Quitosana. 2. Adsorção. 3. Tratamento de água. 4. Eficiência de
Remoção. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da
UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**


ANNAYDY MARTINS BORGES

**ACETATO DE QUITOSANA COMO ADSORVENTE NATURAL PARA REMOÇÃO
DE FERRO EM ÁGUA**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.


Data de aprovação: 21 / 11 / 2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON ADRIANO GUARDA**
Data: 09/12/2025 10:08:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda

Orientador - UFT

Documento assinado digitalmente
 **PATRICIA MARTINS GUARDA**
Data: 05/12/2025 08:33:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Patrícia Martins Guarda

Professor Convidado - UFT

Documento assinado digitalmente
 **ALVARO ALVES MARTINS**
Data: 09/12/2025 10:34:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Álvaro Alves Martins

Professor Convidado – UFT

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que foi quem me sustentou nesses mais de seis anos de curso, sem a misericórdia Dele eu não estaria aqui. Em segundo lugar eu quero agradecer aos meus pais, que são os maiores incentivadores desse sonho, que sempre me apoiaram e me ajudaram financeiramente, mesmo sem muitos recursos. Mãe, obrigada por me levar tantos quilômetros de bicicleta até aquela escolinha rural no Mato Grosso. Pai, obrigada por sempre pensar na minha educação ao escolher onde trabalhar. Sei o quanto foi difícil, e sou grata por tudo que fizeram por mim.

Em especial quero agradecer a minha irmã, que foi e sempre será meu maior alicerce aqui em Palmas, ela é quem mais me incentiva a realizar todos os meus sonhos e nos momentos mais difíceis sempre esteve comigo. Obrigada Beatriz (psicóloga) por todo apoio emocional nesses últimos dias. Não posso deixar de citar a todos que colaboram no LAPEQ, esse laboratório que por anos foi minha casa, meu espaço de pesquisa e de muitas alegrias vividas.

Um agradecimento especial ao Fabrício, meu companheiro fiel de desligar minhas amostras e de me fazer sorrir sempre. Mayana obrigada pelas amostras de água contendo ferro que você disponibilizou pra mim, foi muito importante para realização desse trabalho. Obrigada Yuri por me ensinar a fazer o delineamento experimental, Aryson, obrigada por desligar o agitador magnético sempre que eu não estava e obrigada Wanderson por fazer o mesmo e ser meu companheiro de fofocas. Larissa você também faz parte disso, obrigada por tudo. Obrigada Álvaro, sem sua ajuda meu PIBIC não teria sido realizado.

Um agradecimento especial ao meu orientador, obrigada por tudo professor Emerson, durante anos eu fui sua orientanda e tenho o senhor guardado no meu coração, obrigada por ter me aceitado um dia no LAPEQ. Não posso deixar de agradecer a professora Patrícia, que foi e sempre será como uma mãe para mim, obrigada por cada puxão de orelha, por cada ensinamento de vida passado e por me acolher no laboratório.

E por último não posso deixar de agradecer a minha universidade que tanto amo, obrigada UFT, você foi minha casa por muitos anos e eu sempre lembrarei com amor de tudo que vivi nesses blocos. Obrigada motorista do 90 (Márcio) que passei a conversar durante as viagens para UFT, você tornou meus dias mais leves.

RESUMO

A água é um recurso natural essencial à vida, sendo amplamente utilizada em diversas atividades humanas, porém sua utilização de maneira demasiada, compromete sua qualidade e disponibilidade. Adsorventes, derivados de resíduos de matérias primas naturais, surgem como uma alternativa para substituição de polímeros sintéticos utilizados diariamente em estações de tratamento de água. O presente trabalho avaliou a eficiência do acetato de quitosana como adsorvente natural para remoção de ferro em água. Os ensaios de adsorção foram realizados variando-se a massa do adsorvente (0,5 a 1 g/L) e o tempo de contato (17 a 60 min), com o objetivo de determinar a eficiência de remoção de ferro presente na amostra. Os resultados demonstraram que o adsorvente apresentou elevada capacidade de remoção, atingindo 97% de eficiência de remoção. Afim de determinar as melhores condições de aplicação do adsorvente realizou-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) que indicou que as variáveis estudadas não apresentaram influência significativa ($p < 0,05$) sobre a resposta. A ausência de significância estatística sugere que outros fatores não controlados experimentalmente podem ter influenciado os resultados.

Palavras-chave: Quitosana. Adsorção. Tratamento de Água. Eficiência de Remoção.

ABSTRACT

Water is an essential natural resource for life and is widely used in various human activities; however, its excessive use compromises both its quality and availability. Adsorbents derived from natural raw material residues have emerged as an alternative to replace synthetic polymers commonly used in water treatment plants. This study evaluated the efficiency of chitosan acetate as a natural adsorbent for iron removal in water. Adsorption tests were conducted by varying the adsorbent mass (0.5 to 1 g/L) and contact time (17 to 60 min) to determine the iron removal efficiency in the sample. The results showed that the adsorbent exhibited a high removal capacity, achieving 97% efficiency. In order to determine the best conditions for the adsorbent's application, a central composite rotational design (CCRD) was carried out, which indicated that the studied variables did not show significant influence ($p < 0.05$) on the response. The lack of statistical significance suggests that other factors not experimentally controlled may have influenced the results.

Key-words: Chitosan. Adsorption. Water Treatment. Removal Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Terminologia da adsorção.....	16
Figura 2- Estrutura da quitina (a); e após desacetilação tem-se a quitosana (b)	18
Figura 3 - Espectroscopia do Acetato de Quitosana	23
Figura 4 - Gráfico de Pareto	27
Figura 5 - Gráfico de valores Experimentais x Preditos	29
Figura 6 - a) Superfície de reposta 3D e b) Superfície de resposta 2D	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	Ferro	12
3.2	Importância do Estudo do Ferro	12
3.3	Determinação da Concentração de Ferro na Água	13
3.4	Legislação para Ferro, Valores Máximos Permitidos	14
3.5	Métodos para Remoção de Ferro.....	14
3.6	Adsorção.....	15
3.7	Adsorventes Naturais.....	17
3.8	Quitosana.....	17
4	METODOLOGIA.....	19
4.1	Formulação e Preparo do Adsorvente	19
4.2	Análise Infravermelho	19
4.3	Ensaio de Adsorção com Acetato de Quitosana.....	20
4.4	Eficiência de Remoção de Ferro.....	21
4.5	Planejamento e Estatística dos Dados de Teste do Acetato de Quitosana no Tratamento de Água com Ferro.....	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1	Espectroscopia no Infravermelho para o Acetato de Quitosana.....	23
5.2	Análise Interação de Massa do Adsorvente e Tempo de Contato no Processo de Adsorção.....	25
6	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais abundante em nosso planeta, está presente nos ecossistemas e é essencial para nossa sobrevivência. Seu uso é frequente em várias atividades, seja nas indústrias, fornecimento de energia, uso doméstico, agricultura e outros. Porém sua utilização tem sido feita de maneira demasiada, prejudicando assim a qualidade e abundância dos recursos hídricos (Mendonça, 2023).

Desse modo, as indústrias passaram a utilizar a água como um recurso essencial para suas atividades produtivas, o que resultou em um aumento significativo na demanda ao longo dos anos. Conseqüentemente, grandes quantidades de substâncias prejudiciais são lançadas diariamente em corpos hídricos (Chaves, 2021).

Nos efluentes de indústrias metalúrgicas encontram-se concentrações elevadas de ferro, o que ocorre principalmente devido às atividades de remoção da camada oxidada (ferrugem) das peças antes de serem utilizadas. Esse processo, chamado decapagem, geralmente é realizado mergulhando a peça em um banho ácido (CETESB, 2018). Em efluentes provenientes da extração de carvão mineral e do processo de galvanização, também são encontrados elevados teores desse metal (Wesler, *et al.* 2021).

Embora o ferro não seja altamente tóxico, seu descarte incorreto em mananciais com altas concentrações, sem o tratamento adequado, pode gerar diversos impactos negativos no corpo hídrico receptor e comprometer o abastecimento público (Cechinel, 2024).

O carbonato ferroso é solúvel e comumente presente em águas de poços com altas concentrações de ferro. Em águas superficiais, os níveis de ferro se elevam durante as estações chuvosas devido ao transporte de sedimentos e à erosão das margens. Em uso doméstico confere cor e altera o sabor da água, podendo causar manchas em roupas e utensílios sanitários. Nas águas destinadas ao abastecimento público, o uso de coagulantes à base de ferro resulta em um aumento no seu teor (CETESB, 2018).

Entre os vários métodos de tratamento de água e efluentes disponíveis, a adsorção tem sido amplamente utilizada para eliminar diferentes substâncias presentes na água, especialmente aquelas que são de difícil biodegradação (Oliveira, 2020). Pesquisas têm mostrado resultados positivos quanto à adsorção para remoção de metais, agrotóxicos, sais, dentre outras substâncias, no tratamento de água (Cechinel, 2024; Wesler, *et al.* 2021; Fernandes, 2021).

Adsorventes, derivados de resíduos de matérias primas, como carvão ativado, quitosana, casca de arroz, bagaço de cana *in natura*, casca de laranja, dentre outros, surgem como uma

alternativa para substituição de polímeros sintéticos utilizados diariamente em estações de tratamento de água (Cechinel, 2024; Ismail, *et al.* 2019; Fernandes, 2021).

O principal desafio ambiental enfrentado por essas estações está associado aos resíduos gerados durante o processo de tratamento, provenientes das descargas do decantador ou flotor e da lavagem dos filtros, nos quais há o emprego desses polímeros para remoção da contaminação presente (Ismail, *et al.* 2019).

A adsorção é um processo de transferência de massa que examina a capacidade de certos sólidos em atrair e reter, em sua superfície, determinadas substâncias presentes em fluidos líquidos ou gasosos, permitindo a separação dos componentes desses fluidos (Nascimento, 2014).

Esse processo é visto como complexo e depende, em grande parte, das condições experimentais, como o pH, a concentração do poluente, a quantidade e o tamanho das partículas do adsorvente, a temperatura, além do tipo e da estrutura do adsorbato (Júnior, 2022).

Pesquisas tem mostrado que a utilização da quitosana (β -(1-4)-D-glucosamina) como adsorvente/coagulante natural tem sido eficiente na remoção de contaminantes. Derivada da quitina, obtida por desacetilação química, a quitosana é um polímero natural, não tóxico e, devido à presença dos grupos -NH_2 e -OH em sua estrutura, possui propriedades que permitem uma ampla aplicação (Silva, *et al.* 2022; Freire, *et al.* 2018).

É amplamente encontrada na natureza por ser derivada do exoesqueleto de crustáceos, como o camarão, cuja atividade gera grande volume de resíduos. Apresenta baixo custo e se destaca como uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável para o tratamento de efluentes e águas residuárias (Otto, *et al.* 2022).

Por outro lado, a quitosana em sua forma natural possui porosidade e área superficial inferiores às dos adsorventes comerciais, além de apresentar solubilidade em meios ácidos, o que limita sua aplicação direta em processos de adsorção. Dessa forma, modificações na estrutura da quitosana mostram-se uma alternativa eficaz para superar essas limitações e melhorar seu desempenho como material adsorvente (Machado, *et al.* 2021).

Este estudo busca produzir um adsorvente a base de quitosana modificada, para a adsorção de ferro presentes na água, analisando sua eficiência quantitativa de remoção e investigando a influência dos valores ótimos de quantidade de massa do adsorvente (g/l) e tempo de contato (minutos) para sua melhor aplicabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do acetato de quitosana como adsorvente para remoção de ferro presente na água.

2.2 Objetivos Específicos

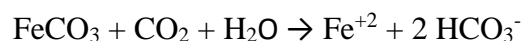
1. Obter e caracterizar o acetato de quitosana como adsorvente;
2. Aplicar o modelo estatístico superfície de resposta para otimização de parâmetros que influenciam na adsorção;
3. Determinar o percentual de remoção do ferro pelo processo de adsorção tendo o acetato de quitosana como adsorvente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ferro

O ferro é um metal amplamente conhecido, tanto por sua vasta distribuição na superfície terrestre quanto por sua utilização. Suas fontes antropogênicas incluem indústrias, mineração, esgotos domésticos e fertilizantes agrícolas. O ferro presente na água provém principalmente dos solos e rochas, sendo o elemento de maior concentração nesse meio (Santos, *et al.* 2018).

É comumente encontrado em águas naturais, tanto superficiais quanto subterrâneas, aparecendo nas formas insolúvel (Fe^{+3}) e dissolvida (Fe^{+2}), como óxidos, silicatos, carbonatos, cloretos, sulfatos e sulfitos. A forma dissolvida é mais comum em águas subterrâneas de poços artesianos e no fundo de lagos e reservatórios de acumulação, onde os níveis de oxigênio dissolvido são baixos. A equação abaixo ilustra a forma usual do ferro em águas subterrâneas (Libânio, 2010):



Em águas superficiais, a ausência de oxigênio nas camadas mais profundas dos reservatórios de acumulação ocorre devido à decomposição de matéria orgânica, o que facilita a dissolução do ferro que antes estava precipitado. Além disso, esse metal pode se ligar à matéria orgânica, o que, embora não altere de forma significativa os mecanismos de remoção, pode promover a formação de subprodutos quando a pré-desinfecção é realizada com compostos de cloro (Libânio, 2010).

Em águas tratadas para o abastecimento público, o emprego de coagulantes a base de ferro provoca elevação em seu teor (CETESB, 2016).

3.2 Importância do Estudo do Ferro

Em altos níveis na rede de distribuição, o ferro pode causar o acúmulo de depósitos nas tubulações e favorecer o crescimento de ferro-bactérias, resultando em contaminação biológica na água (CETESB, 2016).

O crescimento desses microrganismos, geralmente devido à desinfecção inadequada e à remoção ineficaz de ferro, leva à formação de incrustações significativas nas paredes das tubulações. Essas incrustações são causadas tanto pela biomassa quanto pelas formas insolúveis desse metal. Como resultado, ocorre uma diminuição substancial na capacidade de escoamento

das adutoras e redes de distribuição, além de provocar alterações indesejáveis na cor, odor e sabor da água destinada ao consumo (Libânio, 2010).

No abastecimento público o excesso de ferro deve ser controlado pois provoca danos significativos no organismo, especialmente no fígado e em outros tecidos. Esse acúmulo pode aumentar o risco de câncer e, conforme estudos indicam, há uma relação entre intoxicação por ferro e o desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como o Mal de Parkinson (Santos, *et al.* 2018).

3.3 Determinação da Concentração de Ferro na Água

Para determinar a concentração de ferro na água, alguns métodos analíticos são utilizados, como a Espectrofotometria de Absorção Molecular, Espectrometria Óptica por Plasma Indutivamente Acoplado e Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (Costa, 2018 e Franco, *et al.* 2001).

A Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) é uma técnica amplamente empregada para a análise de metais pesados, como o ferro, devido à sua precisão em detectar concentrações na faixa de partes por milhão (ppm). O procedimento envolve a atomização da amostra em um estado gasoso e a medição da absorção de luz em comprimentos de onda específicos para o elemento analisado (Costa, 2018 e Franco, *et al.* 2001).

Na Espectrometria de Absorção Molecular na região UV-Visível envolve a medição da absorvância de luz pela amostra após a formação de um complexo colorido com reagentes específicos, como a fenantrolina. Para o ferro, a absorção é normalmente medida a um comprimento de onda de 508 nm. Este método é considerado de baixo custo, robusto e sensível, sendo amplamente utilizado em estudos de qualidade da água (Pfeifer, *et al.* 2012; Franco, *et al.* 2001 e Andrade 2024).

A Espectrometria Óptica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES), consiste em introduzir a amostra líquida em um plasma de argônio a alta temperatura, onde os átomos e íons são excitados e emitem radiação em comprimentos de onda específicos. Essa radiação é detectada pelo espectrômetro e sua intensidade é proporcional à concentração do elemento presente (Freitas, *et al.* 2021).

3.4 Legislação para Ferro, Valores Máximos Permitidos

Altas concentrações de ferro em águas superficiais são comuns no Brasil devido à geologia rica em minerais como magnetita, biotita, pirita, piroxênios e anfibólios e raramente excedem 1,0 mg/L. A presença de ferro também pode ser atribuída a materiais orgânicos, incluindo restos de plantas e depósitos de detritos que interagem com a água. Em regiões de descarga de efluentes industriais e em áreas com atividades agropecuárias as concentrações tendem a ser maiores (Santos, *et al.* 2018; Vasconcelos, 2018 e Libânio, 2010).

A portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que é a portaria vigente, regula os padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Ela estabelece um limite máximo de ferro permitido para a concentração na água potável, que é de 0,3 mg.L⁻¹ (Brasil, 2021).

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) nº 357/2005 dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, além de estabelecer condições e padrões de lançamento de efluentes. Para águas doces de classe 1, o limite de concentração de ferro total é de 0,3 mg/L, que é similar ao padrão de potabilidade (Brasil, 2005).

Já para águas de classes inferiores (como classe 2 ou 3), os limites podem ser mais flexíveis, considerando os usos específicos para cada classe (irrigação, recreação, abastecimento etc.) (Brasil, 2005).

A Resolução Conama nº 430/2011 que complementa e altera a Resolução 357/2005, estabelece que o limite máximo para a concentração do ferro dissolvido em efluentes lançados no corpo hídrico é de 15,0 mg/L (Brasil, 2011).

3.5 Métodos para Remoção de Ferro

A remoção de ferro pode ser realizada por aeração, que consiste na introdução de ar na água, aumentando o teor de oxigênio dissolvido, para favorecer a oxidação à forma insolúvel, coagulação ou pré-desinfecção com compostos de cloro (Libânio, 2010 e EMBRAPA, 2011).

No tratamento de águas destinadas ao abastecimento público, é importante destacar a presença de ferro durante as etapas de coagulação e floculação. As águas contendo ferro tipicamente apresentam alta coloração e baixa turbidez. Os flocos formados nessas condições são geralmente pequenos, conhecidos como “pontuais”, e têm baixa velocidade de sedimentação (CETESB, 2016).

Em muitas estações de tratamento de água, esse problema é solucionado com a aplicação de cloro, processo chamado de pré-cloração. A oxidação do ferro pelo cloro permite a formação de flocos maiores, o que melhora a eficiência operacional da estação (CETESB, 2016; EMBRAPA, 2011 e Libânio, 2010).

Contudo, segundo conceitos clássicos, a pré-cloração deve ser evitada sempre que possível, pois, na presença de certos compostos orgânicos conhecidos como precursores, o cloro pode reagir e formar trihalometanos, substâncias associadas ao risco de câncer (CETESB, 2016 e Libânio, 2010).

Outros estudos têm utilizado a Ozonização, método de tratamento em que o ozônio é utilizado para oxidar o ferro dissolvido e após a ozonização, a água passa por um processo de filtração usando areia fina e grossa para remover os precipitados formados (Klafke, 2023).

A utilização de resíduos agroindustriais e compostos orgânicos, como bagaço de cana-de-açúcar, casca de laranja e quitosana, têm sido utilizados em estudos para o tratamento de efluentes contendo metais, como o ferro. Esse método é valorizado por sua alta eficiência na remoção de íons metálicos e pelo baixo custo associado aos materiais (Cechinel, 2024; Toledo, 2020 e Azevedo, 2007).

3.6 Adsorção

A contaminação da água por diversos poluentes orgânicos e inorgânicos, incluindo metais tóxicos, BTEX, HPAs, ânions e outros compostos, gerou a necessidade de desenvolver tecnologias para a remoção desses contaminantes presentes em resíduos líquidos e gasosos. Essas substâncias, mesmo em quantidades mínimas, geralmente apresentam resistência a processos de degradação biológica ou não são eliminadas de forma eficaz pelos métodos de tratamento físico-químicos convencionais (Nascimento, *et al.* 2020).

A adsorção passou a ser um dos métodos mais utilizados para esse propósito, consolidando-se nas últimas décadas como um processo essencial de separação e purificação. Desde o início do século, esse método tem atraído o interesse de pesquisadores devido à sua relevância tecnológica e biológica, além de possuir aplicações práticas na indústria e na proteção do meio ambiente. Assim, a adsorção se tornou uma ferramenta valiosa em diversos setores (Nascimento, *et al.* 2020).

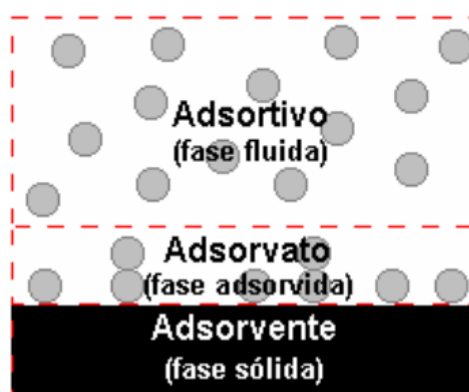
A adsorção é um processo de transferência de massa que examina a capacidade de determinados sólidos em acumular, em sua superfície, substâncias presentes em fluidos líquidos ou gasosos, facilitando assim a separação dos componentes desses fluidos. Como os

componentes adsorvidos se concentram na superfície externa do material, uma maior área superficial por unidade de massa do sólido favorece o processo de adsorção (Cechinel, 2024).

Por esse motivo, os adsorventes são, em sua maioria, sólidos com partículas porosas (Ruthven, 1984).

O adsorvente é definido como a fase sólida onde ocorre o processo de adsorção. Já o adsorvivo refere-se à substância ou mistura presente na fase fluida, que entra em contato com o adsorvente e possui potencial para ser adsorvida. Por sua vez, o adsorvato (ou adsorbato) é o material capturado e retido pelo adsorvente durante a adsorção (Cunha, 2009). A figura 1 a seguir ilustra esse processo:

Figura 1 - Terminologia da adsorção



Fonte: Adaptado de Vieira, 2008.

Compreender um processo de adsorção exige o conhecimento tanto de suas propriedades de equilíbrio quanto de sua cinética. A cinética, em essência, refere-se às alterações nas características químicas ou físicas do processo ao longo do tempo. Por outro lado, a análise do equilíbrio descreve o estado para o qual o sistema naturalmente evolui, sendo crucial para avaliar a afinidade e a capacidade do adsorvente (Vieira, 2008).

A adsorção pode ser dividida em dois tipos, dependendo da intensidade das forças envolvidas: adsorção física e adsorção química. Na adsorção física, a ligação do adsorvato à superfície do adsorvente ocorre por meio de interações relativamente fracas, geralmente associadas às forças de van der Waals, que se assemelham às forças de coesão entre moléculas. Em contraste, a quimissorção envolve ligações químicas significativamente mais fortes, formadas por meio da troca ou compartilhamento de elétrons entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente, resultando em novos tipos de ligação (Nascimento, et al. 2020 e Cunha, 2009).

Os fenômenos de adsorção decorrem de uma interação combinada entre as forças responsáveis pela adsorção física e química. Diversos fatores afetam esse processo, incluindo a área superficial do adsorvente, as características do adsorvente e do adsorbato, a temperatura do sistema, a natureza do solvente e o pH do meio (Júnior, 2022).

3.7 Adsorventes Naturais

Todos os métodos de tratamento possuem limitações técnicas e econômicas quando aplicados na prática, porém a adsorção destaca-se por oferecer vantagens importantes, como facilidade e flexibilidade na utilização, desempenho versátil, viabilidade econômica e baixo consumo de energia (Oliveira, 2020).

Estudos recentes têm mostrado a eficiência de adsorventes derivados de resíduos agroindustriais, como a cinza da casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, casca de laranja, bambu *in natura*, dentre outros. Esses materiais vêm se destacando como alternativas sustentáveis e econômicas no tratamento de efluentes (Júnior, 2022; Cechinel, 2024; Bertacco, 2019; Fonseca, 2021).

Dentre os inúmeros materiais que podem ser empregados, o carvão ativado se destaca principalmente para remoção de compostos orgânicos e tóxicos de efluentes industriais. Esses materiais são bastante utilizados em estudos para remoção de metais pesados devido à sua alta disponibilidade e baixo custo (Guelfi, 2007 e Fonseca, 2021).

Algumas pesquisas são conduzidas para melhorar a utilização de adsorventes de baixo custo em escala industrial. A principal razão por trás desse esforço é reduzir os custos elevados associados ao tratamento de efluentes industriais, devido ao grande volume produzido e à diversidade de substâncias presentes nessas águas residuais (Bertacco, 2019).

3.8 Quitosana

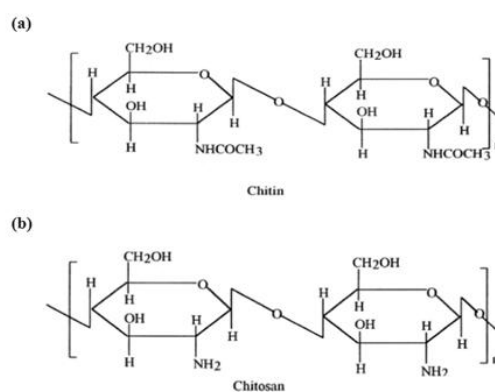
A quitosana é um polímero natural de grande interesse científico e tecnológico, por ser um material sustentável, biodegradável e economicamente viável. Sua versatilidade permite aplicações em diversos segmentos, como na indústria de alimentos, no tratamento de efluentes e na preservação de produtos alimentícios (Azevedo, 2007; Barroso, 2022).

Juntamente com outros compostos derivados de polissacarídeos com estrutura química semelhante à celulose, a quitosana têm sido amplamente estudada como adsorvente. Derivada da quitina que é um biopolímero natural abundante, encontrado principalmente no exoesqueleto

de crustáceos, em alguns artrópodes e na parede celular de alguns fungos. Sua obtenção é feita a partir da desacetilação da quitina. Inicialmente tem sido utilizada como adsorvente para íons metálicos, mas sua versatilidade permite também seu uso na remoção de corantes e outros contaminantes (Cunha, 2009; Martínez, *et al.* 2022; Silva *et al.* 2022).

A cadeia polimérica da quitina é formada, em sua maioria, por unidades repetitivas de β -(1-4)-2-acetamido-D-glucose. Por outro lado, a quitosana contém pelo menos 60% de unidades de β -(1-4)-2-amino-D-glucose, resultantes do processo de desacetilação da quitina (Filho, 2018). A figura 2 apresenta a estrutura da quitosana após a desacetilação da quitina.

Figura 2: Estrutura da quitina (a); e após desacetilação tem-se a quitosana (b)



Fonte: Kumar & Majeti, 2000).

O grau de desacetilação é um fator determinante para as propriedades adsorventes da quitosana, pois regula a quantidade de grupos amino livres disponíveis para interagir com íons em solução. Comparada à quitina, a quitosana apresenta uma capacidade de adsorção de cinco a seis vezes superior (Bernardi, 2022; Martínez, *et al.* 2022).

A quitosana não é solúvel em água, mas pode ser dissolvida em soluções aquosas diluídas de ácidos orgânicos, como os ácidos acético, fórmico e cítrico, assim como em ácidos inorgânicos, como o ácido clorídrico diluído, formando soluções de alta viscosidade. Sua solubilidade está diretamente ligada à presença de grupos amino protonados ($-\text{NH}_3^+$) na cadeia polimérica. Quanto maior a quantidade desses grupos, maior será a repulsão eletrostática entre as cadeias e a solvatação em água (Bernardi, 2022; Martínez *et al.* 2022).

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada consistiu no preparo e na formulação do acetato de quitosana, análise de infravermelho, ensaios de adsorção, planejamento experimental e estatística dos dados dos testes com o adsorvente na água com ferro analisando a influência dos parâmetros: massa do adsorvente (g/l) e tempo de contato (min) na adsorção.

Os testes de adsorção foram realizados no Campus Universitário de Palmas, da Fundação Universidade Federal do Tocantins (UFT), no Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e Biocombustíveis (LAPEQ), durante o segundo semestre de 2025.

A amostra de água utilizada nas análises já estava disponível no laboratório, proveniente de serviços prestados a terceiros. Ela foi mantida armazenada sob refrigeração, a fim de preservar suas características físico-químicas e biológicas.

4.1 Formulação e Preparo do Adsorvente

A obtenção dos produtos aplicados no estudo foi uma adaptação da metodologia apresentada por Saboia (2017) que utilizou biomassas que tiveram suas características adsorventes potencializadas através da ativação por acetato.

Nos estudos foram produzidos o acetato de quitosana, utilizando a quitosana industrial seca disponível no laboratório, na proporção de 5g de biomassa dispersa em 200 mL de ácido acético diluído (1%).

Essas misturas foram agitadas em média a 400 RPM durante 24 horas a temperatura de 60° C em aquecedor e agitador magnético marca FISATOM, modelo 753A, com a finalidade de aumentar a reatividade dos grupos funcionais.

Posteriormente ao processo de agitação, em razão do tempo e temperatura a solução evaporou e obteve-se uma massa de adsorvente retida no fundo do béquer, e esta foi submetida a um período de repouso para atingir a temperatura ambiente, logo após foi feita a trituração da massa, com almofariz e mão de gral a fim de diminuir o tamanho das partículas aumentando a superfície de contato no tratamento.

4.2 Análise Infravermelho

Os espectros vibracionais na região do Infravermelho da quitosana pura e após a formação do acetato de quitosana foram obtidos utilizando-se a técnica de Espectroscopia de

Infravermelho, em espectrômetro modelo FTIR CARY 630 da marca Agilent Technologies, com faixa de varredura de 400 a 4000 cm^{-1} .

4.3 Ensaio de Adsorção com Acetato de Quitosana

Os ensaios utilizados tiveram como referência a metodologia aplicada por Moreira (2010), adaptada por Saboia (2017) e ocorreram da seguinte forma:

Foram medidos 100 ml da amostra de água bruta e armazenadas em um erlenmeyer de 250 ml para realização do tratamento;

Em seguida foram adicionados para cada amostra a quantidade de adsorvente determinada no planejamento experimental;

A amostra foi agitada em temperatura ambiente, utilizando a incubadora com agitação orbital da marca Tecnal a 100 RPM em média modelo TE-4200. Os tempos de agitação foram determinados no planejamento experimental;

Após agitação a mistura foi deixada em repouso por um período de 20 minutos, logo depois o material foi filtrado e armazenada em recipiente plástico;

Por fim, realizou-se a análise das amostras em Espectrofotômetro da Marca Hach modelo DR6000, por Espectrometria de Absorção Molecular na região UV-Visível para determinação da concentração de Ferro.

4.4 Planejamento e Estatística dos Dados de Teste do Acetato de Quitosana no Tratamento de Água com Ferro

Nesse estudo utilizou-se o planejamento experimental para quantificar as amostras a serem preparadas, com as variáveis: tempo de contato (min) e massa do adsorvente (g/l). E como variável de resposta para o planejamento foi definido a porcentagem de remoção do ferro.

Para verificar a interação entre os fatores foi realizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), $2^2 + 4$ pontos axiais + 4 pontos centrais, totalizando 11 ensaios. Os intervalos foram escolhidos baseados em testes anteriores e na literatura. A tabela 2 mostra os intervalos utilizados no planejamento, com as variáveis reais e codificadas.

Tabela 1 - Valores utilizados no DCCR para as três variáveis.

Variáveis	Unidade	-1,41	-1	0	1	1,41
Tempo	min	8,09	17	38,5	60	68,9
Massa	g	0,4	0,5	0,75	1,0	1,10

Fonte: Autor, 2025.

Através dos fatores escolhidos para o experimento e dos resultados obtidos, foi possível identificar a influência dos fatores tempo de contato e massa de adsorvente sobre a variável de resposta percentual de adsorção de ferro e calcular os coeficientes de adsorção para ajustar um modelo que possa representar a relação existente entre estes fatores e as respostas obtidas.

A metodologia de superfície de resposta foi utilizada nas amostras como suporte para facilitar as interpretações dos resultados, tendo o objetivo de selecionar os fatores ótimos, para o processamento dos dados foi utilizado o software Protimiza Experimental Design. Para verificar a significância das variáveis realizou-se uma análise de variância (ANOVA).

4.5 Eficiência de Remoção de Ferro

A fim de determinar a eficiência dos adsorventes obtidos, na remoção do sulfato, utilizou-se a equação:

$$Ef (\%) = \frac{CI - CF}{CI} * 100$$

Onde:

Ef = Eficiência de Remoção de ferro, para cada amostra (%);

CI = Concentração Inicial de ferro (g/l);

CF = Concentração Final de ferro (g/l)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para definir as características da amostra de água bruta, foi realizado aferição da concentração de ferro inicial e pH. Tais características são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Características da Água Bruta

Água bruta	Concentração de Ferro	pH
Análise 1	0,86 mg/L	7,34
Análise 2	0,86 mg/L	7,19
Análise 3	0,86 mg/L	7,25
Média		7,26

Fonte: Autor, 2025

A concentração de Ferro encontrada na amostra bruta é superior ao padrão estabelecido na portaria Nº 888 do Ministério da Saúde para consumo humano que é de 0,3 mg.L⁻¹, portanto, torna-se necessário realizar o tratamento com adsorvente afim de diminuir a concentração do contaminante, que ultrapassa os limites máximos permitidos pela legislação.

Pedroso (2016) avaliou que a variação do pH exerce forte influência na adsorção de íons Ni(II), pois altera tanto a carga superficial do adsorvente quanto a especiação do metal na solução. Em meio ácido (pH < 4), a alta concentração de íons H⁺ compete com os íons metálicos pelos sítios ativos, reduzindo a eficiência de remoção. À medida que o pH aumenta, essa competição diminui e a superfície do adsorvente torna-se mais negativa, favorecendo a atração eletrostática com os cátions Ni²⁺. Acima do ponto de carga zero (pH_{p,cz} = 4,4), a adsorção é intensificada, alcançando os maiores percentuais de remoção em meio alcalino (pH > 8), quando também pode ocorrer a formação de hidróxidos metálicos que contribuem para o aumento da eficiência de remoção.

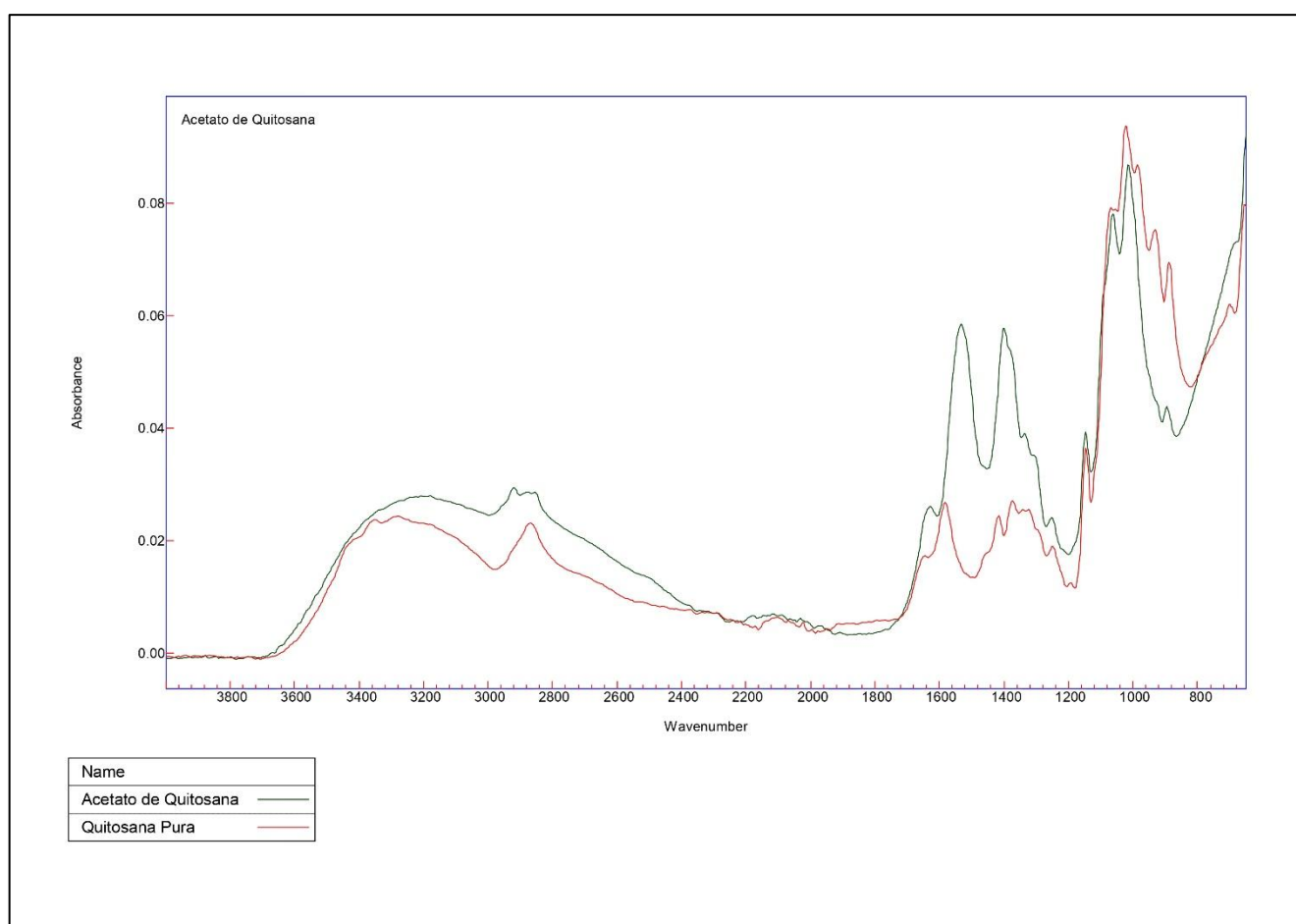
Dessa forma, realizou-se a análise em triplicata do pH da água bruta e, conforme os dados apresentados na Tabela 2, obteve-se um valor médio de 7,26. Esse resultado indica um pH levemente básico, condição que favorece a aplicação do adsorvente acetato de quitosana no tratamento da água.

5.1 Espectroscopia no Infravermelho para o Acetato de Quitosana

Os espectros de infravermelho do acetato de quitosana foram comparados ao da quitosana pura para determinar sua Composição Química.

Signini e filho (2001) observaram em seus estudos que os espectros das amostras de quitosana comercial e na forma de acetato de quitosana estão quase que perfeitamente superpostos o que também foi confirmando na figura 3.

Figura 3 – Espectroscopia do Acetato de Quitosana



Fonte: Autor, 2025

Os picos entre 3500 e 3200 cm⁻¹ das bandas de estiramento dos espectros das amostras são atribuídos às vibrações de estiramentos dos grupos funcionais O-H e/ ou N-H, assim como as ligações de hidrogênio intermoleculares das cadeias do polissacarídeo. A amostra de acetato de quitosana apresentam maior energia do % Absorbancia que a amostra de quitosana devido ao índice de hidratação da amostra (Barroso, 2022).

As bandas entre a região de 2800cm^{-1} e 2900cm^{-1} são ocasionadas às vibrações de estiramento do grupo C-H, respectivamente dos grupos metila pertencentes aos radicais da quitosana, que não foram desacetilados e os radicais metileno existentes na estrutura da quitosana. A região de 1820 a 1630cm^{-1} está associada às vibrações de deformação axial de duplas ligações (C=O) de cloreto de acila e ácidos carboxílicos. Aproximadamente entre 1420 e 500cm^{-1} , pode ser detectado vibrações de deformações axiais e angulares de C-O de ácido carboxílico (1420 e 1200) e C-Cl de halogênio (800 a 600) (Martínez *et al.* 2022).

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Saboia (2017), que identificou alterações semelhantes na formação do acetato de quitosana, e com os padrões espectrais descritos por Machado *et al.* (2021), Barroso (2022) e Martínez-Robinson *et al.* (2022), nos quais as bandas características da quitosana pura aparecem em faixas muito próximas. Assim, a análise FTIR confirma a preservação da estrutura polissacarídica da quitosana e a modificação química promovida pelo ácido acético, resultando na formação do acetato de quitosana, material que mantém os grupos funcionais ativos responsáveis pela sua elevada capacidade de adsorção.

5.2 Análise Interação de Massa do Adsorvente e Tempo de Contato no Processo de Adsorção.

O planejamento experimental teve como objetivo verificar se os fatores massa do adsorvente e tempo de contato exercem influência sobre a variável resposta. A Tabela 3 apresenta o delineamento experimental, com as variáveis codificadas e reais, bem como os resultados obtidos na avaliação da influência desses fatores sobre a eficiência de remoção de ferro da água utilizando acetato de quitosana como adsorvente.

Tabela 3 - Planejamento Experimental com Variáveis Reais e Codificadas.

Ensaio	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais		Eficiência Remoção (%)
	Tempo (min)	Massa (g)	Tempo (min)	Massa (g)	
1	-1	-1	17	0,5	96
2	-1	1	17	1	86
3	1	-1	60	0,5	97
4	1	1	60	1	76
5	0	-1,41	38,5	0,4	56
6	0	1,41	38,5	1,1	16
7	-1,41	0	8,09	0,75	97
8	1,41	0	68,91	0,75	97
9	0	0	38,5	0,75	82
10	0	0	38,5	0,75	70
11	0	0	38,5	0,75	2

Fonte: Autor, 2025

Com a análise da variável resposta na tabela 3 verificamos um destaque na adsorção pelo ensaio 7 quando o fator tempo de contato encontra-se em menor valor e nos ensaios 3, 7 e 8 quando o fator massa do adsorvente encontra-se em maiores concentrações. O adsorvente também apresentou alta eficiência quando ambos os fatores de estudo estão no ponto central.

A água inicial para o tratamento com adsorvente apresentava concentração de 0,86 mg/L de ferro. De acordo com a Legislação Brasileira, o valor máximo permitido desse metal em água para abastecimento humano é de até 0,3 mg.L⁻¹. Valores encontrados nos ensaios 1, 3, 7 e 8 após o tratamento com adsorvente.

Wesler *et al.* (2021) avaliou que a eficiência de remoção de íons de ferro utilizando geopolímero à base de cinza da casca de arroz aumentou com a elevação da dosagem de adsorvente, com valores de 93, 94 e 95% de remoção, para as dosagens de 4 g. L⁻¹, 12 g. L⁻¹ e 20. g L⁻¹, respectivamente. O aumento da quantidade de adsorvente ampliou o número de sítios de adsorção disponíveis e, portanto, a quantidade de Fe adsorvido.

Ries (2019) também avaliou que a dosagem do adsorvente exerceu forte influência na eficiência de remoção de cromo com carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca de arroz. A remoção de cromo aumentou à medida que a quantidade de adsorvente aumentou, atingindo um equilíbrio de ~100% na remoção com 1,5 g. L⁻¹ de adsorvente e um equilíbrio de ~81% na remoção com 7,8 g. L⁻¹. O estudo também avaliou que o tempo de contato com o adsorvente teve forte influência sobre a eficiência de remoção, com eficiência de 100% e 80% nos tempos de 100 min e 180 min respectivamente.

Conforme observado nos ensaios da tabela 3 o aumento da massa do adsorvente e o tempo de contato com o acetato de quitosana também favoreceu as altas remoções de ferro.

Através das respostas obtidas no planejamento foram calculados os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 4. Na qual apresenta os efeitos que são significativos no intervalo de confiança de 5% para a eficiência de remoção de ferro, pelo acetato de quitosana.

Tabela 4 – Coeficientes de Regressão para a Eficiência de Remoção (%)

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	51,33	17,90	2,87	0,0351
x ₁ (Tempo)	-1,12	10,96	-0,10	0,9222
x ₁ ²	28,40	13,04	2,18	0,0814
x ₂ (Massa)	-10,95	10,96	-1,00	0,3638
x ₂ ²	-2,10	13,04	-0,16	0,8782
x ₁ · x ₂	-2,75	15,50	-0,18	0,8661

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos na análise de regressão indicam que nenhum dos fatores avaliados apresentou efeito estatisticamente significativo sobre a eficiência de remoção, considerando o nível de confiança de 95% ($p < 0,05$). Observa-se que apenas a média apresentou significância, o que representa apenas o valor central dos resultados e não um fator experimental. Todos os demais termos, incluindo as variáveis lineares, quadráticas e a interação entre elas, apresentaram p-valores superiores a 0,05, indicando que as variações observadas na eficiência

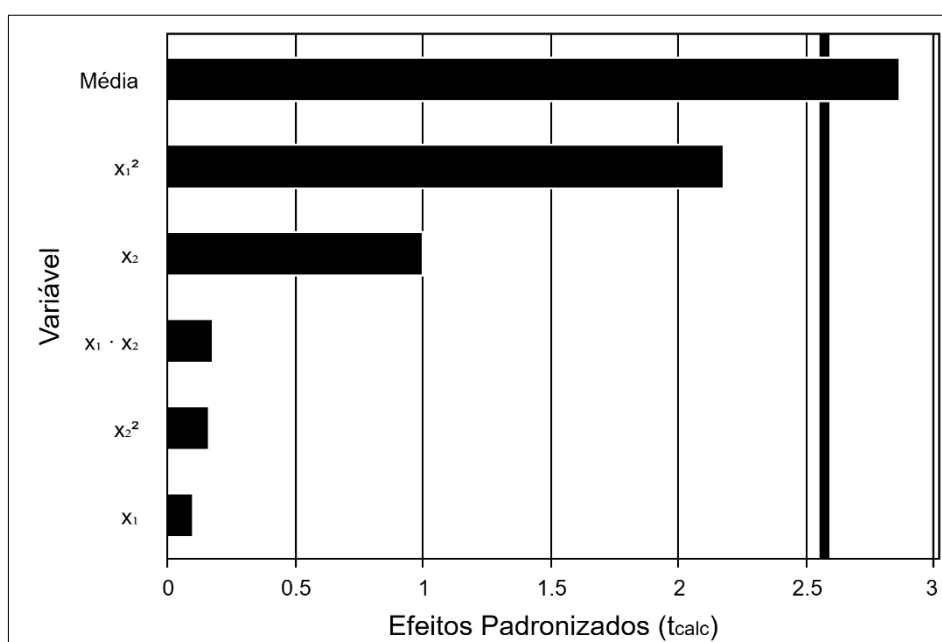
podem ter ocorrido de forma aleatória e não em função dos fatores estudados. A Equação a seguir descreve a Eficiência de Remoção (%) prevista pelo modelo em função das variáveis codificadas.

Equação 1 – Modelo matemático previsto.

$$\text{Eficiência de Remoção (\%)} = 51,33 - 1,12 * \text{Tempo} + 28,40 * \text{Tempo}^2 - 10,95 * \text{Massa} - 2,10 * \text{Massa}^2 - 2,75 * \text{Tempo} * \text{Massa}$$

O gráfico de Pareto (figura 4) mostra as variáveis em ordem de importância para o modelo de regressão. A linha vertical mostra os coeficientes que estão significativos ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Figura 4 – Gráfico de Pareto



Fonte: Autor, 2025

As barras horizontais deste diagrama são construídas com os valores dos efeitos, estas contêm um caráter descritivo que mostra a contribuição de cada efeito sobre a remoção de ferro na água pelo acetato de quitosana. Os valores que estiverem à direita da linha ($p = 0,05$) representam os efeitos estatisticamente significativos.

De acordo com o gráfico os fatores de estudo, massa do adsorvente e tempo de contato, não tiveram efeitos estatisticamente significativos na remoção do ferro na água. Apenas o termo

referente à média ultrapassou a linha de significância, indicando que o modelo reconhece a existência de um valor central consistente para a eficiência de remoção.

As possíveis explicações para esses resultados são que o número de variáveis analisadas pode ter sido insuficiente para identificar quais delas influenciam o processo adsorativo, e que a carga de adsorvente utilizada foi elevada o bastante para interferir na avaliação dos parâmetros (Silva, *et al.* 2022).

A partir das variáveis significativas, efetuou-se uma análise de variância (ANOVA) a um nível de 5% de significância que é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise de Variância (ANOVA)

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	6228,1	5	1245,6	1,3	0,39139
Resíduos	4804,6	5	960,9		
Falta de Ajuste	1082,0	3	360,7	0,2	0,89314
Erro Puro	3722,7	2	1861,3		
Total	11032,7	10			

Fonte: Autor, 2025

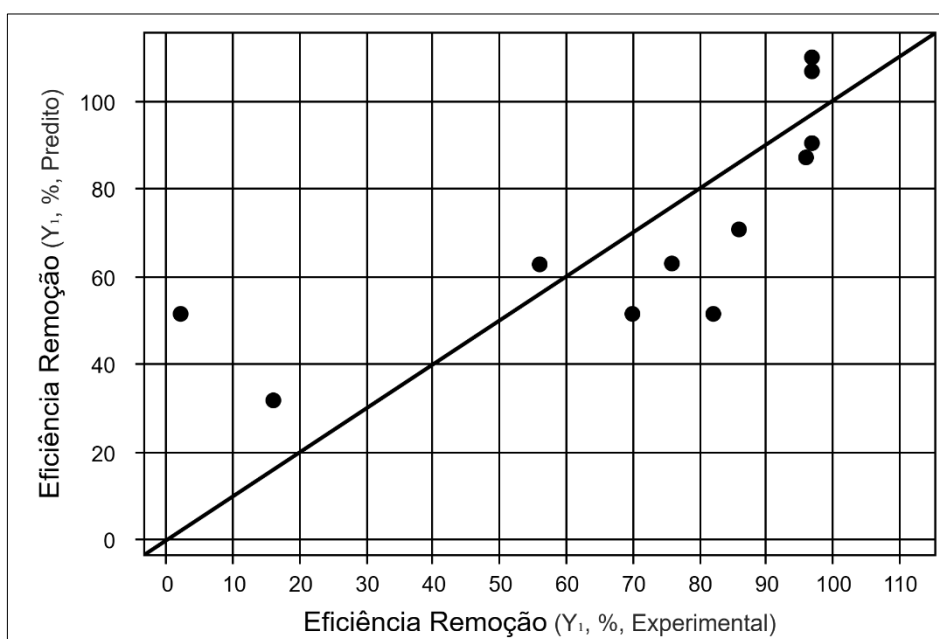
A resposta Eficiência de Remoção (%), o R^2 foi de 56,45%, ou seja, 56,45% dos dados foram bem representados pela regressão (Tabela 4). A análise de variância (ANOVA) indicou que o modelo de regressão ajustado não apresentou significância estatística ($p = 0,391 > 0,05$), evidenciando que as variáveis independentes avaliadas não explicam de forma consistente a variação observada na eficiência de remoção. No entanto, o teste de falta de ajuste apresentou $p = 0,893$, valor superior a 0,05, o que sugere que o modelo não apresenta erro sistemático e se ajusta adequadamente aos dados experimentais. O coeficiente de determinação ($R^2 = 56,45\%$) indica que o modelo explica pouco mais da metade da variabilidade total da resposta, o que reflete uma correlação moderada entre os valores experimentais e os preditos.

O quadrado médio da regressão (1245,6) é próximo ao dos resíduos (960,9), resultando em um valor de $F_{calc} = 1,3$. Esse resultado indica que a variação explicada pelo modelo é semelhante à variação atribuída ao erro experimental. O p-valor associado ($0,391 > 0,05$) confirma que o modelo não é estatisticamente significativo ao nível de 95% de confiança, pois

as variáveis independentes não explicam de forma consistente a variação observada na eficiência de remoção.

Os valores estatisticamente significativos do modelo foram plotados na figura 5. Onde a linearidade do modelo valores preditos, está representado pela reta, já os pontos na figura representam os valores observados dos experimentos de adsorção.

Figura 5 - Gráfico de valores Experimentais x Preditos

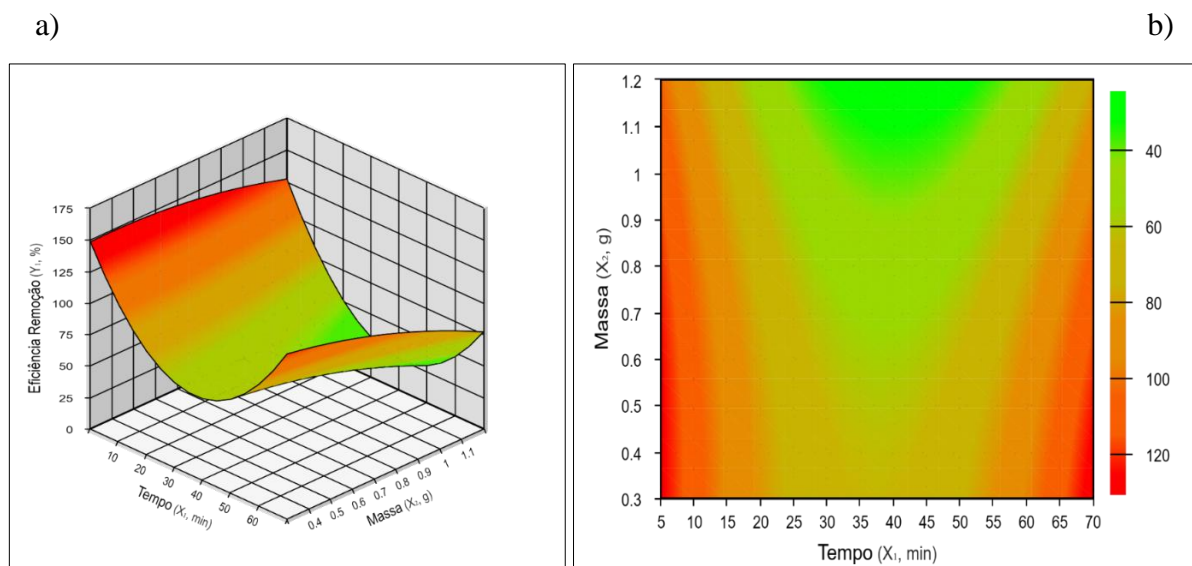


Fonte: Autor, 2025

O gráfico de valores experimentais versus preditos demonstra que, embora exista certa coerência entre os dados experimentais e os valores estimados pelo modelo, a dispersão dos pontos em relação à linha de ajuste ideal evidencia limitações na capacidade preditiva do modelo. Essa análise visual está de acordo com os resultados do teste de variância ANOVA (tabela 5), que indicaram baixa significância estatística ($F_{\text{calc}} = 1,3$; $p = 0,391$), embora o teste de falta de ajuste ($p = 0,893$) tenha confirmado que o modelo não apresenta erro sistemático, sendo adequado para descrever a tendência geral do comportamento experimental.

Estes dados foram utilizados para gerar uma superfície de resposta, e assim obter as faixas ótimas do processo. A figura 6 mostra a análise das superfícies de resposta, com base nas variáveis massa do adsorvente e tempo de contato.

Figura 6 – a) Superfície de resposta 3D e b) Superfície de resposta 2D



Fonte: Autor, 2025

A partir das superfícies de resposta obtidas para as variáveis tempo (X_1) e massa (X_2), observa-se que a eficiência de remoção apresenta comportamento não linear, indicando a existência de uma interação entre esses dois fatores. Verifica-se que os maiores valores de eficiência ocorrem em condições intermediárias de tempo e massa, o que sugere que há um ponto de equilíbrio entre a quantidade de adsorvente disponível e o tempo de contato necessário para a adsorção ocorrer de forma efetiva.

Em contrapartida, em tempos mais longos ou em menores quantidades de massa, a eficiência tende a diminuir, possivelmente em função da saturação dos sítios ativos do adsorvente ou da menor disponibilidade de superfície para interação com o contaminante. Dessa forma, o comportamento observado indica que tanto o tempo quanto a massa influenciam de maneira conjunta a resposta do sistema, sendo fundamental ajustar essas variáveis para maximizar a remoção.

Os resultados obtidos no estudo podem ter sido influenciados por outros fatores não controlados experimentalmente, uma vez que, conforme demonstra alguns estudos, diversas variáveis interferem diretamente na eficiência do processo adsorptivo (Silva *et al.* 2022; Ries, 2019; Wesler *et al.* 2021).

Silva *et al.* (2022) verificaram que o pH do meio, a dosagem de adsorvente e a concentração inicial do contaminante foram determinantes para a eficiência de remoção de metais utilizando quitosana.

De forma semelhante, Ries (2019) observou que o tempo de contato, a agitação da solução, o pH e o tamanho das partículas (granulometria) influenciam significativamente o desempenho do carvão ativado e do carvão vegetal na adsorção, sendo que menores valores de pH e partículas mais finas favoreceram o processo. Já Wesler *et al.* (2021) relataram que a temperatura, a dosagem do adsorvente e a concentração inicial de ferro tiveram efeito direto na eficiência, atingindo remoções acima de 90% sob condições específicas de equilíbrio térmico e tempo de contato.

Além disso, estudos como os de Marcelino (2021) e Pedroso (2016) também destacam a importância do controle do pH, da temperatura e da concentração inicial do metal na eficiência do processo. Assim, a ausência da avaliação desses fatores no presente trabalho pode explicar a ausência de significância estatística observada, uma vez que variáveis como pH, temperatura e concentração inicial têm influência comprovada sobre o comportamento adsorptivo e poderiam contribuir para a otimização da remoção de ferro.

Apesar da ausência de significância estatística dos fatores tempo e massa observada nas análises de regressão e ANOVA, os resultados experimentais apresentados na Tabela 3 evidenciam altos percentuais de remoção de ferro, alcançando valores de até 97% de eficiência.

Esses resultados demonstram que, mesmo sem influência isolada significativa das variáveis estudadas, o acetato de quitosana apresentou um bom desempenho como adsorvente natural, sendo capaz de promover uma elevada taxa de remoção do metal em diferentes combinações de tempo e massa. Isso reforça o potencial do material como uma alternativa eficiente e sustentável para o tratamento de água contaminada, indicando que a variabilidade dos resultados não está relacionada diretamente com a eficácia do adsorvente.

Estudos apresentados por Silva *et al.* (2022), mostraram que a quitosana apresentou elevados percentuais de remoção do corante sintético Remazol Brilliant Blue R (RB), variando entre 21% e 99% de remoção, demonstrando desempenho semelhante ao do carvão ativado comercial, cuja eficiência já é amplamente reconhecida, evidenciando o potencial desse biopolímero como adsorvente natural no tratamento de água.

Saboia (2017) verificou, a partir dos resultados obtidos nos ensaios de adsorção, que o acetato de quitosana se apresenta como um adsorvente natural eficiente para a remoção de sulfato em meio aquoso. O estudo registrou elevadas taxas de remoção, alcançando eficiência máxima de 84% para uma concentração inicial de 1000 mg/L de sulfato na água.

De acordo com Janegitz *et al.* (2007), a quitosana apresenta elevada capacidade de adsorção de íons metálicos (como Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} e Hg^{2+}), resultado da presença de grupos amino ($-\text{NH}_2$) em sua estrutura, que atuam como sítios quelantes. Esses grupos interagem

fortemente com cátions metálicos, formando complexos estáveis e removendo eficientemente os metais pesados das águas residuárias.

O estudo de Cancelier e Teleken (2010) também confirmam a eficiência da quitosana modificada quimicamente na remoção de íons nitrato de efluentes agroindustriais. Os resultados experimentais mostraram que o material apresenta excelente desempenho adsorvente, e o processo segue a isoterma de Langmuir, o que indica a formação de uma monocamada homogênea sobre a superfície do adsorvente.

Além disso, Vaz *et al.* (2010) demonstraram que a quitosana, empregada como coagulante natural, foi o mais eficiente entre os agentes testados (inclusive em comparação com sais de alumínio e ferro), alcançando remoção de até 98% da turbidez e 97% da cor em efluentes de galvanoplastia.

Por fim, Etshindo *et al.* (2018) destacam que a quitosana é barata, abundante, biodegradável e não tóxica, além de possuir grupos hidroxila e amino que funcionam como sítios ativos de adsorção, tornando-a um material altamente eficiente e sustentável para o tratamento de efluentes, especialmente na remoção de corantes e metais pesados.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de adsorção, constatou-se que o acetato de quitosana apresenta-se como um adsorvente natural eficiente para a remoção de ferro em solução aquosa. O estudo demonstrou elevadas taxas de remoção da concentração inicial de 0,86 mg/L de ferro, atingindo eficiência máxima de 97%.

Os resultados demonstraram que o material apresenta potencial de adsorção, alcançando níveis satisfatórios de remoção, porém, a análise estatística revelou que nenhuma das variáveis estudadas exerceu influência significativa ($p < 0,05$) sobre a resposta, conforme indicado pelos testes de regressão e pelo gráfico de Pareto.

Entretanto, a ausência de significância estatística sugere que outros fatores não controlados experimentalmente podem ter influenciado os resultados.

Além disso, a caracterização espectral no infravermelho do acetato de quitosana e da quitosana pura revelou grande semelhança nos perfis espectrais e nas intensidades dos picos, indicando forte correspondência entre suas estruturas químicas.

Estudos como o mecanismo de adsorção do acetato, a influência de variáveis experimentais — como o pH —, a caracterização textural e morfológica do adsorvente, análises cinéticas, isotérmicas, mecanismos de interação envolvidos e a comparação do desempenho do material com outros adsorventes podem ser avaliados em estudos futuros para melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. C. Aplicação Quantitativa da Espectroscopia de Absorção Molecular I: Determinação de um único componente. **Rev. Chemkeys**, Campinas, SP, v.6 e024003, 2024. DOI: 10.20396/chemkeys.v6i00.19959. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/download/19959/14427/54383>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- AZEVEDO, V. V. C. *et al.* Quitina e Quitosana: aplicações como biomateriais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v.2.3, p. 27-34, 2007.
- BARROSO, M. H. S; FLORES, C. C; PEREIRA, M. L. Preparação e caracterização de microesferas de quitosana e quitosana/gelatina carregadas com os minerais cromo e magnésio. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e36111830915, 2022. DOI:[10.33448/rsd-v11i8.30915](https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30915). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30915>. Acesso em: 10 out. 2025.
- BERNARDI, F. Uso de Quitina e Quitosana como adsorventes de Amônia de efluentes aquícolas: revisão de literatura. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da Unipar**, Umuarama, v. 25, n. 2cont., e6378, 2022. DOI: 10.25110/arqvet.v25i2conv.20226378. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1399609>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- BERTACCO, T. C; CERON, L. P; LIKS, L. A. S. Verificação da capacidade de adsorção da cinza da casca de arroz em efluente de cromo hexavalente em fluxo contínuo. **ENGEVISTA**, Rio Grande do Sul, V. 21, n.1, p.114-125, fevereiro 2019.
- BRASÍLIA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília-DF, nº 92, de 16/05/2011, pág. 89. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- BRASÍLIA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília-DF, 18/03/2005. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/>. Acesso em: 17 nov. 2024.
- CANCELIER, A; TELEKEN, J. G. Cinética e equilíbrio de adsorção de íons nitrato de efluentes de lagoas de polimento de agro-indústrias por quitosana. V.7. (n.1/2), ano 2010, Santa Maria – RS.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem. São Paulo, 2016.
- CECHINEL, M. A. P.; FELTRIN, N. Remoção de ferro de soluções aquosas utilizando casca de laranja liofilizada. **Revista observatorio de la economía latinoamericana**, Curitiba, v.22, n.4, p. 01-29. 2024. DOI: 10.55905/oelv22n4-116. Disponível em:

<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/4211>. Acesso em: 10 out. 2024.

COSTA, G. P. V.; CARVALHO, H. O.; RODRIGUES, A. S. Verificação do teor de ferro nas águas distribuídas à população de Macapá pelo sistema de abastecimento público. **Rev. Arq. Científicos (IMMES)**, Macapá, v. 1, n. 1, p. 80-84, 2018.

CUNHA, J. M. **Tratamento de efluentes têxteis através do processo de adsorção em adsorventes de baixo custo – uma revisão**. 2009. 56 f. Trabalho de final de curso - Departamento de engenharia química – DEQ, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

DUARTE NETO, J. F. *et al.* Processos de adsorção de corantes em argilas esmectíticas: uma revisão. **REMAP**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 51–59, 2014.

D'AMELIO, M. T. S., TOLEDO, J. A. G., ALMEIDA, A. S. C. Estudo da adsorção de chumbo utilizando bagaço de cana-de-açúcar ativado. **Ensaio USF**, 4(1), p. 43–62, 2020. DOI: <https://doi.org/10.24933/eusf.v4i1.149>. Disponível em: <https://ensaios.usf.edu.br/ensaios/article/view/149>. Acesso em: 22 out. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Documentos 232, Colombo, Agosto, 2011.

ETSHINDO, L. A. *et al.* Potencialidades e uso da quitosana no tratamento de rejeitos têxteis. **Braz. Ap. Sci. Rev.**, Curitiba, v. 2, n. 6, Edição Especial, p. 2010-2020, nov. 2018.

FERNANDES, S. G. S. **Materiais adsorventes e suas aplicações: uma revisão bibliográfica**. 2021. 52 f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Curso bacharelado em ciência e tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Angicos.

FILHO, A. J. S.; SANFELICE, R. C. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. **Rev. Bras. de Cien. Tec. e Inov.** Uberaba, MG v. 3 n. 2 p. 131-148 jul./dez. 2018.

FRANCO JÚNIOR, J. O. *et al.* Alternativas analíticas para determinação de ferro e titânio em cimento portland. **Quim. Nova**, Salvador, Vol. 24, No. 2, p. 195-199, 2001.

FREIRE, L. F. A. *et al.* Avaliação da Adsorção de Efluente Têxtil por Compósitos de Quitosana. **Revista Processos Químicos**, Rio de Janeiro, Jul / Dez de 2018.

FREITAS, J. T. *et al.* Interferência dos metais sódio, magnésio e cálcio na determinação de urânio em amostras de águas tratadas pela técnica de espectrometria óptica por plasma indutivamente acoplado. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v.4, n.2, p. 1946-1964 abr./jun. 2021. DOI: 10.34188/bjaerv4n2-031.

FONSECA, L. A; CASTRO, M. M. F; PEREIRA M. A. Estudo das características do carvão ativado a partir do bagaço da cana-de-açúcar na adsorção do Chumbo em efluentes industriais. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.12, p. xxxxx-xxxxx dec. 2021. DOI:10.34117/bjdv7n12-495.

GUARDA, P. M. *et al.* Concentrações de metais tóxicos em água, solo e sedimento do rio Formoso, TO. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, e177101421897, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21897>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/21897/19472/263801>. Acesso em: 1 nov. 2024.

GUELFY, L. R.; SCHEER, A. P. **Estudo de adsorção para purificação de misturas na indústria petrolífera**. 2007. 40 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ISMAIL, I. A. L. *et al.* Uso de polímeros sintéticos e naturais no tratamento de resíduos de estação de tratamento de água (ETA). **Portal Tratamento de Água**, São Paulo, 18 nov. 2019. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/polimeros-sinteticos-naturais-residuos-eta/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

JÚNIOR, A. G. R. *et al.* Estudo da remoção de corante azul de metileno de soluções aquosas usando o bambu in natura (*Bambusa Vulgaris*) como adsorvente. **Research, Society and Development**, Rio Grande do Norte, v. 11, n. 6, e46711629314, 2022. DOI:[10.33448/rsd-v11i6.29314](https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29314). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29314>. Acesso em: 18 out. 2025.

JANEGITZ, B. C. *et al.* Desenvolvimento de um método empregando quitosana para remoção de íons metálicos de águas residuárias. **Quim. Nova**, Vol. 30, No. 4, 879-884, 2007, São Carlos – SP.

KLAFKE, L. Z. **Tratamento para remoção de ferro das águas subterrâneas do município de Osório**. 2023. 31 f. Trabalho de conclusão de curso em engenharia química - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KUMAR, R., MAJETI, N. V. A review of chitin and chitosan applications. **Reactive & Functional Polymers** v.46, n. 1–27. 2000.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. 494 p.

Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília-DF, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 18 nov. 2024.

MARCELINO, N.V.A.; CUBA, R.M.F.; TERAN, F.J.C. Reaproveitamento de sabugo de milho para potencial remoção de formulação comercial de glifosato em fase aquosa pela técnica de adsorção. **Eng Sanit Ambient**, Goiânia v.26, n.4, jul/ago 2021, p. 669-681. DOI [10.1590/S1413-415220200088](https://doi.org/10.1590/S1413-415220200088). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200088>. Acesso em: 10 out. 2025.

MACHADO, T. S. *et al.* Síntese de compósito a base de quitosana e sílica para adsorção de corante têxtil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.3, p.408-420, 2021. DOI: [10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0033](https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0033). Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0033>. Acesso em: 2 out. 2025.

MARTÍNEZ, R. K. *et al.* Physicochemical study of chitin and chitosan obtained from California brown shrimp (*Farfantepenaeus californiensis*) exoskeleton. **Revista de Ciências Biológicas y de la Salud**, México, Volumen XXIV, Número 2 p. 28-35, 2022.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. Fortaleza, CE: Imprensa Universitária, 2020. 306 p.

OLIVEIRA, A. F. **Potencial de reutilização de lamas de ETA para remoção de sulfatos** Caso de estudo: ETA de Santa Águeda. 2020. 108 p. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil Sanitária - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2020.

OTTO, I. M. *et al.* Consumo e custo energético do processo de produção de quitina para remoção de azul de metileno. **Scientia Plena**, Pelotas vol. 18, num. 4, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.041501.

PFEIFER, A. A. *et al.* Determinação espectrofotométrica de ferro nas águas do rio Paranaíba, no município de Itumbiara – GO. 2012.

PEDROSO, A. S; ARAÚJO, C. S. T. Caracterização e avaliação da influência do pH na adsorção de íons Ni (II) em águas utilizando cascas trituradas de Barú (*Dipteryx alata*). Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão – CEPE, Inovação: Inclusão Social e Direitos, Pirenópolis, 19 a 21 de outubro de 2016.

RUTHVEN, D. M. Principles of adsorption and adsorption process. United States of America: Wiley – Interscience Publication, 1984 p. 1 – 13, 221 – 270.

RIES, L. A. S; SILVEIRA, J. H. Remoção de Cr(VI) por adsorção empregando carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca de arroz. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 6, p. 6477-6494, jun. 2019. DOI 10.34117/bjdv5n6-148.

SABOIA, M. I. Utilização do acetato de quitosana como adsorvente natural para a remoção de sulfatos em água. 2017, 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO.

SANTOS, M. S. *et al.* Análise da concentração e distribuição de metais pesados na água do rio das Velhas entre a cidade de Várzea da Palma e o distrito de Barra do Guaicuí - MG. **Revista Cerrados**, Montes Claros – MG, v. 16, n. 1, p. 130-158, jan./jun.-2018. DOI <https://doi.org/10.22238/rc2448269220171601130158>. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/1281>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SILVA, D. C. T. *et al.* Design de experimento no estudo comparativo de adsorção de corante sintético em quitosana e em carvão ativado comercial. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.4, p.28877-28886, apr., 2022. DOI 10.34117/bjdv8n4-400.

SIGNINI, R.; CAMPANA F, S. P. Características e Propriedades de Quitosanas Purificadas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, vol. 11, nº 2, p. 58-64, 2001.

VASCONCELOS, M. A.; OLIVEIRA, I. B. Especificação Química do Sulfato em Águas Subterrâneas do Domínio Hidrogeológico Sedimentar do Estado da Bahia - Brasil, Utilizando o Método Tableau. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 256-266, 2018. DOI:

<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i2.29119>. Disponível em:
<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29119>. Acesso em: 28 out. 2024.

VIEIRA, R. S. **Adsorção competitiva dos íons cobre e mercúrio em membranas de quitosana natural e reticulada**. 2008. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

VAZ, L. G. L. *et al.* Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Ecl. Quím.**, São Paulo, 35 - 4: 45 - 54, 2010.

WESLER, S. *et al.* Estudo do potencial de adsorção de íons de ferro de água contaminada com drenagem ácida de mina utilizando geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico. **Eng Sanit Ambient**, Florianópolis v.26 n.6, nov/dez 2021, 1123-1133. DOI <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200123>. Disponível em:
<https://doi.org/10.1590/S1413-415220200123>. Acesso em: 13 out. 2025.