



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE
PROCESSOS AMBIENTAIS**

SÉRGIO SELISMAN SILVA DANTAS

**COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS A BASE DE
QUITOSANA E RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
PARA REMOÇÃO DE FÁRMACOS**

Recife, dezembro de 2023

SÉRGIO SELISMAN SILVA DANTAS

**COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS A BASE DE
QUITOSANA E RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
PARA REMOÇÃO DE FÁRMACOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima

Recife, dezembro de 2023

Ficha Catalográfica

D192c Dantas, Sérgio Selisman Silva.
Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais para remoção de fármacos / Sérgio Selisman Silva Dantas, 2023.
77 f.: il.

Orientador: Marcos Antônio Barbosa de Lima.
Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2023.

1. Biotecnologia. 2. Resíduos agroindustriais.
3. Adsorção. 4. Materiais compostos. 5. Acetaminofen.
6. Medicamentos. I. Título.

CDU 574.6

Luciana Vidal - CRB4/1338

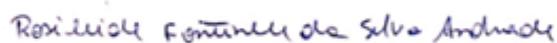
COMPÓSITOS SUSTENTÁVEIS A BASE DE QUITOSANA E RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA REMOÇÃO DE FÁRMACOS

SÉRGIO SELISMAN SILVA DANTAS

Examinadores:



Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE



Prof.ª Dra. Rosileide Fontenele da Silva Andrade (Titular Interno)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP



Prof.ª Dra. Luciana de Oliveira Franco (Titular Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Defendida em:

Coordenador (a): Prof. Dr. Sérgio Mendonça de Almeida

DEDICATÓRIA

A vocês que, muitas vezes, renunciaram aos
seus sonhos para que eu pudesse realizar o
meu, partilho a alegria deste momento, meus
pais Sérgio e Aliete.

A minha esposa Uiara, minha filha Maria
Clara, por todo amor, compreensão, apoio e
nos momentos de ausência.

“A imaginação é mais importante que o
conhecimento”
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por estar sempre presente em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr Marcos Lima, por ter me dado esta oportunidade ao me aceitar como aluno, contribuindo para o meu aperfeiçoamento profissional.

À Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, na pessoa do Magnífico Reitor Prof. Dr. Pe Pedro Rubens Ferreira Oliveira, pela excelência nas áreas de ensino, pesquisa e extensão, o que muito contribuiu para esta conquista.

Aos meus amigos do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, pela amizade, apoio, carinho, transferência de conhecimentos, além dos bons momentos compartilhados, que nunca serão esquecidos.

Aos amigos conquistados no Núcleo de Pesquisa em Ciências Ambientais e Biotecnologia – NPCIAMB, em especial a Dra. Adriana Ferreira de Souza, pela atenção e apoio na execução desta pesquisa.

Aos Professores do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais: Dr. Marcos Lima, Dr^a Rosileide Fontenelle, Dr. Sérgio Almeida e Prof. Dr. Valdemir Alexandre, pelos ensinamentos.

Aos técnicos do NPCIAMB André Felipe e Severino Humberto de Almeida, pela atenção, paciência, apoio e disposição em ajudar sempre.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa para aprimorar meus conhecimentos;

A todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Fármacos mais vendidos	18
3.1.1 Paracetamol	19
3.1.2 Diclofenaco de Sódio	21
3.1.3 Dipirona	23
3.2 Fármacos no meio ambiente	24
3.3 Adsorção	27
3.3.1 Adsorção de Fármacos	30
3.4 Compósitos	31
3.5 Quitosana	32
3.5.1 Quitosana como Matriz do Compósito	34
3.6 Resíduos Agroindustriais como Reforço dos Compósitos	34
3.6.1 Borra de Café	36
3.6.2 Pó de Serragem	37
3.6.3 Pó da Casca de Coco	39
REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO II	51
CAPÍTULO III	75
CAPÍTULO IV	77

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1: Estrutura química do paracetamol.....	19
Figura 2: Estrutura química do diclofenaco de sódio.....	21
Figura 3: Estrutura química da dipirona.....	23
Figura 4. Interação de poluentes farmacêuticos em solos, águas superficiais e subterrâneas.....	26
Figura 5: processo de adsorção de carvão ativado(adsorvente) na remoção de um adsorvato.....	28
Figura 6: Representação de um compósito.....	31
Figura 7: Diferentes fontes de quitina.....	32
Figura 8: Representação esquemática da estrutura química da quitosana.....	33

CAPÍTULO II

Figura 1: Espectro de absorção no infravermelho dos compósitos sustentáveis baseados em quitosana e resíduos agroindustriais. (a) Compósito QGBC; (b) Compósito QG; (c) Compósito QGBC após adsorção.....	60
Figura 2: Micrografia das superfícies dos compósitos à base de quitosana, utilizando uma ampliação de 200x: (A) Compósitos QG e (B) Compósitos QGBC.....	63
Figura 3: Remoção de fármacos usando diferentes compósitos. (a) Compósito QGBC, (b) Compósito QGPS, (c) Compósito QGPC e (d) Compósito QG.....	65
Figura 4: Cinética de adsorção do paracetamol pelo compósito QGBC.....	67
Figura 5: Cinética de adsorção do paracetamol - modelo cinético de pseudo-segunda ordem.....	68
Figura 6: A linearização de Freundlich do compósito QGBC mostra os resultados da adsorção de paracetamol usando cada modelo de isotermas.....	69

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1: Vendas dos medicamentos dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio no Brasil.....	18
Tabela 2: Características físico-químicas do paracetamol.....	20
Tabela 3: Características físico-químicas do diclofenaco de sódio.....	22
Tabela 4: Características físico-químicas da dipirona.....	26
Tabela 5: Dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio e os riscos à saúde humana e ao meio ambiente.....	27
Tabela 6: Comparação entre os processos Fississorção e Quimissorção.....	29
Tabela 7: Classificação dos poros de acordo com o tamanho.....	30
Tabela 8: Resíduos agroindustriais utilizados no desenvolvimento de biocompósitos para remoção de fármacos do meio aquoso.....	35
Tabela 9: Composição do resíduo da borra de café.....	36
Tabela 10: composição do resíduo pó de serra.....	37
Tabela 11: Composição do resíduo do pó da casca do coco.....	39

CAPÍTULO II

Tabela 1: Composição dos quatro tipos de compósitos sintetizados com quitosana, resíduos agroindustriais e glicerol.....	56
Tabela 2: Parâmetros cinéticos de adsorção para a adsorção do paracetamol usando QGBC, pseudo-segunda ordem.....	69
Tabela 3: Parâmetros Isotérmicos de Freundlich para adsorção de fármacos em QGBC a 28°C.....	70
Tabela 4: Adsorção de produtos farmacêuticos em gráficos comparativos de diferentes adsorventes.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS

AINE - Anti-inflamatório Não Esteroidal

BCL - Borra de Café Lavado

CAPES - Coordenação de Pessoal de Ensino Superior

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

ETA - Estação de Tratamento de Água

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

IBP – Ibuprofeno

IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NPCIAMB - Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Ciências Ambientais

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organizações das Nações Unidas

PIN – Polímeros Interpenetrantes

QG – Quitosana + Glicerol

QGBC – Quitosana + Glicerol + Borra de Café

QGPC – Quitosana + Glicerol + Pó da casca do Coco

QGGS – Quitosana + Glicerol + Pó de Serra

RTA – Reflectância Total Atenuada

TMP - Trimetoprima

UNICAP - Universidade Católica de Pernambuco

RESUMO

A contaminação das águas por fármacos resulta de práticas inadequadas no descarte de medicamentos e resíduos hospitalares, além de deficiências nos sistemas de tratamento de água. A adsorção surge como uma solução promissora para mitigar esses impactos, oferecendo uma abordagem eficaz e sustentável para combater a poluição. Além disso, promover a adsorção de fármacos está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), visando garantir a gestão sustentável da água e preservar os ecossistemas aquáticos. Destaca-se a utilização de compósitos como adsorventes de fármacos (dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio), utilizando quitosana, um polissacarídeo derivado da quitina. A quitosana, com seus grupos funcionais, favorece a adsorção de poluentes, enquanto resíduos agroindustriais, como cascas de coco, pó de serragem e borra de café, conferem propriedades singulares ao compósito de quitosana, ampliando sua eficácia na adsorção de contaminantes. Esses resíduos podem ser empregados como matérias-primas sustentáveis na produção de adsorventes, promovendo a sustentabilidade ambiental e reduzindo o desperdício. Este estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento e a caracterização de compósitos sustentáveis à base de quitosana e resíduos agroindustriais (pó da borra de café, pó da casca do coco e pó de serragem) para a remoção de fármacos da água. Foram estudados três fármacos: dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio. A pesquisa também avaliou a eficiência dos compósitos na remoção dos fármacos, estudando a cinética e as isotermas de adsorção. Durante a pesquisa, utilizou-se o método de remoção por adsorção para avaliar a eficácia dos compósitos na remoção de fármacos, como dipirona, paracetamol e diclofenaco, de soluções aquosas. Este método foi conduzido em duas etapas: inicialmente, com os três fármacos e os quatro compósitos sintetizados (QGBC, QGPS, QGPC e QG); posteriormente, concentrou-se especificamente no paracetamol, o qual demonstrou a maior remoção, e no QGBC, que exibiu a maior capacidade de adsorção de fármaco. Além disso, a caracterização físico-química e morfológica dos compósitos foi realizada por meio de técnicas como FTIR (Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier) e MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Destaca-se o compósito QGBC (Quitosana, glicerol, Borra de café), que demonstrou eficiência de adsorção atingindo 76%, com ênfase para o fármaco paracetamol, especialmente em condições de pH 6. O compósito QGBC também removeu quantidade significativa dos outros dois fármacos em comparação aos outros três compósitos. O processo demonstrou eficiência e sustentabilidade, valorizando substratos agroindustriais e contribuindo para a redução da poluição ambiental. A produção de compósitos sustentáveis mostrou-se simples e econômica, com remoção eficaz de fármacos.

Palavras-chave: Compósitos, Quitosana, Resíduos Agroindustriais. Adsorção, paracetamol, dipirona, diclofenaco de sódio.

ABSTRACT

Contamination of water by pharmaceuticals arises from inadequate practices in the disposal of medications and hospital waste, as well as deficiencies in water treatment systems. Adsorption emerges as a promising solution to mitigate these impacts, offering an effective and sustainable approach to combat pollution. Moreover, advocating for the adsorption of pharmaceuticals aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 6 (Clean Water and Sanitation), aiming to ensure sustainable water management and preserve aquatic ecosystems. The use of composites as drug adsorbents (dipyrene, paracetamol, and sodium diclofenac) using chitosan, a polysaccharide derived from chitin, is highlighted. Chitosan, with its functional groups, promotes the adsorption of pollutants, while agro-industrial residues such as coconut husks, sawdust, and coffee grounds confer unique properties to the chitosan composite, enhancing its effectiveness in adsorbing contaminants. These residues can be employed as sustainable raw materials in adsorbent production, supporting sustainability and waste reduction. The primary objective of this study was the development and characterization of sustainable composites based on chitosan and agro-industrial residues (coffee ground powder, coconut husk powder, and sawdust) for the removal of pharmaceuticals from water. Three drugs were studied: dipyrene, paracetamol, and sodium diclofenac. The research also evaluated the efficiency of the composites in drug removal, studying the kinetics and adsorption isotherms. During the research, the adsorption method was used to evaluate the effectiveness of the composites in removing drugs such as dipyrene, paracetamol, and diclofenac from aqueous solutions. This method was conducted in two stages: initially, with the three drugs and the four synthesized composites (QGBC, QGPS, QGPC, and QG); subsequently, it focused specifically on paracetamol, which demonstrated the highest removal, and on QGBC, which exhibited the highest drug adsorption capacity. Additionally, the physical and chemical characterization of the composites was performed using techniques such as FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) and SEM (Scanning Electron Microscopy). The QGBC composite (Chitosan, glycerol, coffee grounds) stands out, demonstrating an adsorption efficiency of 76%, with emphasis on the paracetamol drug, especially under pH 6 conditions. The QGBC composite also removed a significant amount of the other two drugs compared to the other three composites. The process demonstrated efficiency and sustainability, valorizing agro-industrial substrates and contributing to the reduction of environmental pollution. The production of sustainable composites proved to be simple and economical, with effective drug removal.

Keywords: Composites, Chitosan, Agro-industrial Residues. Adsorption, Paracetamol, Dipyrene, Sodium Diclofenac.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

O descarte inadequado de medicamentos, tais como dipirona, diclofenaco de sódio e paracetamol, no meio ambiente, configura-se como um cenário potencialmente prejudicial para a saúde humana, animal e ambiental. Investigação científica atesta que a presença desses agentes farmacológicos em recursos hídricos superficiais e subterrâneos pode induzir a desarranjos bioquímicos e imunológicos, impondo ameaças à saúde tanto de seres humanos quanto de animais (MORAIS, 2019).

A dipirona é conhecida por causar reações alérgicas graves em pessoas e animais, sendo uma preocupação na saúde pública e veterinária. O diclofenaco de sódio tem impactos ambientais, afetando a reprodução de peixes e aves, além de ser tóxico para animais terrestres. Já o paracetamol pode causar danos ao fígado em animais e representa riscos para a vida aquática. (MOHEBI DERAKHSH, 2020; BUSTO, 2022; PERUSSOLO, 2023).

As ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) são uma série de metas globais estabelecidas pela ONU para promover um desenvolvimento sustentável em diferentes áreas até 2030. A ODS 6, que visa água e saneamento sustentáveis, está intrinsecamente ligada à gestão do descarte de medicamentos, dada sua influência na qualidade da água e na saúde pública. O descarte inadequado desses produtos farmacêuticos apresenta sérios riscos ambientais e de saúde, comprometendo os objetivos de água e saneamento sustentáveis. Para combater essa problemática, é fundamental implementar práticas de descarte responsável, como campanhas de conscientização e estabelecimento de pontos de coleta específicos. Além disso, a pesquisa de novos processos para despoluir as águas contaminadas desempenha um papel crucial. A devolução segura de medicamentos não utilizados é uma medida crucial para preservar a qualidade da água, alinhando-se diretamente aos esforços da Agenda 2030 (LIMA, 2023).

A necessidade de impedir que compostos farmacológicos atinjam fontes de água potável torna imperativo o desenvolvimento de sistemas de controle e remoção de poluentes emergentes mais eficazes, que possam complementar ou

substituir os métodos tradicionais de tratamento de água (DALBOSCO, 2020; RIBAS, 2023).

Farto et al. (2021) ressalta a ineficácia do tratamento convencional de águas residuais na degradação de contaminantes emergentes. Esses poluentes foram detectados tanto na entrada quanto na saída de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e Estações de Tratamento de Água (ETAs).

A adsorção é uma estratégia eficaz para tratar águas contaminadas, especialmente no que diz respeito à remoção de compostos farmacêuticos. Estudos têm explorado a capacidade da adsorção nesse contexto, aproveitando suas vantagens, como simplicidade, alta taxa de remoção, facilidade operacional, baixo custo e ausência de formação de lodo. (NATIVIDADE, 2021).

Compósitos são materiais adsorventes inovadores na vanguarda do tratamento de águas contaminadas, destacando-se pela capacidade de adsorver seletivamente compostos indesejados, incluindo produtos farmacêuticos. Sua resistência a condições adversas, como variações de pH, temperatura e pressão, assegura eficácia e durabilidade prolongada. (PALAZZO, 2022; PIMENTEL et al, 2022).

A quitosana, um biopolímero atóxico, é um material chave em compósitos utilizados nas indústrias alimentícia, farmacêutica, biomedicina e agropecuária. Derivada da desacetilação parcial da quitina, a quitosana é composta por uma cadeia linear de d-glucosamina e N-acetil l-d-glucosamina, ligadas por resíduos de β -(1-4) (CONTIERI, 2021; ALMONDES 2023).

Os resíduos agroindustriais, como borra de café, pó de coco e pó de serragem, são subprodutos gerados nas atividades agrícolas e industriais. Podem ser sustentavelmente reaproveitados, servindo como matéria-prima para bioplásticos. Esses compósitos apresentam benefícios, como maior resistência e menor impacto ambiental, sendo aplicáveis em setores diversos, como construção civil e automotivo. (DOS REIS, 2020; MADIKIZELA.; PAKADE, 2023).

Nesse contexto, os estudos foram direcionados para o desenvolvimento de compósitos sustentáveis eficazes, com o objetivo de mitigar a contaminação ambiental causada pelos fármacos testados, atendendo aos requisitos fundamentais da sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver compósitos sustentáveis a base de quitosana e avaliar sua eficiência como material adsorvente na remoção de resíduos de fármacos em solução aquosa (simulando água de abastecimento).

2.2 Específicos

- Desenvolver compósitos sustentáveis a base de quitosana associado ao glicerol e resíduos agroindustriais (pó de serra; pó de coco e pó de serragem);
- Realizar caracterização físico-química e morfológica de superfície dos compósitos produzidos por Espectroscopia Infravermelha com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Avaliar a eficiência dos compósitos sustentáveis na remoção dos fármacos dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio de solução aquosa;
- Estudar a cinética de adsorção pelos métodos pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem e as isotermas de adsorção segundo os modelos de Langmuir e Freundlich.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Fármacos mais vendidos

De acordo com dados do Conselho Nacional de Saúde, o Brasil é um dos países que mais consome medicamentos no mundo. Em 2022, o consumo de medicamentos no Brasil foi de 1,6 bilhão de unidades, o que equivale a 700 doses por habitante, todos os dias. De acordo com o relatório da consultoria IQVIA, o Brasil está em 7º lugar no ranking mundial de consumo de medicamentos, atrás de países como Estados Unidos, China, Japão, Alemanha, França e Itália. Os grupos de medicamentos mais consumidos no Brasil são:

- Analgésicos e antitérmicos (21,6%);
- Anti-inflamatórios (14,7%);
- Anticoncepcionais (11,4%);
- Antibióticos (7,5%);
- Hipertensivos (6,7%).

O consumo de medicamentos é influenciado por diversos fatores, como o envelhecimento da população, o aumento da prevalência de doenças crônicas e o acesso aos serviços de saúde (CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE, 2017; HOEFLER, 2023).

A dipirona, o paracetamol e o diclofenaco de sódio são alguns dos fármacos mais vendidos em todo o mundo, e isso se deve principalmente às suas eficácias no alívio da dor e da febre. Esses fármacos são disponibilizados em diversas formas farmacêuticas, como comprimidos, cápsulas, gotas e soluções, o que contribui para sua popularidade e acessibilidade. Em 2022, as vendas dos medicamentos dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio no Brasil foram significativas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela1.Vendas dos medicamentos dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio no Brasil

Medicamento	Unidades Vendidas (2022)
Dipirona	284 milhões

Paracetamol 245 milhões

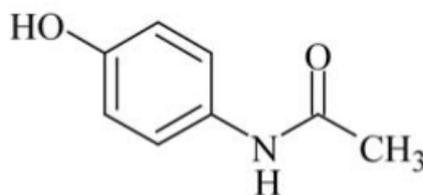
Diclofenaco de Sódio 112 milhões

Fonte: IQVIA, 2023

3.1.1 Paracetamol

O paracetamol (Figura 1) é um medicamento antipirético e analgésico, usado para aliviar a dor e a febre. Em alguns países, o paracetamol é vendido sob o nome genérico "acetaminofeno" (LEE, et al. 2022). Por não causar efeitos colaterais imediatos, como sonolência ou irritação gástrica, o paracetamol se destaca como um medicamento analgésico singular. No entanto, ao contrário de outros fármacos pertencentes à mesma categoria, ele não possui propriedades anti-inflamatórias. Essa ausência de características anti-inflamatórias diferencia o paracetamol dos demais membros de sua classe (FRANCO, 2018). O paracetamol teve sua síntese realizada em 1878 e foi administrado clinicamente pela primeira vez em 1887. Durante a década de 1950, esse medicamento foi redescoberto e começou a ser usado como alternativa à fenacetina. No entanto, preocupações em relação ao seu uso inicialmente dificultaram sua aceitação, sendo somente por volta dos anos 1970 que essas preocupações foram superadas. A partir desse período, o paracetamol ganhou grande popularidade, tornando-se uma das drogas mais consumidas e prescritas em todo o mundo, inclusive para crianças (DE ALMEIDA, 2022).

Figura 1: Estrutura química do paracetamol



Fonte: USP 38, 2015

Aproximadamente 90% do paracetamol é metabolizado pelo corpo, enquanto os 10% restantes são excretados na urina em sua forma original. Embora a maioria do medicamento seja metabolizada, o elevado uso do

paracetamol resulta na presença deste composto como um micro poluente em efluentes de estações de tratamento de esgoto e resíduos hospitalares (FRANCO, 2019).

Apesar de o paracetamol ser geralmente considerado seguro, não causando complicações imediatas e tendo interações mínimas com a maioria dos outros medicamentos, é crucial notar que suas doses tóxicas estão na faixa de 7,5 g por dia para adultos. Se ingerido em grandes quantidades, pode levar a danos no fígado e insuficiência renal, embora raramente afete outros órgãos. Estudos indicam que o uso frequente do paracetamol pode estar associado ao desenvolvimento de problemas cardiovasculares, gastrointestinais e renais. Além disso, existe a possibilidade de formação de tumores e distúrbios sanguíneos devido ao uso excessivo desse fármaco (HARO, 2017). Na Tabela 2, são demonstradas as características físico-químicas do paracetamol.

A temperatura ambiente o paracetamol é um composto sólido, branco e cristalino, faixa de fusão está em torno de 168 °C a 172 °C. O pH 5,3 a 6,5. É inodoro e tem leve sabor amargo. É moderadamente solúvel em água, solúvel em água fervente, facilmente solúvel em álcool etílico. Solúvel em hidróxido de sódio. É insolúvel em pentano e benzeno (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2019).

Tabela 2: Características físico-químicas do paracetamol.

Fórmula Molecular	C ₈ H ₉ NO ₂
Nome químico	N-(4-Hidroxifenil) acetamida
Ponto Fusão	168 °C a 172 °C
Ponto Ebulição	420°C
Log P	0,46
pKa	9,0 e 9,5
Solubilidade	Moderadamente solúvel em água, solúvel em água fervente, facilmente solúvel em álcool etílico. Solúvel em hidróxido de sódio. É insolúvel em pentano e benzeno
Massa aproximada	151,17

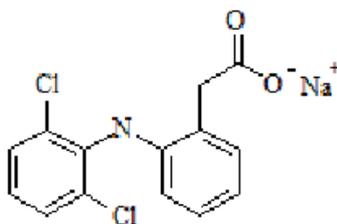
Fórmula Percentual	C (64,17%), H (5,99%), N (9,27%), O (21,57%)
Uv máx (água)	243

Fonte: USP 38, 2015

3.1.2 Diclofenaco de sódio

O Diclofenaco de sódio (Figura 2) é um anti-inflamatório não esteroidal (AINE) usado para tratar dor e inflamação. Os AINEs funcionam bloqueando a produção de prostaglandinas, substâncias que causam esses sintomas (CANTARELLA et al., 2019).

Figura 2: Estrutura química do diclofenaco de sódio.



Fonte: USP 38, 2015

As prostaglandinas são produzidas pelo corpo a partir do ácido araquidônico, um ácido graxo que é liberado quando as células são danificadas. O diclofenaco de sódio é um medicamento de prescrição que está disponível em várias formas, incluindo comprimidos, cápsulas, gotas orais, cremes e pomadas (SILVA, 2019).

O diclofenaco é um dos principais poluentes emergentes detectados em águas residuais e esgotos. Devido ao seu amplo uso, sua exposição prolongada pode levar a efeitos toxicológicos crônicos, como a formação de metabólitos mais tóxicos ou a interação com outros contaminantes, formando compostos mais perigosos (CANTARELLA et al., 2019). Na Tabela 3, é demonstrada as características físico-químicas do diclofenaco.

Tabela 3: Características físico-químicas do diclofenaco de sódio.

Fórmula Molecular	$C_{14}H_{10}Cl_2NNaO_2$
Nome químico	2-[2-(2,6-dicloroanilino) fenil] acetato de sódio
Ponto Fusão	275-277 °C
Ponto Ebulição	0
Log P	13,4
pKa	4,15
Solubilidade	Solúvel em álcool metílico e etanol. Moderadamente solúvel em água e praticamente insolúvel em clorofórmio e ácido diluído
Massa aproximada	318,13
Fórmula Percentual	C (66,99%), H (3,16%), Cl (22,27%), N (4,41%), Na (7,23%), O (10,93%)
Uvmáx (água)	278

Fonte: USP 38, 2015

Nos últimos anos, o diclofenaco tem sido objeto de intensa pesquisa devido à sua elevada taxa de consumo em todo o mundo. Sua popularidade é evidenciada pelo fato de estar disponível em 120 países diferentes, tornando-se o anti-inflamatório não esteroideal mais amplamente utilizado em todo o mundo e ocupando a 8ª posição na lista dos medicamentos mais vendidos. Sua presença generalizada nas prateleiras das farmácias e consultórios médicos sublinha sua importância no campo da medicina (HE, 2017).

O diclofenaco tem sido detectado em amostras de águas de 50 países, incluindo no Brasil, em concentrações preocupantes, variando de 0,0033 a 193 $\mu\text{g L}^{-1}$. Estudos revelaram sua toxicidade mesmo em baixas concentrações, afetando organismos aquáticos. Além disso, a bioacumulação em tecidos de organismos marinhos expostos a 133,33 $\mu\text{g L}^{-1}$ levanta sérias preocupações (DE SOUZA, 2020).

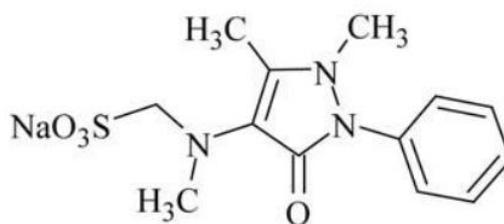
A inquietação ambiental se estende às substâncias geradas pela biotransformação em organismos vivos e exposição solar, que podem ser mais tóxicas que o próprio diclofenaco. Este cenário alerta para a necessidade de uma

gestão ambiental cuidadosa, dada a ampla presença e os efeitos adversos desse fármaco em ecossistemas aquáticos (BONNEFILLE *et al.*, 2018; KALEDHONKAR, 2019).

3.1.3 Dipirona

A dipirona (Figura 3) é um medicamento antipirético, analgésico e espasmolítico, classificado como derivado pirazolônico utilizada no Brasil há mais de 70 anos, também conhecida como Metamizol (FILHO, 2020).

Figura 3: Estrutura química da dipirona



Fonte: USP 38, 2015

Estudos mostram que os analgésicos e os relaxantes musculares são os grupos terapêuticos mais utilizados por automedicação, sendo a dipirona o medicamento mais consumido. Em geral, a maioria dos medicamentos usados por automedicação (65,5%) são isentos de prescrição médica, incluindo a dipirona, que está disponível em forma de comprimidos, cápsulas, xaropes e injeções (DI GUIDA, DI GUIDA; 2023). Na Tabela 4, fica demonstrada as principais características físico-químicas da dipirona.

Tabela 4: Características físico-químicas da dipirona.

Fórmula Molecular	$C_{13}H_{16}N_3NaO_4S.H_2O$
Nome químico	1-[(2,3-di-hidro-1,5-dimetil-3-oxo-2-fenil-1H-pirazol-4-il)metilamino] metanossulfônico hidratado
Ponto Fusão	158-160 °C
Log P	2,5

pKa	3,77
Solubilidade	Solúvel em água e metanol, e baixa solubilidade em etanol e praticamente insolubilidade em éter etílico, acetona, benzeno e clorofórmio
Massa aproximada	351,35
Fórmula Percentual	C (44,69%), H (6,17%), N (12,02%), Na (6,58%), O (14,32%), S (9,18%)
Uvmáx (água)	271

Fonte: USP 38, 2015

A dipirona foi proibida nos Estados Unidos e em boa parte da Europa nos anos 1970, sob suspeita de causar agranulocitose induzida por medicamento. Essa doença é caracterizada pela diminuição ou desaparecimento dos glóbulos brancos, o que pode causar lesões nos intestinos, em outras mucosas, na garganta e na pele. (LASCOSK, 2022).

Embora a relação entre o consumo de dipirona e a agranulocitose seja controversa, o fármaco é o analgésico mais consumido no Brasil, sendo responsável por cerca de 30% do mercado nacional. Dessa forma, técnicas de análise do teor de dipirona em medicamentos ganham grande importância como forma de fiscalizar as empresas fornecedoras dos fármacos. (FRANCO, 2019).

3.2 Fármacos no Meio Ambiente

O descarte inadequado de medicamentos configura-se como uma problemática de magnitude tanto ambiental quanto de saúde pública. Aproximadamente 70% dos medicamentos vencidos ou não utilizados são descartados de maneira inadequada, sendo depositados no lixo comum, despejados na rede de esgoto ou liberados diretamente no meio ambiente (CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE, 2017).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representam um conjunto de 17 metas globais estabelecidas pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015. Esses objetivos foram concebidos com a finalidade de erradicar

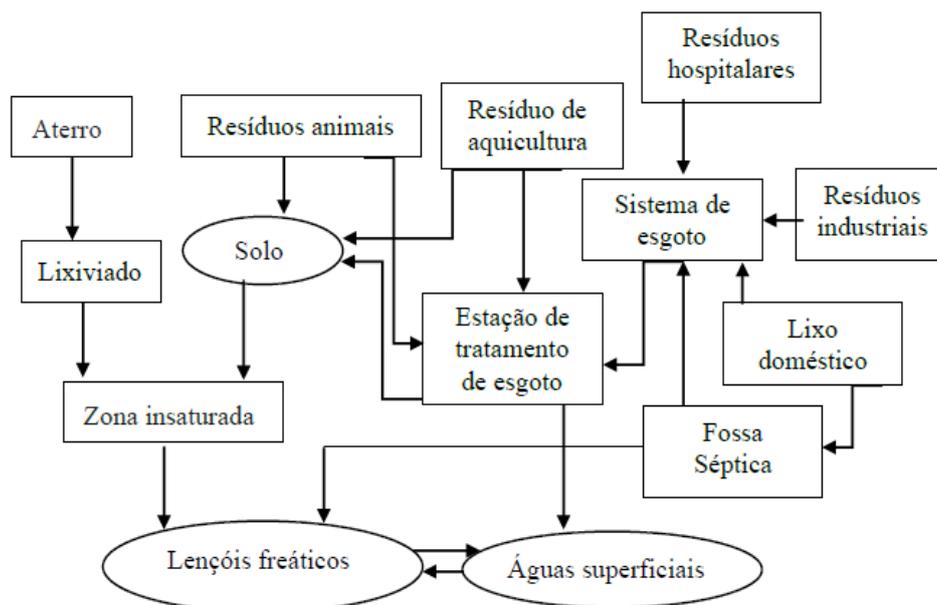
a pobreza, preservar o meio ambiente e mitigar as mudanças climáticas, visando assegurar que todas as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de uma vida digna e equitativa. Os ODS abrangem uma ampla gama de áreas, desde a erradicação da fome até a promoção da saúde, educação, igualdade de gênero, acesso à água potável, energia limpa, crescimento econômico sustentável e paz. Essa iniciativa global busca promover um desenvolvimento inclusivo e sustentável até o ano de 2030. (CABRAL, 2022).

O descarte impróprio de medicamentos constitui um desafio de proporções consideráveis, exercendo impacto direto nas águas superficiais e subterrâneas, ao mesmo tempo em que contribui para o agravamento dos problemas de poluição do solo. Esta prática engendra uma série de problemáticas alinhadas com as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), notadamente a ODS 6, que visa assegurar o acesso à água potável e saneamento adequado (NETO, 2018; CABRAL, ET AL., 2022).

A presença de resíduos farmacêuticos nas águas configura uma ameaça substancial à qualidade hídrica e à saúde humana. Compostos químicos provenientes da inadequada disposição de medicamentos podem percolar no solo, promovendo a contaminação dos lençóis freáticos e, potencialmente, atingir as águas superficiais. Este fenômeno não apenas compromete a diversidade biológica dos ecossistemas aquáticos, mas também representa um risco iminente para a saúde pública, dado que tais produtos químicos podem alcançar fontes de água potável (FRANCISCO, 2019).

Há seis fontes primárias de contaminação ambiental por produtos farmacêuticos: aterros sanitários, resíduos de animais, resíduos provenientes da aquicultura, resíduos hospitalares, resíduos industriais e resíduos domésticos, o qual tem sido alvo de atenção pela comunidade científica. Os destinos dos produtos farmacêuticos podem ser categorizados em três grupos distintos: solo, águas subterrâneas e águas superficiais conforme demonstrado na figura 4 (KUMAR, et al. 2023).

Figura 4: Interação de poluentes farmacêuticos em solos, águas superficiais e subterrâneas



Fonte: adaptado de Li, 2014.

Os produtos farmacêuticos são frequentemente identificados em ecossistemas aquáticos, introduzindo-se no meio ambiente, principalmente por meio dos despejos de estações de tratamento de água (ETA) na forma de substâncias inalteradas, metabólitos ou conjugados, após serem parcialmente metabolizados no corpo (ABDALLAT, et al. 2022).

A concentração desses resíduos varia de nanogramas por litro (ng L⁻¹) a microgramas por litro (mg L⁻¹), é considerada baixa, no entanto, os potenciais impactos na saúde humana, na fauna e nos organismos aquáticos ainda não são completamente elucidados, tornando-se essencial a implementação de medidas de controle e eliminação desses poluentes. A maioria desses compostos são persistentes no ambiente e não são totalmente removidos durante o tratamento de efluentes (PURI; GANDHI; KUMAR, 2023).

A crescente preocupação global com os poluentes farmacêuticos, como dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio, destaca seu potencial eco tóxico e sua contribuição significativa para a contaminação dos ecossistemas aquáticos. A presença desses compostos em corpos hídricos suscita inquietações devido aos impactos adversos que podem exercer sobre a biodiversidade aquática e os processos ecossistêmicos, bem como a possível exposição humana. A absorção

desses poluentes por organismos aquáticos e sua subsequente entrada na cadeia alimentar aumentam a probabilidade de exposição humana, podendo acarretar riscos à saúde (DE OLIVEIRA, 2023). A Tabela 1 apresenta uma análise dos poluentes dipirona, diclofenaco de sódio e paracetamol, destacando seus impactos no meio ambiente e na saúde humana.

Tabela 5. Dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio e os riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

Fármacos	Riscos à saúde e ao meio ambiente	Referências
Dipirona (metamizol)	Toxicidade (rins e fígado) e agranulocitose	CESTARI et al. , 2018; CORREIA, 2021
Paracetamol (acetaminofeno)	Incidência de infarto do miocárdio, acidentes cerebrovasculares, hipertensão, incidência de sangramento gastrointestinal e doença renal	ROBERTS et al. , 2016
Diclofenaco de sódio	Efeitos mutagênicos, alterações no fígado, peroxidação lipídica	DA SILVA ESCHER et al. , 2019

3.3 Adsorção

A adsorção é um fenômeno físico-químico no qual os componentes de uma fase gasosa ou líquida são transferidos para a superfície de uma fase sólida. Os elementos que se ligam à superfície são denominados adsorvatos, enquanto a fase sólida responsável por reter o adsorvato é referida como adsorvente. O deslocamento desses constituintes de uma fase para outra é impulsionada pela diferença de concentrações entre o seio do fluido e a superfície do adsorvente. O adsorvente, tipicamente composto por partículas, é disposto em um leito fixo, através do qual a fase fluida flui continuamente até que não ocorra mais transferência de massa. Devido à concentração do adsorvato na superfície do adsorvente, a eficácia da adsorção é diretamente proporcional à extensão desta superfície. Dessa forma, a maximização da eficiência envolve otimização da área superficial do adsorvente. (XUE, et al.; 2023).

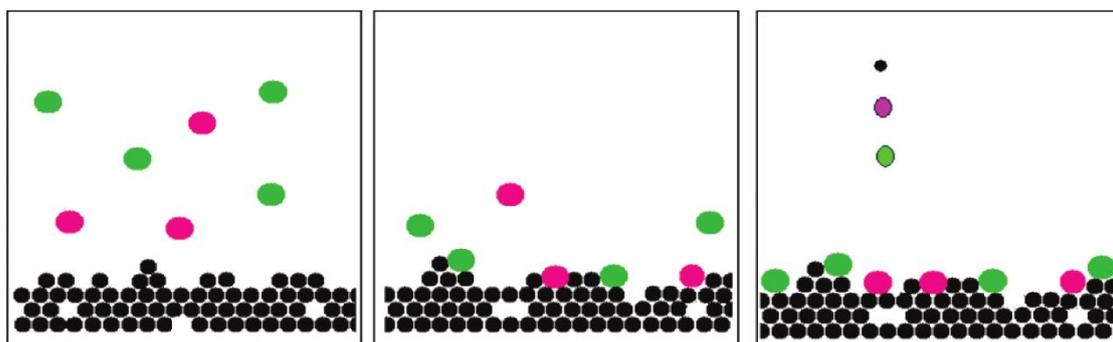
Segundo Letterman, 1999; a adsorção pode ser representada como uma reação química:



Onde: A é o adsorvato, e B é o adsorvente e A.B é o composto adsorvido.

Na Figura 5, é apresentado o diagrama esquemático desta reação química. A representação visual do fenômeno de adsorção em carvão é ilustrada, onde as esferas coloridas simbolizam as moléculas das substâncias hipotéticas A e B, circulando no interior do sistema, sendo subsequentemente adsorvidas na superfície do carvão ativado (representado pelas esferas pretas), após um determinado intervalo de tempo.

Figura 5: processo de adsorção de carvão ativado(adsorvente) na remoção de um adsorvato



Fonte:https://qnint.sbg.org.br/qni/popup_visualizarConceito.php?idConceito=50&semFrame=1

É um processo que pode ser afetado por diversos fatores, como a natureza do adsorvente, a solubilidade do soluto, o pH do meio e a temperatura, além de ser influenciada pela estrutura molecular ou natureza do adsorvente, bem como pelo diâmetro molecular do adsorvato. Compostos com diâmetros moleculares menores têm maior facilidade de difusão para o interior do sólido, o que aumenta a adsorção (SELLAOUI, et al.; 2023).

A adsorção pode ser dividida em dois tipos principais variando de acordo com a natureza das forças que atuam entre o adsorvato e o adsorvente: adsorção química ou quimissorção e adsorção física ou fissorção (AHMED, 2017).

Na adsorção química, as moléculas ou átomos do adsorvato são atraídos para a superfície do adsorvente por forças químicas, como as ligações covalentes. Essas forças são fortes e envolvem a transferência de elétrons entre as moléculas ou átomos envolvidos. A adsorção química é um processo

irreversível, pois as moléculas ou átomos do adsorvato são ligados covalentemente à superfície do adsorvente (ABD, et al.; 2020).

Na adsorção física, as moléculas ou átomos do adsorvato são atraídos para a superfície do adsorvente por forças intermoleculares, como as forças de Van der Waals. Essas forças são fracas e não envolvem a formação de ligações químicas. A adsorção física é um processo reversível, pois as moléculas ou átomos do adsorvato podem ser desservidos da superfície do adsorvente com facilidade (XU, et al.; 2020). A tabela 5 mostra as principais diferenças entre a Fississorção e a Quimissorção

Tabela 6: Comparação entre os processos Fississorção e Quimissorção

Característica	Fississorção	Quimissorção
Forças envolvidas	Forças de Van der Waals	Forças comparáveis a ligações químicas
Calor de adsorção	Menor que 20 kJ/mol	Maior que 20 kJ/mol
Natureza da espécie adsorvida	Conservada	Transformada
Quantidade adsorvida	Depende mais do adsorvato	Depende tanto do adsorvato quanto do adsorvente
Especificidade	Baixa	Elevada
Temperatura	Adsorção apreciável somente abaixo do ponto de ebulição do adsorvato	Adsorção pode acontecer a qualquer temperatura
Energia de ativação	Baixa	Elevado
Tipo de camada adsorvida	Monocamada	Multicamada

Fonte: Israelachvili, 2011

A adsorção é amplamente utilizada em processos industriais, como purificação de gases e água, desodorização de alimentos e separação de misturas. Além disso, é aplicada em produtos de consumo, como filtros de água, desodorizantes de ambiente e absorventes (ANASTOPOULOS, et al.; 2018).

Conforme as diretrizes da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), os materiais adsorventes podem ser classificados em três categorias

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

principais com base no tamanho médio de seus poros conforme representado na Tabela 6.

Tabela 7: Classificação dos poros de acordo com o tamanho

Classificação	Tamanho do poro
Microporos	Diâmetro < 2nm
Mesoporos	2 nm < Diâmetro < 50 nm
Macroporos	Diâmetro > 50nm

Fonte: IUPAC (1982).

Entre os adsorventes mais empregados, destacam-se as aluminas, zeólitas sintéticas, carvões ativados, polímeros orgânicos, sílicas gel e algumas variedades de argilas. No entanto, constantemente se busca inovação no desenvolvimento de materiais adsorventes eficazes utilizando fontes de matéria-prima acessíveis e econômicas (ATEIA, HELBLING, DICHTTEL; 2020).

3.2.1 Adsorção de fármacos

A adsorção de compostos farmacológicos vem despertando interesse da comunidade científica no que diz respeito a remoção em meios aquosos. Nesse contexto, devido à baixa eficiência das técnicas convencionais e à desvantagem da produção de lodo, que pode conter fármacos ou seus derivados de degradação, torna-se crucial incorporar uma etapa adicional para a eficaz eliminação desses resíduos (MICHELAN, 2019).

Tratamentos terciários, que incluem tecnologias avançadas como adsorção ou processos oxidativos, surgem como alternativas viáveis para a remoção de produtos farmacêuticos. Essas abordagens, baseadas em princípios de adsorção seletiva ou reações de oxidação avançada, destacam-se pela capacidade de eliminar resíduos farmacêuticos de maneira eficaz, mitigando assim os riscos associados à presença dessas substâncias em águas tratadas (HARO, 2017).

Estudo realizado por Molu e Yurdakoç (2014) utilizou argilas associadas a alumínio para remoção do antibiótico trimetoprima (TMP) em meio aquoso. Nesse estudo, ficou evidenciado que o processo de adsorção da TMP era

dependente do pH das soluções e que houve um aumento da capacidade utilizando quantidade mais baixas desse adsorvente. Enquanto Tian et al. (2019), destacaram a eficácia de aerogéis de sílica e de carbono na adsorção de terramicina em águas contaminadas.

A temperatura é outro parâmetro que influencia no processo de adsorção em interfaces sólido-solução. Estudos realizados por Lovino et al. (2015) avaliaram a adsorção do ibuprofeno (IBP), um anti-inflamatório não esteroidal em carvão ativado granular e verificaram que a quantidade do fármaco adsorvido aumentava com o aumento da temperatura, pois nessas condições há uma maior concentração de espécies não ionizadas do ibuprofeno.

3.4 Compósitos

Compósito é um tipo de material multifásico e heterogêneo criado pela combinação de dois ou mais materiais cujo objetivo é a obtenção de um novo material que seja útil e que apresente propriedades superiores aos seus componentes individuais (KHALID, ARIF; 2022).

Esse material composto é constituído por dois elementos principais: a carga ou reforço, que é a fase dispersa, e a matriz, que é a fase contínua conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6: Representação de um compósito



Fonte: <https://www.fibrenamics.com/intelligence/reports/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades>

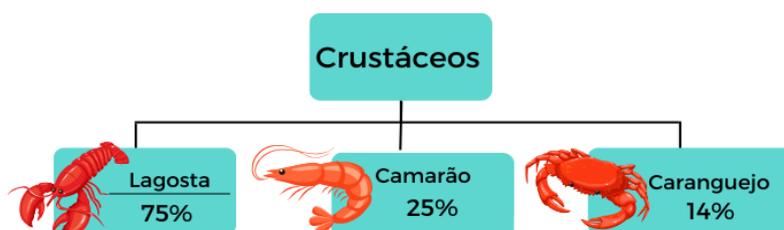
As propriedades dos compósitos são influenciadas pelas características das fases, suas quantidades e a geometria da carga. A matriz pode ser feita de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos e tem a função

de envolver o reforço, além de proporcionar acabamento à peça. As cargas podem ser inorgânicas ou de origem natural e podem variar em natureza e composição (KRAUKLIS, et al.; 2021).

3.5 Quitosana

A quitosana se destaca como um biopolímero versátil e promissor devido às suas propriedades biodegradáveis, biocompatíveis e não tóxicas. Derivada da quitina, presente em uma variedade de organismos como crustáceos, insetos, fungos e até mesmo em alguns peixes, a quitosana conquista cada vez mais espaço em diferentes áreas. Os crustáceos, como camarões, lagostas e caranguejos, são as principais fontes de quitina, com lagostas liderando com uma composição impressionante de 75%, seguidas por camarões com 25% e caranguejos com 14%. Além disso, insetos como borboletas e larvas de moscas também emergem como fontes alternativas promissoras, com larvas de moscas alcançando até 54% de quitina e borboletas exibindo 64%. Os fungos, como *Aspergillus niger* e *Penicillium chrysogenum*, demonstram um potencial significativo na produção de quitosana, com teores de quitina de 42% e 19,5%, respectivamente (figura 7). Embora menos explorados, alguns peixes, como a tilápia, revelam a presença de quitina em suas escamas. Essa diversidade de fontes de quitina oferece um vasto campo para pesquisas e aplicações, promovendo o desenvolvimento de novos materiais e terapias em áreas que vão desde a medicina até a indústria alimentícia e de cosméticos (CHATTERJEE, 2019; PAL, et al. 2021).

Figura 7 – Diferentes fontes de quitina



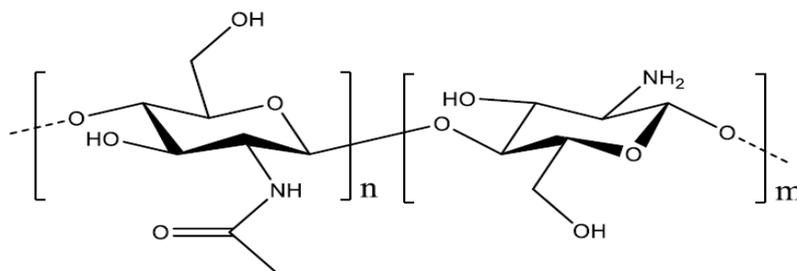


Fonte: Autor (2023)

O processo de desacetilação da quitina gera grupos amino primários através da remoção dos grupos acetil, resultando na formação de um polímero de D-glucosamina chamado quitosana. A quitosana e a quitina são polissacarídeos lineares constituídos por unidades de N-acetil-2-amino-2-desoxi-D-glicose e 2-amino-2-desoxi-D-glicose. Diferentemente da quitosana, a quitina apresenta menos unidades de 2-amino-2-desoxi-D-glicose, o que resulta em uma menor solubilidade deste polissacarídeo em meio ácido, enquanto a quitosana possui um maior número de unidades de 2-amino-2-desoxi-D-glicose, o que a torna solúvel em meio ácido. (VILLAR-CHAVERO et al., 2019).

Os grupos funcionais $-NH_2$ e $-OH$ livres na estrutura da quitosana (Figura 8) possibilita a interação com outros polímeros e moléculas biológicas, sendo estes grupos funcionais responsáveis por sua alta capacidade de adsorção. (JAWAD, NORRAHMA, HAMEED E ISMAIL, 2019).

Figura 8: Representação esquemática da estrutura química da quitosana



Fonte: Chatterjee, (2019)

O grupo amino confere atividade antioxidante e antimicrobiana inerente à quitosana, além disso, como a quitosana é de origem natural, é biodegradável, não tóxica e segura para consumo humano (USMAN et al., 2019).

3.5.1 Quitosana como matriz do compósito

A quitosana desempenha um papel crucial como matriz em compósitos, fornecendo uma estrutura tridimensional coesa para a incorporação de fibras ou partículas de reforço. Essa matriz resistente e rígida contribui significativamente para melhorias nas propriedades mecânicas do compósito, conferindo-lhe a capacidade de suportar forças externas. Além disso, a quitosana destaca-se pela sua biocompatibilidade, tornando-a particularmente adequada para aplicações médicas, incluindo implantes e curativos. Para aprimorar ainda mais as propriedades mecânicas, tecnologias como a utilização de misturas de polímeros e reforço podem ser empregadas (AMBAYE et al. 2022).

No contexto da formação de filmes, a quitosana demonstra uma facilidade comparável a outros polissacarídeos, como goma e ácido algínico. Os filmes resultantes exibem boas propriedades mecânicas e uma notável capacidade de barreira ao vapor de água e ao oxigênio. Contudo, para aprimorar ainda mais a propriedade mecânica desses filmes, técnicas como o uso de misturas de quitosana com diferentes polímeros podem ser empregadas, resultando em materiais com propriedades físicas, mecânicas, térmicas, ópticas e de barreira aprimoradas, conforme destacado por estudos anteriores (HAGHIGHI et al., 2020; PAL et al., 2021).

Essas estratégias de mistura e reforço de quitosana com diversos polímeros, sejam naturais ou sintéticos, oferecem a vantagem de melhorar de forma abrangente as características dos materiais resultantes. A capacidade de formar uma matriz homogênea ou um sistema de matriz com fases separadas destaca a versatilidade dessas misturas, proporcionando soluções adaptáveis às demandas específicas de cada aplicação. Essa abordagem inovadora, baseada em conhecimentos consolidados na literatura, evidencia a quitosana como uma escolha versátil e promissora na formulação de compósitos com propriedades otimizadas (HAGHIGHI et al., 2020).

3.6 Resíduos Agroindustriais como reforço dos compósitos

Os resíduos agroindustriais representam uma ameaça significativa ao meio ambiente, são gerados pela atividade agropecuária e industrial, variam em matéria orgânica, resíduos de processo, produtos químicos e metais pesados. Podem causar poluição do ar, da água e do solo, diretamente e indiretamente, contribuindo para o aquecimento global e outros impactos ambientais. A gestão adequada dos resíduos agroindustriais é essencial para mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde humana e animal (DO NASCIMENTO, et al. 2020).

No Brasil, os resíduos agroindustriais são uma classe de resíduos sólidos definida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A gestão de resíduos agroindustriais no Brasil é regulamentada pela Lei Federal nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A ABNT NBR 16.294/2022 estabelece diretrizes para a gestão de resíduos agroindustriais (BRASIL, 2010).

De acordo com Ortega, et al. (2022), a conscientização a respeito da necessidade da preservação dos recursos naturais não renováveis levou ao desenvolvimento de materiais poliméricos de alto valor agregado pois são matérias-primas de baixo custo derivados de fontes renováveis, que são em sua maioria biodegradáveis.

Nesse sentido, os compósitos de base biológica obtidos a partir de resíduos agroindustriais têm sido utilizados para tratamento de águas contaminadas por grupos farmacológicos conforme demonstrado na Tabela 7.

Tabela 8: Resíduos agroindustriais utilizados no desenvolvimento de biocompósitos para remoção de fármacos do meio aquoso.

Resíduo Agroindustrial	Fármaco	Referência
Casca de amendoim	Propranolol, paracetamol	Freitas et al. (2022)
Sementes de <i>Dialium guineense</i>	Ciprofloxacino	Eze et al. (2021)
Casca do coco de babaçu	Metronidazol	Borsato et al. (2018)
Serragem	Tetraciclina	Alidadi et al. (2018)
Borra de café	Ácido acetilsalicílico	Lessa et al. (2018)

Fonte: Autor (2023)

3.6.1 Borra de Café

A borra de café é o resíduo sólido e orgânico que sobra após o preparo do café. É composta, principalmente, por grãos de café triturados, cascas de grãos de café, óleos de café e cafeína. É um material rico em nutrientes e compostos bioativos (ALHOGBI, 2017).

Segundo Geraldi et al. (2021), a torra do café é um processo que envolve o aquecimento dos grãos de café a temperaturas elevadas, geralmente entre 180 e 230 °C. Durante a torra, ocorrem uma série de mudanças físicas e químicas nos grãos, incluindo o surgimento de microporos maiores na parede celular, devido a abertura da matriz celular. Essa mudança na estrutura do café faz com que ocorra um aumento considerável na quantidade de polissacarídeos, e outros componentes conforme descritos na tabela 8.

Tabela 9: Composição do resíduo da borra de café

Componentes	Percentual (%)
Carboidratos	45 a 47
Proteína	13 a 17
Lipídios	9 a 16

Fonte: Martinez-Saez, et al. (2017); Kovalcik, (2018)

É um material versátil com potencial de valorização sustentável. Seu aproveitamento contribui para a redução da poluição ambiental e o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias. O aumento da produção de resíduos de diversas matrizes, decorrente do desenvolvimento agrícola, industrial e da expansão demográfica nas últimas décadas, gera impactos socioambientais, como a propagação de doenças e a contaminação do meio ambiente. (KOVALCIK, 2018).

O tratamento adequado e/ou o reaproveitamento desses resíduos contribuem para uma economia circular e um ciclo de vida sustentável. A borra de café se destaca por ser um material de baixo custo, tornando

economicamente viável esse processo e, ao mesmo tempo, agregando valor social e ambiental a esse resíduo comum (SANTOS, 2020).

O resíduo da borra de café é abundante, sendo gerado em cafeterias, indústrias de café instantâneo e residências. A cada quilo de café instantâneo produzido, são gerados 2 quilos de borra de café úmida. Nesse cenário, surgiu a oportunidade de utilizar a borra de café lavado (BCL) como um adsorvente na remoção de íons de cobre (II) de soluções aquosas, especialmente em tratamentos de águas residuais industriais ou efluentes que contenham esse metal. (FREITAS, 2018).

A borra é rica em carbono, o que a torna um bom adsorvente. Além disso, ela está prontamente disponível e pode ser utilizada para produzir carvão ativado, um tipo de adsorvente de alto desempenho. A borra de café se encaixa nos requisitos para a produção de adsorventes de baixo custo, pois é rica em carbono e possui grupos funcionais com afinidades específicas. Além disso, é prontamente disponível e mostra potencial como material precursor na fabricação de carvão ativado. Devido a essas características, o interesse industrial pelo uso da borra como adsorvente tem aumentado consideravelmente, especialmente após passar por tratamentos adequados para otimizar suas propriedades (QUITINO, 2021).

Estudos de adsorção realizados por Lessa et al. (2018), incorporou 5% em peso de pó de borra de café em um compósito contendo quitosana e álcool vinílico. Esse compósito apresentou um aumento significativo (de 10% a 44%) na capacidade de adsorção de certos produtos farmacêuticos (dipirona, ácido acetilsalicílico, paracetamol e cafeína) quando comparado com a amostra original. O resultado sugere que a presença do pó de borra de café na matriz quitosana/álcool vinílico aumenta o número de sítios de adsorção na superfície adsorvente, favorecendo assim o processo de adsorção.

3.6.2 Pó de Serragem

O pó de serra, um subproduto gerado durante as atividades de marcenaria e corte de madeira, é uma fonte frequentemente subestimada e, no entanto, valiosa de material renovável. Esse resíduo é composto por minúsculas partículas de madeira provenientes do processo de serragem e lixamento, e possui um enorme potencial tanto na indústria quanto para a conservação do meio ambiente.

Sua composição química está descrita na tabela 9. Esses componentes são polímeros que possuem grupos funcionais hidroxilas, carbonilas e fenóis (MALLAKPOUR, 2021).

Tabela 9: Composição do resíduo do pó de serra

Componentes	Percentual (%)
Carboidratos	50 a 60
Proteína	2 a 4
Lipídios	1 a 3

Fonte: Mallakpour (2021)

Estudos epidemiológicos em humanos indicaram um aumento na incidência de câncer no nariz relacionado à inalação da serragem. Do ponto de vista legal, a Administração de Segurança e Saúde Ocupacional estabelece limites de exposição durante uma jornada de trabalho de 8 horas, com uma exposição total permitida de até 15 mg.m⁻³ em ambientes de trabalho, e uma exposição respiratória de 5 mg.m⁻³. Quando a serragem é descartada em corpos d'água, ela é degradada por bactérias, mas esse processo requer consumo de oxigênio dissolvido na água. O excesso de demanda biológica de oxigênio pode levar à asfixia de peixes e outras espécies aquáticas, prejudicando o ecossistema aquático (ADEGOKE, 2022).

A serragem é um material promissor para tratamento de água devido às suas propriedades, como alto teor de carbono, grande área superficial, porosidade, biodegradabilidade, baixa densidade, acessibilidade e baixo custo (YIN, 2020). Ao integrar o pó de serra em compósitos adsorventes, seja em conjunto com polímeros naturais como a quitosana ou em matrizes de carbono ativado, cria-se uma estrutura sinérgica que otimiza a eficácia da adsorção (TEIXEIRA, 2023). A porosidade do pó de serra facilita a retenção efetiva de fármacos, enquanto os polímeros ou carbono ativado proporcionam estabilidade estrutural e simplificam a regeneração do adsorvente para uso contínuo. Esse processo demonstra um potencial significativo para aplicação em tecnologias de remediação ambiental e tratamento de águas contaminadas (GUO, 2020).

3.6.3 Pó da Casca do Coco

A produção de coco tem aumentado no Brasil, principalmente no estado de São Paulo, devido ao consumo de água de coco. Isso representa um problema ambiental, pois cerca de 80 a 85% do peso do coco é descartado (cascas). Esse problema é pior nos centros urbanos, onde as cascas são difíceis de descartar e acabam em lixões e aterros sanitários. As cascas são um material difícil de decompor, levando mais de oito anos para o processo, logo faz-se necessário reutilizar as cascas do ponto de vista econômico, social e ambiental (BRAINER. 2018). Segundo Pisanu, 2018, a composição química da casca do coco pode apresentar variações consideráveis devido a fatores como a proveniência geográfica, a cultivar específica e o método de processamento. De modo geral, a composição do pó da casca do coco está representada na tabela 10.

Tabela 11: Composição do pó da casca do coco

Componentes	Percentual (%)
Carboidratos	40 a 50
Proteína	10 a 15
Lipídios	5 a 10

Fonte: Pisanu (2018)

Essas características conferem ao substrato de fibra de coco grande durabilidade. Sua principal utilização ocorre como substrato agrícola, devido à sua estrutura física favorável que proporciona alta porosidade e uma excelente capacidade de retenção de umidade. Além disso, é um material biodegradável. As propriedades físicas e químicas do substrato de fibra de coco variam de acordo com a fonte do resíduo e o método de processamento. Portanto, é importante verificar as características do material antes de utilizá-lo.

O coco verde é um material adsorvente promissor, pois possui um alto teor de matéria orgânica, principalmente lignina e celulose. Essas substâncias possuem grupos funcionais hidroxilas, metoxi e carboxílicos, que podem ser sítios de adsorção de metais (KRAUSE, 2017).

A celulose e a lignina são biopolímeros amplamente reconhecidos por sua capacidade na remoção de metais pesados. A celulose, por definição, é um

polímero formado por cadeias de glicose, e, portanto, níveis elevados de glicose indicam altos teores de celulose. A lignina, por sua vez, atua como um aglutinante, mantendo as cadeias de celulose unidas. É essa combinação de celulose e lignina que confere às plantas sua resistência e flexibilidade características. A interação desses biopolímeros com metais pesados oferece uma base sólida para diversos processos de remoção, destacando seu papel fundamental na purificação ambiental e em várias aplicações industriais (HWANG, 2016).

A celulose e a lignina são biopolímeros amplamente reconhecidos por sua capacidade na remoção de metais pesados. A celulose, por definição, é um polímero formado por cadeias de glicose, e, portanto, níveis elevados de glicose indicam altos teores de celulose. A lignina, por sua vez, atua como um aglutinante, mantendo as cadeias de celulose unidas. É essa combinação de celulose e lignina que confere às plantas sua resistência e flexibilidade características (NASCIMENTO, 2020).

4 REFERÊNCIAS

ABD, A. A. et al. Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104142, 2020.

ABDALLAT, G. A. et al. Pharmaceuticals as emerging pollutants in the reclaimed wastewater used in irrigation and their effects on plants, soils, and groundwater. **Water**, v. 14, n. 10, p. 1560, 2022.

ADEGOKE, Kayode Adesina et al. Sawdust-biomass based materials for sequestration of organic and inorganic pollutants and potential for engineering applications. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 5, p. 100274, 2022.

AHMED, M. J. Adsorption of non-steroidal anti-inflammatory drugs from aqueous solution using activated carbons. **Journal of environmental management**, v. 190, p. 274-282, 2017.

ALHOGBI, Basma G. Potential of coffee husk biomass waste for the adsorption of Pb (II) ion from aqueous solutions. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, v. 6, p. 21-25, 2017.

ALIDADI, H. et al. Enhanced removal of tetracycline using modified sawdust: Optimization, isotherm, kinetics, and regeneration studies. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 117, p. 51-60, 2018.

ALMEIDA, Amanda Andrade. Descarte inadequado de medicamentos vencidos: efeitos nocivos para a saúde e para a população. *Revista Saúde e Meio Ambiente*, v. 9, n. 2, 2019.

ALMONDES, Manuela Nátaly et al. Study of Chytosan Membranes produced form the incorporation of extract of *Anacardium Occidentale* Linn: Estudo das Membranas de Quitosana produzidas a partir da incorporação de extrato de *Anacardium Occidentale* Linn. *Concilium*, v. 23, n. 13, p. 321-334, 2023.

ALVES, R. R. et al. PRODUÇÃO DE QUITOSANA A PARTIR DO RHYNCHOPHORUS PALMARUM: UMA PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA. **Humanidades & Inovação**, v. 8, n. 49, p. 343-353, 2021.

AMBAYE, T. G. et al. Preparation and applications of chitosan and cellulose composite materials. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113850, 2022.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

ANVISA. Bulário Eletrônico. Acesso em: 24 set. 2023. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/datavisa/fila_bula/index.asp. Acesso em 27.09.2023.

ANASTOPOULOS, L. et al. Use of nanoparticles for dye adsorption. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 39, n. 6, p. 836-847, 2018.

ARRAIS, Paulo Sérgio Dourado et al. Prevalência da automedicação no Brasil e fatores associados. *Revista de saúde pública*, v. 50, 2016.

ATEIA, M.; HELBLING, D. E.; DICHTTEL, W. R. Best practices for evaluating new materials as adsorbents for water treatment. **ACS Materials Letters**, v. 2, n. 11, p. 1532-1544, 2020.

BATISTA, A. C. L.; SOUZA, F. E.; PAIVA, W. S. Review of fungal chitosan: past, present and perspectives in Brazil. **Polímeros**, v. 28, p. 275-283, 2018.

BOARIN-ALCALDE, L.; GRACIANO-FONSECA, G. Alkali process for chitin extraction and chitosan production from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) scales. **Latin American Journal of Aquatic Research**, v. 44, n. 4, p. 683-688, 2016.

BONNEFILLE, Bénilde et al. Diclofenac in the marine environment: a review of its occurrence and effects. *Marine pollution bulletin*, v. 131, p. 496-506, 2018.

BORSATO, F. P. et al. Avaliação do mecanismo de adsorção do metronidazol em carvão ativado da casca do coco babaçu. 2018.

BRASIL. Farmacopeia Brasileira. vol. 1. 6ed ed. Brasília, 2019.

BUSTO, Raquel Vieira et al. Anaerobic biodegradation of dipyrone: Determination of transformation products by LC-HRMS and ecotoxicity assessment using target organisms and QSAR model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 3, p. 107740, 2022.

CABRAL, LUCIANO CRISTIAN; RIBEIRO, FLÁVIO DE MIRANDA. A IMPORTÂNCIA DA REGULAÇÃO AMBIENTAL NA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS FRENTE AOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL ODS 6 E ODS 14: O CASO DOS PARABENOS. *LEOPOLDIANUM*, v. 48, n. 135, 2022.

CANTARELLA, M.; CARROCCIO, S. C.; DATTILO, S.; AVOLIO R.; CASTALDO R.; PUGLISI C.; PRIVITTERA, V. Molecularly imprinted polymer for selective adsorption of diclofenac from contaminated water. *Chemical Engineering Journal*, v. 367, p. 180-188, 2019.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

CESTARI, MARTA MARGARETE et al. 290-AVALIAÇÃO DA GENOTOXICIDADE DA MISTURA DOS MICROPOLUENTES DÍPIRONA E PARACETAMOL NO PEIXE *Rhamdia quelen*. 1ª. EDIÇÃO, p. 349.

CHEN, Jinlin et al. A review of genetic advances related to sex control and manipulation in tilapia. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 49, n. 2, p. 277-291, 2018.

CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE. Guia para o Descarte de Medicamentos. Brasília, DF: Conselho Nacional de Saúde, 2017. P. 24.

CORREIA, MÁRIO HENRIQUE RESENDE; BORTOCAN, RENATO. EQUIVALÊNCIA FARMACÊUTICA ENTRE COMPRIMIDOS DE DÍPIRONA 500 mg REFERÊNCIA E GENÉRICO. 2021.

DE ALMEIDA, Kelly Costa et al. Panorama atual do modelo de indução da hepatotoxicidade por paracetamol para estudos de hepatoproteção em ratos: Scoping review/Current overview of the model of induction of hepatotoxicity by paracetamol for studies of hepatoprotection in rats: Scoping review. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 12529-12558, 2022.

DA SILVA ESCHER, Mayara Andria et al. A problemática ambiental da contaminação dos recursos hídricos por fármacos. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, n. 51, p. 141-148, 2019

DE MELO, Marly de Fátima. DOENÇAS DE VEICULAÇÃO HÍDRICA.

DE OLIVEIRA, D. G. et al. ESTUDO COMPARATIVO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE DISPOSITIVOS A BASE DE QUITOSANA NACIONAL. **Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management**, v. 13, n. 3, 2018.

DE OLIVEIRA, Valberto Barbosa et al. IMPACTOS AMBIENTAIS E TOXICOLÓGICOS PELA CONTAMINAÇÃO DE FÁRMACOS PRINCIPALMENTE ANTIBIÓTICOS EM AMBIENTES AQUÁTICOS: REVISÃO DA LITERATURA. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 7, p. 838-850, 2023.

DE SOUZA, A. F. et al. Biotechnological strategies for chitosan production by mucoralean strains and dimorphism using renewable substrates. **International journal of molecular sciences**, v. 21, n. 12, p. 4286, 2020.

DE SOUSA, Juliana Andrade et al. Diclofenaco interfere no desenvolvimento embriolarval de ouriços do mar?. *Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação*, v. 4, n. 1, p. 235-239, 2020.

DI GUIDA, V. H.; DI GUIDA, L. A. Análise epidemiológica da automedicação por analgésicos não opióides em acadêmicos de uma instituição de ensino superior do oeste do Paraná. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 6, p. e1212641761-e1212641761, 2023.

DOS SANTOS, D. F. et al. Non-conventional processes applied for the removal of pharmaceuticals compounds in waters: A review. **Process Safety and Environmental Protection**, 2022.

EZE, S. I. et al. Antibiotic adsorption by acid enhanced *Dialium guineense* seed waste. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 46, p. 309-324, 2021.

FARTO, Cindy Deina et al. CONTAMINANTES EMERGENTES NO BRASIL NA DÉCADA 2010-2019–PARTE I: OCORRÊNCIA EM DIVERSOS AMBIENTES AQUÁTICOS. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 18, n. 2021, 2021.

FILHO, M.X.P [et al.]. Caracterização da cadeia produtiva da tilápia nos principais polos de produção do Brasil/autores, Palmas, TO: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2020.

FRANCO, Marcela Andrea Espina de. Adsorção de fármacos em carvão ativado: processo em batelada, leito fixo e modelagem das curvas de ruptura. 2018.

FRANCISCO, Maria Aparecida Mendes. Implantação de piloto do Programa Lixo Zero Guarulhos, no Gabinete do Prefeito-GB, Secretaria de Governo Municipal-SGM e demais órgãos da administração que funcionam no Paço Municipal, norteadas pela Agenda 2030. 2019.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

FREITAS, A. M. Uso da borra de café como adsorvente para resíduos de cromo (2018. Monografia (Curso de Engenharia Química) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

GUIMARÃES, Flávia de Paula Gonçalves et al. POLÍTICA DE PROIBIÇÃO DA DIPIRONA. **Revista Augustus**, v. 27, n. 54, p. 96-108, 2021.

GUL-E-SABA CHAUDHRY, C. S. et al. Characterization and cytotoxicity of low-molecular-weight chitosan and chito-oligosaccharides derived from tilapia fish scales. **Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research**, v. 12, n. 4, p. 373, 2021.

GUO, Ruixue et al. β -Cyclodextrin polymerized in cross-flowing channels of biomass sawdust for rapid and highly efficient pharmaceutical pollutants removal from water. **ACS applied materials & interfaces**, v. 12, n. 29, p. 32817-32826, 2020.

HAGHIGHI, H. et al. Recent advances on chitosan-based films for sustainable food packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 26, p. 100551, 2020.

HAMEDI, H. et al. Chitosan based bioadhesives for biomedical applications: A review. **Carbohydrate Polymers**, p. 119100, 2022.

HARO, Nathalia Krummenauer. Remoção dos fármacos Atenolol, Paracetamol e Ampicilina por adsorção em carvão ativado. 2017.

HE, Bing-shu et al. Eco-pharmacovigilance of non-steroidal anti-inflammatory drugs: Necessity and opportunities. **Chemosphere**, v. 181, p. 178-189, 2017.

HOEFLER, Rogério et al. Trends in sales of antidepressants in Brazil from 2014 to 2020: A time trend analysis with joinpoint regression. **Journal of Affective Disorders**, v. 323, p. 213-218, 2023.

HUQ, T. et al. Sources, Production and Commercial Applications of Fungal Chitosan: A Review. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, 2022.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

IOVINO, P., CANZANO, S., CAPASSO, S., *et al*, "A modeling analysis for the assessment of ibuprofen adsorption mechanism onto activated carbons," *Chemical Engineering Journal*, v. 277, pp. 360–367, 2015.

ISRAELACHVILI, J. Intermolecular and Surface Forces; Israelachvili. 2011.

JABER, N. et al. A review of the antiviral activity of Chitosan, including patented applications and its potential use against COVID-19. **Journal of Applied Microbiology**, v. 132, n. 1, p. 41-58, 2022.

KALEDHONKAR, Sandip et al. Late steps in bacterial translation initiation visualized using time-resolved cryo-EM. *Nature*, v. 570, n. 7761, p. 400-404, 2019.

KHALID, M. Y.; ARIF, Z. U. Novel biopolymer-based sustainable composites for food packaging applications: A narrative review. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 33, p. 100892, 2022.

KOU, S. G.; PETERS, L. M.; MUCALO, M. R. Chitosan: A review of sources and preparation methods. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 169, p. 85-94, 2021.

KRAUKLIS, A. E. et al. Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 1, p. 28, 2021.

KUMAR, M. et al. Current research trends on emerging contaminants pharmaceutical and personal care products (PPCPs): A comprehensive review. **Science of The Total Environment**, v. 859, p. 160031, 2023.

LASCOSK, Luiza et al. **Valorização da cinza industrial na remoção da dipirona sódica e estudo de sua reatividade em matriz de cimento Portland**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LEE, W. J. et al. Removal of pharmaceutical contaminants from aqueous medium: a state-of-the-art review based on paracetamol. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 45, p. 7109-7135, 2020.

LETTERMAN, Raymond D. WATER QUALITY AND TREATMENT A Handbook of Community Water Supplies Fifth Edition. McGraw-Hill, Inc., 1999.

LIMA, SARA RAQUEL LAURENTINO BARBOSA DE; AMARAL, VIVIANE SOUZA; NAVONI, Julio Alejandro. Logística reversa de medicamentos no Brasil: uma análise socioambiental. *Estudos Avançados*, v. 37, p. 159-178, 2023.

LOPES, J. C. et al. Biomassa e extração de quitina e quitosana a partir de isolados de *Cunninghamella* sp. *Semina: Ciências Biológicas e da Saúde*, v. 38, n. 1, p. 25-34, 2017.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

LOVINO, P. et al. A modeling analysis for the assessment of ibuprofen adsorption mechanism onto activated carbon. *Chem. Eng. J.*, v. 277, p. 360-367, 2015.

LI, W. C., "Occurrence, sources, and fate of pharmaceuticals in aquatic environment and soil," *Environmental Pollution*, v. 187, pp. 193–201, 2014.

MADIKIZELA, L. M.; PAKADE, V. E. Trends in removal of pharmaceuticals in contaminated water using waste coffee and tea-based materials with their derivatives. **Water Environment Research**, p. e10857, 2023.

MALLAKPOUR, Shadpour; SIROUS, Fariba; HUSSAIN, Chaudhery Mustansar. Sawdust, a versatile, inexpensive, readily available bio-waste: From mother earth to valuable materials for sustainable remediation technologies. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 295, p. 102492, 2021

Ministério da Saúde. **Farmacopeia Brasileira**. 6. ed. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2019.

MING-ZHE, Lv et al. Preparation and properties of natural rubber/chitosan microsphere blends. *Micro & Nano Letters*, v. 12, n. 6, p. 386-390, 2017., Lv et al. Preparation and properties of natural rubber/chitosan microsphere blends. *Micro & Nano Letters*, v. 12, n. 6, p. 386-390, 2017.

MOHEBI DERAKHSH, Parastoo et al. Toxic effects of diclofenac on gills, liver and kidney of *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, v. 19, n. 2, p. 735-747, 2020.

MOLU, Z. B., YURDAKOÇ, K., "Preparation and characterization of aluminum pillared K10 and KSF for adsorption of trimethoprim," *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 127, n. 1–2, pp. 50–60, 2014.

MORAIS, Jonas Mendonça et al. FÁRMACOS E MEDICAMENTOS COMO GERADORES DE CONHECIMENTOS NO ENSINO DE QUÍMICA. 2023.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

NATIVIDADE, Julia Resende et al. Desenvolvimento de um compósito de quitosana reticulada e fibra da casca da banana-maçã para remoção de Lauril Éter Sulfato de Sódio em meio aquoso. 2021.

NETO, Nelson Mulati et al. AÇÃO CORRETA: A DESTINAÇÃO DE EMBALAGENS PLÁSTICAS DE MEDICAMENTOS. 2018.

ORTEGA, F. et al. Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products. **Emergent Materials**, v. 5, n. 3, p. 873-921, 2022.

PADHI, S. et al. Uses of chitosan in drug delivery. In: **Chitosan in Biomedical Applications**. Academic Press, 2022. p. 139-162.

PAL, K. et al. Selected applications of chitosan composites. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 20, p. 10968, 2021.

PELE, M. A. et al. Development and improved selected markers to biosurfactant and bioemulsifier production by *Rhizopus* strains isolated from Caatinga soil. *African Journal of Biotechnology*, v. 17, n. 6, p. 150-157, 2018.

PENHA, V. C. S. et al. Produção de microesferas de quitosana para fins farmacêuticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 55941-55973, 2020.

PERUSSOLO, Maiara Carolina et al. Uma abordagem de multibiomarcadores para investigar os efeitos do paracetamol no eixo de regulação da reprodução de machos do bagre Neotropical *Rhamdia quelen*. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 35, p. e27, 2023.

PRASAD, A., DEVENDAR, B., SANKAR, M. R., et al, "Micro-Scratch Based Tribological Characterization of Hydroxyapatite (HAp) Fabricated through FishScales," *Materials Today: Proceedings*, v. 2, n. 4–5, pp. 1216–1224, 2015.

PURI, M.; GANDHI, K.; KUMAR, M. S. Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *Journal of Environmental Management*, v. 332, p. 117344, 2023.

QUITINO, Melquisedeque et al. Utilização de resíduos de café para remoção adsorptiva de corantes em solução aquosa. 2021.

RIBAS, Felipe Brondani Teixeira; SILVA, William Leonardo da. Biossorção: uma revisão sobre métodos alternativos promissores no tratamento de águas residuais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13212, 2023.

ROBERTS, Emmert et al. Paracetamol: not as safe as we thought? A systematic literature review of observational studies. *Annals of the rheumatic diseases*, v. 75, n. 3, p. 552-559, 2016.

ROLLIM, V. M. et al. Comportamento de diferentes tipos de membranas de quitosana implantadas em equinos. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 39, p. 837-842, 2019.

ROSLAN, Jumardi et al. Caracterização de hidrolisado protéico de peixe de subproduto de tilápia (*Oreochromis niloticus*). **Agricultura e Ciências Agrárias Procedia**, v. 2, p. 312-319, 2014.

SELLAOUI, L. et al. Adsorption of emerging pollutants on lignin-based activated carbon: Analysis of adsorption mechanism via characterization, kinetics and equilibrium studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 452, p. 139399, 2023.

SILVA, Mairon Mota et al. O uso crônico de anti-inflamatórios não-esteroidais e seus efeitos adversos. *Cadernos da Medicina-UNIFESO*, v. 2, n. 2, 2019.

Santos, F.; Eichler, P.; Machado, G.; Mattia, J.; Souza, G. By-products of the sugarcane industry. *Sugarcane Biorefinery*, Chapter 2, p. 21-48, 2020.

TEIXEIRA, Roberta Arlêu. Desenvolvimento de adsorventes híbridos e compósitos com o foco na remoção de fármacos e corantes sintéticos em águas. 2023.

TIAN, X. et al. Adsorção de antibióticos em solução aquosa por diferentes aerogéis. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 505, p. 72-78, 2019.

VIDAL, Maria de Fátima; XIMENES, Luciano Feijão. Produção de pescados na área de atuação do BNB. 2019.

XU, C. et al. Novel composite oxygen-containing resins with effective adsorption towards anilines: physical & chemical adsorption. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 95, n. 8, p. 2187-2194, 2020.

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

XUE, H. et al. Efficient adsorption of anionic azo dyes on porous heterostructured MXene/biomass activated carbon composites: Experiments, characterization, and theoretical analysis via advanced statistical physics models. **Chemical Engineering Journal**, v. 451, p. 138735, 2023.

YIN, Zichao et al. Preparation of superhydrophobic magnetic sawdust for effective oil/water separation. *Journal of Cleaner Production*, v. 253, p. 120058, 2020.

CAPÍTULO II

Artigo: **REMOÇÃO EFICAZ DO PARACETAMOL DE SOLUÇÃO AQUOSA USANDO COMPÓSITO SUSTENTÁVEL A BASE DE QUITOSANA E BORRA DE CAFÉ**

Submetido a **Brazilian Archives of Biology and Technology**

ISSN (Versão on-line): 1678-4324

Qualis CAPES: A4

Remoção eficaz do paracetamol de solução aquosa usando compósito sustentável a base de quitosana e borra de café

Effective removal of paracetamol from aqueous solution using sustainable composites based on chitosan and spent coffee grounds

Sérgio Selisman Silva Dantas¹; Uiara Maria de Barros Lira Lins²; Valdemir Alexandre dos Santos; Galba Maria Campos-Takaki³; Marcos Antônio Barbosa Lima⁴

RESUMO

Diante do aumento do consumo de medicamentos, especialmente analgésicos e antipiréticos como o paracetamol, surgem preocupações relacionadas à poluição da água decorrente do descarte inadequado de medicamentos não utilizados. Nesse contexto, propõe-se o desenvolvimento de compósitos sustentáveis baseados em quitosana, glicerol e resíduos agroindustriais, particularmente borra de café, para remover efetivamente produtos farmacêuticos de ambientes aquáticos. O estudo tem como objetivo contribuir com soluções técnicas para mitigar os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de medicamentos, utilizando abordagens sustentáveis. A caracterização físico-química e morfológica desses compósitos foi realizada utilizando técnicas avançadas como Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV. As cinéticas de adsorção foram analisadas utilizando métodos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, juntamente com análise de isotermas de adsorção de acordo com os modelos de Langmuir e Freundlich. O compósito resultante da combinação de quitosana, glicerol e borra de café (QGBC) demonstrou uma interação robusta com a matriz polimérica, alcançando uma notável eficiência de remoção de 76% de paracetamol em solução aquosa, especialmente sob condições de pH 6. As cinéticas de adsorção se alinharam com o modelo de pseudo-segunda ordem, e o mecanismo de adsorção associado a este compósito foi adequadamente explicado pela isotermia de Freundlich. A caracterização por FTIR e MEV confirmou a presença distintiva do compósito CGSC, destacando suas propriedades moleculares e morfológicas. Os resultados apoiam a eficácia do compósito como adsorvente ambiental para remoção de paracetamol, indicando sua integração homogênea de quitosana, glicerol e borra de café.

Palavras-Chave: Compósitos, Quitosana, Resíduo de borra de café, Adsorção, Remoção paracetamol.

ABSTRACTS

In the face of the increasing consumption of medications, especially analgesics and antipyretics like paracetamol, concerns arise regarding water pollution resulting from the improper disposal of unused pharmaceuticals. In this context, the development of sustainable composites based on chitosan, glycerol, and agroindustrial residues, particularly spent coffee grounds, is proposed to effectively remove pharmaceuticals from aquatic environments. The study aims to contribute technical solutions to mitigate environmental impacts stemming from improper medication disposal, utilizing sustainable approaches. **Methods:** The physical-chemical and morphological characterization of these composites was conducted using advanced techniques such as Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR and Scanning Electron Microscopy - SEM. Adsorption kinetics were analyzed using pseudo-first order and pseudo-second-order methods, along with adsorption isotherm analysis according to Langmuir and Freundlich models. The composite resulting from the combination of chitosan, glycerol, and spent coffee grounds (CGSC) demonstrated a robust interaction with the polymeric matrix, achieving a notable 76% removal efficiency of paracetamol in aqueous solution, particularly under pH 6 conditions. The adsorption kinetics aligned with the pseudo-second-order model, and the adsorption mechanism associated with this composite was adequately explained by the Freundlich isotherm. FTIR and SEM characterization confirmed the distinctive presence of the CGSC composite, highlighting its molecular and morphological properties. The results support the efficacy of the composite as an environmental adsorbent for paracetamol removal, indicating its homogeneous integration of chitosan, glycerol, and spent coffee grounds.

Key-word: Composites; chitosan; spent coffee ground; adsorption, paracetamol removal.

INTRODUÇÃO

O consumo de medicamentos tem aumentado devido a vários fatores, como o envelhecimento da população, aumento da prevalência de doenças crônicas e acesso aos serviços de saúde [1]. Os produtos farmacêuticos têm sido frequentemente identificados em ecossistemas aquáticos e estações de tratamento de águas residuais, em concentrações de ng/L a µg/L, na forma de substâncias inalteradas, metabólitos ou conjugados, após serem parcialmente metabolizados no corpo [2-3]. Portanto, a contaminação ambiental por compostos farmacêuticos emerge como uma preocupação ambiental e de saúde crescente, ganhando significativa importância [4]. Existem seis principais fontes de contaminação ambiental por produtos farmacêuticos, a saber, aterros sanitários, resíduos animais, resíduos de aquicultura e hospitais, resíduos industriais e domésticos [5]. A maioria desses compostos é persistente, não biodegradável e pode bioacumular na cadeia alimentar. Além disso, eles não são completamente removidos pelas estações de tratamento de esgoto. Por sua vez, os impactos na saúde humana e nos organismos aquáticos ainda não estão completamente elucidados, tornando essencial a implementação de medidas para controlar e eliminar os resíduos farmacêuticos [6-7].

Entre os processos de remoção de contaminantes, o processo de adsorção é considerado o melhor para remover uma ampla variedade de contaminantes da água, além de ser mais barato e mais fácil de operar. Vários materiais diferentes são usados para remover produtos farmacêuticos das águas residuais. Esses materiais incluem carvão ativado, argilas e biomateriais. A escolha do material apropriado depende de fatores como a natureza do produto farmacêutico e as condições do processo de adsorção [8]. A quitosana, um biopolímero encontrado nos exoesqueletos de crustáceos e nas paredes celulares de fungos, destaca-se como um bioadsorvente sustentável promissor para aplicações ambientais devido às suas propriedades biodegradáveis, não tóxicas e biocompatíveis, bem como sua versatilidade e capacidade de interagir efetivamente com várias substâncias poluentes [9-10].

Por outro lado, a borra de café é um resíduo agroindustrial produzido em abundância (a estimativa de produção anual é de cerca de 6 milhões de toneladas por ano no mundo) e possui uma composição rica em compostos

DANTAS, S.S.S. Compósitos sustentáveis a base de quitosana e resíduos agroindustriais...

orgânicos, como celulose, hemicelulose e lignina. Sua inclusão em compósitos para remoção de medicamentos otimiza a eficácia do processo devido ao seu alto teor de carbono, porosidade significativa, área superficial expandida e composição química complexa (incluindo ácidos clorogênicos, cafeína e óleo essencial), conferindo-lhes uma notável versatilidade como adsorvente [11-12]. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver compósitos sustentáveis baseados em quitosana e resíduos agroindustriais e avaliar sua eficiência na remoção de três produtos farmacêuticos em solução aquosa, a saber, dipirona, paracetamol e diclofenaco sódico, que são os analgésicos/antipiréticos e anti-inflamatórios não esteroidais mais usados e detectados no meio ambiente [13].

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais

Na síntese dos compósitos, foram utilizadas as seguintes substâncias: Quitosana de médio peso molecular (Sigma), Glicerol P.A. (Vetec), Ácido Acético Glacial P.A. (Modern Chemistry), Glutaraldeído a 25% grau II (Sigma). Dipirona, Paracetamol e Diclofenaco Sódico foram adquiridos da Sigma. Resíduos agroindustriais (borra de café, pó de casca de coco, pó de serragem) foram obtidos no mercado local (Recife-PE, Brasil).

Preparação dos resíduos

A borra de café foi preparada seguindo [14], com algumas modificações. 400 mg foram lavados em 3000 ml de água destilada usando um funil e filtro. Após a lavagem, a borra de café foi colocada em um forno a 100 °C por 48 horas. Posteriormente, a borra de café foi peneirada através de uma peneira de 100 malhas. Por sua vez, o pó de coco passou por uma operação de peneira manual usando uma peneira de 48 malhas para eliminar resíduos de casca, partículas de grande tamanho e fibras inadequadas para o processamento do compósito. Após a peneiração, o pó de coco foi triturado para converter as fibras em forma

de pó. Devido à natureza higroscópica do pó de coco, foi necessário um processo de secagem antes da incorporação no polímero. A secagem ocorreu em um forno a 100 °C, com duração de 24 horas. Posteriormente, o pó de coco passou por uma segunda etapa de peneiração usando uma tela de 100 malhas [15]. Finalmente, a serragem foi seca em um forno a 100°C por 24 horas para garantir baixo teor de umidade suficiente para evitar a formação de aglomerados. Posteriormente, a serragem foi peneirada através de uma tela de 100 malhas [16]. Todos os resíduos foram peneirados para o mesmo tamanho de partícula, 0,15 mm.

Síntese dos compósitos

A síntese dos compósitos à base de quitosana foi realizada utilizando o método de casting de solvente, seguindo a metodologia descrita por [17] com adaptações. 750 mg de quitosana foram solubilizados em 50 mL de uma solução de ácido acético a 1,5% v/v em um agitador magnético a 25°C. Posteriormente, a solução foi misturada com 150 µL de glicerol e então 5% dos resíduos agroindustriais (peso em relação à massa seca dos polímeros) e mantidos sob agitação por 2 horas. Em seguida a agitação magnética, o compósito foi sonificado por 30 minutos, e então 52 µL de glutaraldeído a 25% foram adicionados gota a gota. A solução formadora de filme foi transferida para moldes de 1 cm², que foram colocados no forno a 40 °C por 24 horas. Após o casting do solvente, os compósitos foram purificados em água destilada, secos em um forno a 40 °C por 2 horas e armazenados em um dessecador. Quatro tipos de compósitos foram preparados de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos quatro tipos de compósitos sintetizados com quitosana, resíduos agroindustriais e glicerol

Compósitos	Componentes
QGBC	Quitosana, Glicerol, Borra de Café
QGPS	Quitosana, Glicerol, Pó de Serra
QGPC	Quitosana, Glicerol, Pó da Casca de Coco
QG*	Quitosana, Glicerol

Fonte: Autores (2023) *O compósito CG, designado como grupo de controle, foi formulado sem

a incorporação de resíduos agroindustriais durante a síntese.

Na primeira parte do experimento de adsorção, foram preparadas soluções de 5 mL dos medicamentos (dipirona, paracetamol e diclofenaco sódico) em frascos Erlenmeyer de 125 mL a uma concentração de 0,5 mg/L e pH 3, 6 e 9. Na segunda parte do experimento (cinética de adsorção), foi realizado com o compósito que teve o melhor desempenho de remoção, no pH mais adequado e com o fármaco com a maior porcentagem de remoção. Foram preparadas soluções de 5 mL do medicamento (paracetamol) que teve a maior taxa de remoção no compósito mais eficiente (QGBC) a pH 6 em frascos Erlenmeyer de 125 mL nas concentrações de 0,25 mg/L, 0,50 mg/L, 1,00 mg/L e 2,00 mg/L.

Caracterização

A caracterização foi conduzida usando o compósito que apresentou a maior eficiência de remoção. A caracterização do compósito sem resíduos agroindustriais foi realizada para fins de comparação. Além disso, a análise por FTIR do compósito mais eficiente foi realizada após o experimento de remoção para entender melhor suas propriedades após a interação com o fármaco.

Os compósitos foram liofilizados e caracterizados por espectroscopia de infravermelho em um espectrômetro RTA (Reflectância Total Atenuada) dentro da região do espectro eletromagnético (400 a 12000 cm^{-1}). Os fármacos foram detectados em uma velocidade de varredura lenta na faixa de comprimento de onda de λ 200 nm a 400 nm usando um espectrofotômetro UV-Visível. Para verificar se o solvente (água destilada) influenciava nos resultados, foi realizada uma varredura apenas do solvente na mesma faixa de comprimento de onda (λ 200 nm a 240 nm), visando leituras em um comprimento de onda de 271 nm, correspondente à dipirona, 278 nm para diclofenaco sódico e 243 nm para paracetamol.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi empregada para avaliar as características morfológicas dos compósitos desenvolvidos. As amostras foram fixadas em suportes usando fita adesiva de carbono dupla face, metalizadas com

uma camada de ouro (10 nm) e observadas por microscopia eletrônica de varredura (JEOL JSM 5600 LV).

Estudos de adsorção

Os experimentos de remoção foram divididos em duas partes. Na primeira parte, foi verificada a capacidade de adsorção dos compósitos produzidos a temperatura de 28 °C e nos pH (3, 6 e 9). Para isso, foram preparadas soluções de 5ml dos fármacos (dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio) em Erlenmeyer de 125 mL na concentração de 0,5 mg/L e pH 3, 6 e 9. Em seguida, foi adicionado 5 mg dos compósitos QGBC, QGPS, QGPC e QG aos Erlenmeyer, os quais foram colocados em agitação de 100 rpm por 3 horas a 28 °C. A concentração residual de cada fármaco em solução foi estimada em espectrofotômetro UV/Visível usando os dados de absorbância de UV (Dipirona λ máximo \approx 271 nm; Paracetamol λ máximo \approx 243 nm; Diclofenaco de sódio λ máximo \approx 278 nm) e curvas de calibração previamente construídas. Todos os experimentos foram realizados em triplicata. A porcentagem de remoção farmacêutica foi utilizada a equação (1):

$$(\%) = \frac{(c_0 - c_{eq})}{c_0} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

C_0 : concentração inicial do fármaco na solução (mg/L);

C_{eq} : concentração residual do fármaco na solução (mg/L)

Após a triagem, foi realizado um estudo da cinética da adsorção variando a concentração inicial do fármaco, utilizando o compósito que apresentou o maior percentual de adsorção, bem como o fármaco que teve melhor adsorção neste compósito e no pH mais eficiente. As concentrações utilizadas foram 0,25 mg/L; 0,50 mg/L; 1,00 mg/L e 2,00 mg/L. Assim como na primeira parte, foram preparadas soluções de 5 mL com os fármacos nas concentrações mencionadas, ajustado o pH e analisadas no espectrofotômetro. Nas soluções foram adicionados os compósitos (5mg), em seguida, incubados a 100 rpm e 28

°C. A cada 20 minutos, foram coletadas alíquotas das soluções para serem analisadas no espectrofotômetro. Foram realizadas 6 coletas, totalizando 120 minutos. A quantidade de fármaco adsorvido mg/g de compósito (q_t) no tempo foi calculado usando a equação (2):

$$q_t = \frac{(c_0 - c_{eq})}{m} v \quad (2)$$

Onde:

- C_0 : concentração inicial do fármaco na solução (mg/L);
- C_{eq} : concentração residual do fármaco na solução (mg/L);
- V : Volume da solução (L);
- m : massa do adsorvente (g).

Estudo Estatístico de Adsorção

A cinética de adsorção foi analisada mediante o ajuste dos dados experimentais aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. As equações lineares correspondentes aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem foram apresentadas nas equações (3) e (4), respectivamente:

$$\ln q_t = \ln q_e \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

onde:

- q_t : é a quantidade adsorvida no tempo t (mg/g);
- q_e : é a quantidade máxima de adsorção no equilíbrio (mg/g);
- K : é a constante de taxa da pseudo-primeira ordem (min^{-1});
- t : tempo (minutos).

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{Kq_e} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

Onde:

- q_t : é a quantidade adsorvida no tempo t (mg/g);
- q_e : é a quantidade máxima de adsorção no equilíbrio (mg/g);
- K : é a constante de taxa da pseudo-primeira ordem (min^{-1});

- t: tempo (minutos).

Isotermas de adsorção

O mecanismo de adsorção dos fármacos pelo compósito selecionado foi investigado do ponto de vista microscópico por meio do uso de isotermas. Para ajustar os dados experimentais em equilíbrio, optou-se por utilizar os modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich. Ambas as equações são expressas de forma não linear em relação aos parâmetros que necessitam de ajuste aos dados experimentais. As equações (5) e (6) utilizadas foram as seguintes, respectivamente:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{mx} \cdot K} * \frac{1}{C_e} \quad (5)$$

Onde:

- q: Quantidade de adsorvato adsorvido por unidade de massa do adsorvente no equilíbrio (mg/g);
- q_{max}: Capacidade máxima de adsorção, representando a quantidade máxima de adsorvato que pode ser adsorvida por uma quantidade fixa de adsorvente quando todos os sítios de adsorção estão ocupados;
- K: Constante de equilíbrio de Langmuir, relacionada à afinidade entre o adsorvente e o adsorvato.
- C_e: Concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida (mg/L).

$$\log \log (q) = \log \log (K) + \frac{1}{n} * \log (C_e) \quad (6)$$

Onde:

- q é a quantidade de adsorvato adsorvido (mg/g);
- K é uma constante de Freundlich relacionada à capacidade de adsorção;
- n é o expoente de Freundlich que indica a intensidade da adsorção;
- C_e é a concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida (mg/L).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização dos Compósitos Sustentáveis

Os picos de transmitância observados no espectro de absorção infravermelho do compósito com borra de café (QGBC) foram cruciais para avaliar a presença das vibrações moleculares características da quitosana e do glicerol nos materiais obtidos. Os picos de transmitância do espectro de absorção infravermelho do compósito de quitosana+glicerol (QG), usado para comparação, estão ilustrados na Figura 1(b).

De acordo com o espectro do compósito QG, observa-se a presença de bandas características da quitosana e do glicerol ($3311,97\text{ cm}^{-1}$). Para confirmar a interação entre a quitosana, o glicerol e o pó de café usado na síntese do compósito sustentável, foram realizadas análises por Espectroscopia por Transformada de Fourier (FTIR), como mostra a Figura 1(a). No compósito sustentável (QGBC), espectros similares foram identificados, e é possível observar que as bandas características da quitosana e do glicerol relacionadas aos estiramentos dos grupos hidroxila (-OH) e aos estiramentos do grupo amina (-NH) aparecem no QGBC em $3311,97\text{ cm}^{-1}$ e $2911,26\text{ cm}^{-1}$, respectivamente. Na Figura 1(a), observa-se um deslocamento de $1566,94\text{ cm}^{-1}$ para $1408,95\text{ cm}^{-1}$ devido à interação entre o pó de café usado e os grupos amida e amina da quitosana, além de vibrações do esqueleto aromático presente nos componentes da lignina, corroborando com os resultados encontrados em [1-3].

O compósito de quitosana, glicerol e pó de café (QGBC), que se mostrou eficaz na remoção do paracetamol de soluções aquosas, também foi caracterizado após sua utilização, conforme ilustrado na Figura 1(c). As bandas em $1387,41\text{ cm}^{-1}$ estão relacionadas à deformação dos grupos alquilas CH₂ e CH₃, enquanto a banda em $1031,22\text{ cm}^{-1}$ corresponde à ligação C-O-C da lignina e da cafeína, sugerindo que as interações de ligações de hidrogênio entre os polímeros e o pó de café usado aumentaram devido à presença do resíduo, obtendo resultados superiores ao estudo conduzido em [17]. A partir desses dados, pode-se sugerir que tanto a quitosana quanto o glicerol foram reticulados quimicamente com o pó de café usado, resultando em uma nova rede de polímeros interpenetrantes (PIN), consistente com os resultados obtidos em [21].

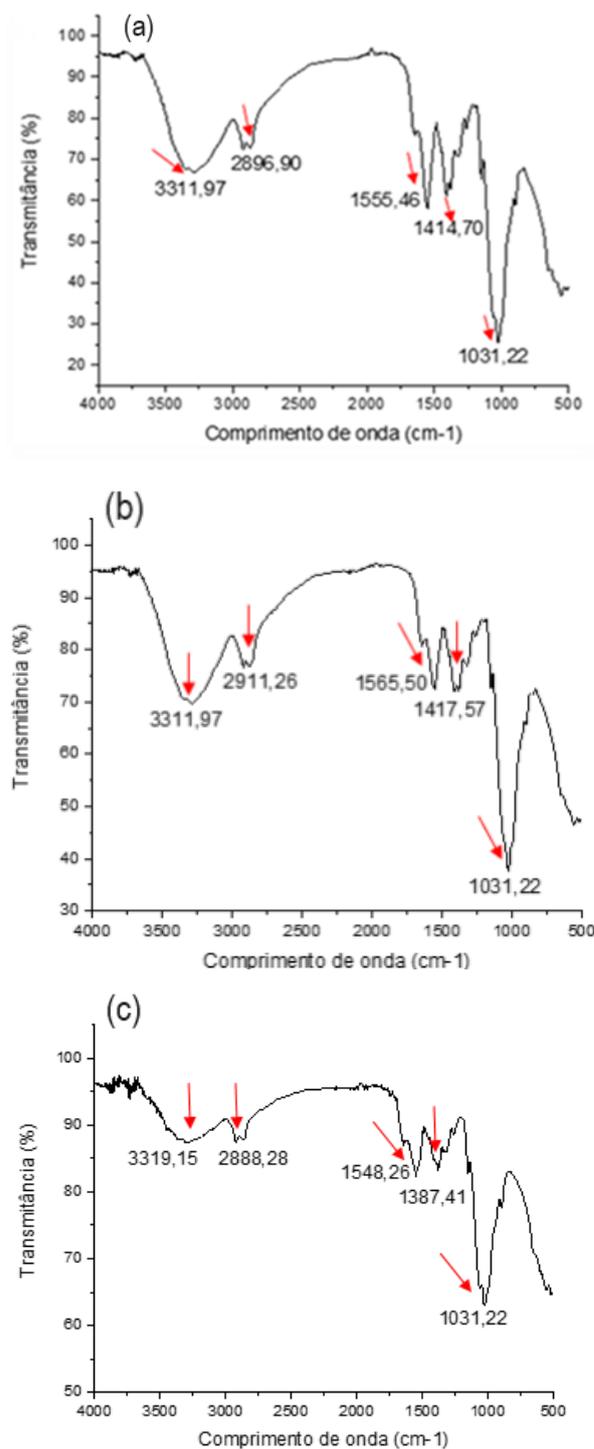


Figura 1. Espectro de absorção no infravermelho dos compósitos sustentáveis baseados em quitosana e resíduos agroindustriais. (a) Compósito QGBC; (b) Compósito QG; (c) Compósito QGBC após adsorção.

Microscopia Eletrônica de Varredura dos compósitos QG e QGBC

A estrutura de superfície dos compósitos desenvolvidos é apresentada na Figura 2 (A - B). Nos compósitos QG (controle), Figura 2A, uma superfície lisa e

homogênea pode ser observada. Nos compósitos contendo resíduos, conforme mostrado na Figura 2B, uma topografia rugosa é observada devido à presença das borras de café. De acordo com [17], a quitosana exibe cristalinidade devido à ligação de hidrogênio entre seus grupos funcionais, o que depende do seu grau de desacetilação. Em contraste, a hemicelulose e outros constituintes do compósito QGBC possuem uma estrutura amorfa. Estudos conduzidos por [21] mostraram resultados semelhantes para compósitos de quitosana/álcool polivinílico (PVA) ligados quimicamente com glutaraldeído, corroborando nossos próprios resultados.

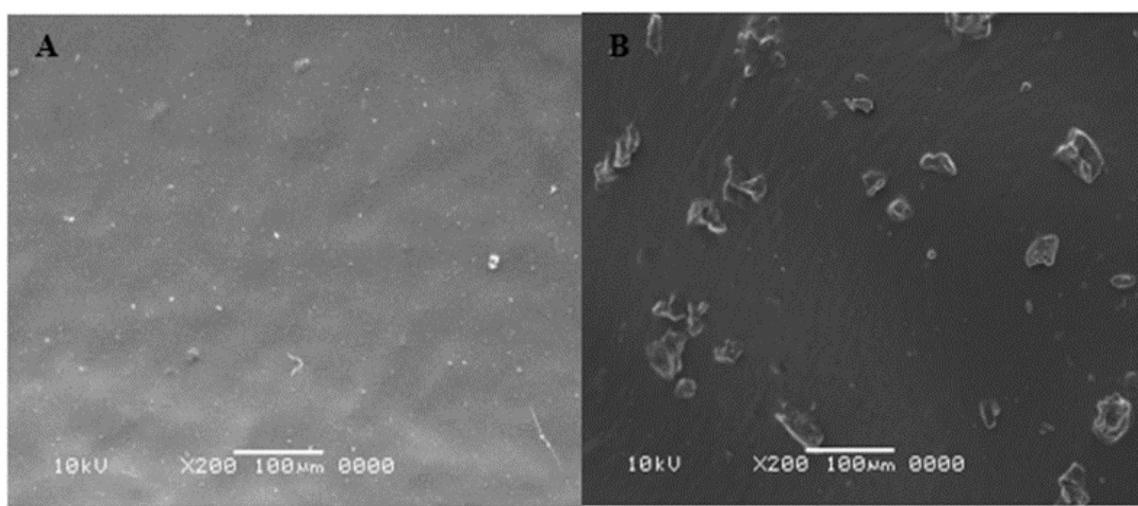


Figura 2. Micrografia das superfícies dos compósitos à base de quitosana, utilizando uma ampliação de 200x: (A) Compósitos QG (Quitosana, Glicerol) e (B) Compósitos QGBC (Quitosana, Glicerol, Borra de Café).

Experimentos de adsorção

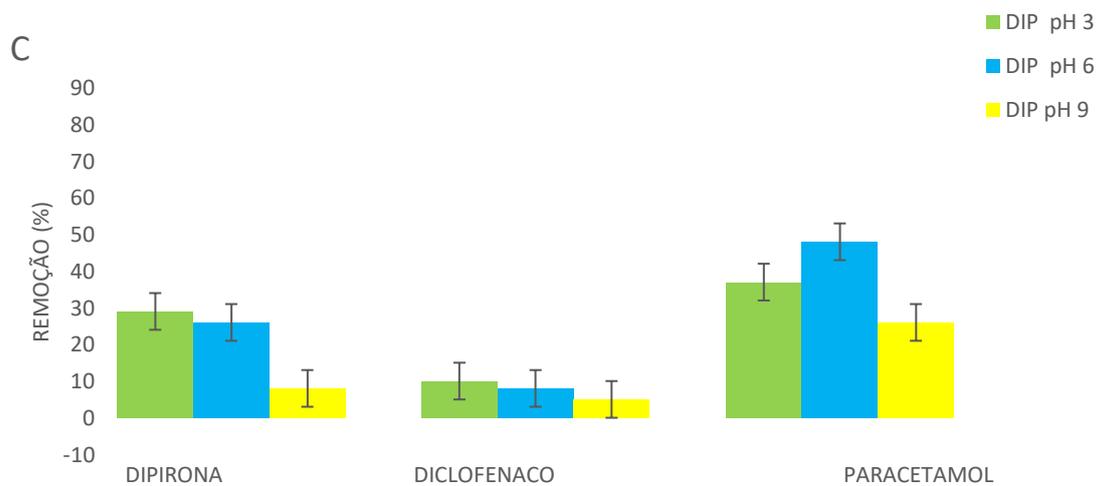
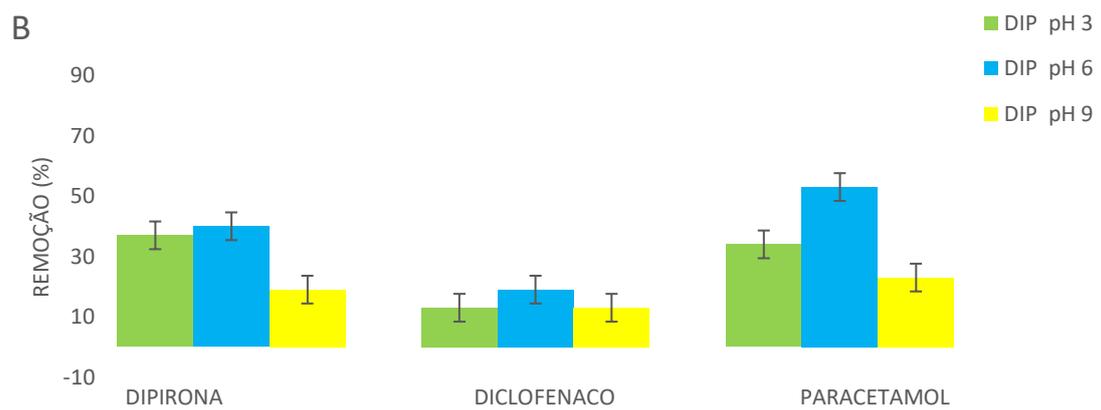
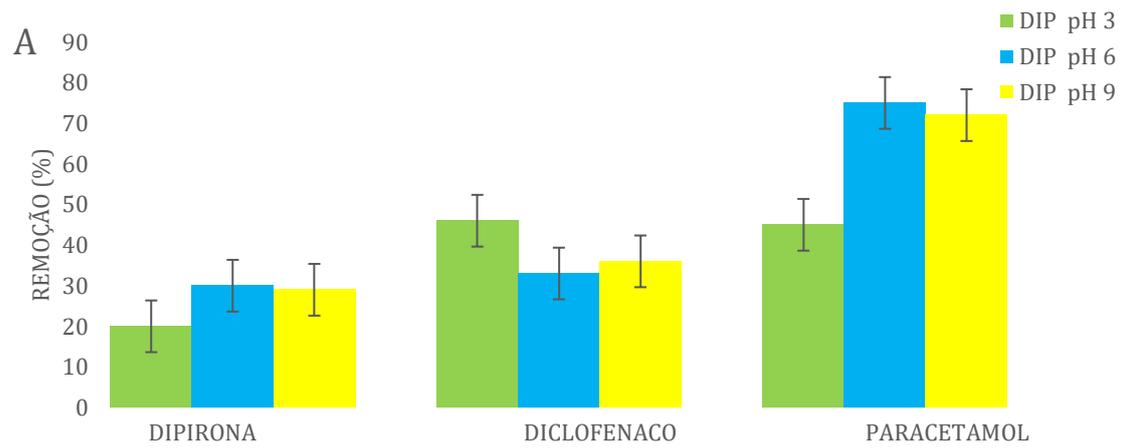
No experimento de adsorção de fármacos, foi avaliada a influência da formulação do compósito e do pH na adsorção dos fármacos (dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio) (Figura 3 A-D). A eficácia significativa do compósito de quitosana e borra de café (QGBC), que removeu 76% do paracetamol, pode ser explicada por uma combinação de fatores (Figura 3A). Em primeiro lugar, a borra de café contém compostos fenólicos que servem como sítios de adsorção para os fármacos. De acordo com [22], os grupos funcionais (-OH, -NH, -COOH) presentes na borra de café podem se ligar aos fármacos por meio de interações hidrofóbicas. Na pesquisa de [17], resultados

semelhantes foram obtidos com esse trabalho em relação a área superficial da borra de café, descrevendo que a alta área superficial da borra de café é um fator crucial que contribui para uma remoção mais eficiente. O pó de café é poroso, apresentando uma área superficial significativa, o que aumenta sua capacidade de adsorção. As condições experimentais também desempenharam um papel crucial. O experimento foi realizado à temperatura de 28 °C e pH 6, visando otimizar a adsorção de fármacos pela quitosana, seguindo os mesmos parâmetros do estudo [17], que apresentaram resultados semelhantes. Esses fatores combinados foram detectados no presente estudo, resultando no desempenho mais eficaz do compósito QGBC, enfatizando a importância da interação entre os compostos fenólicos na borra de café e a alta área superficial do pó, bem como as condições controladas do experimento.

Também ficou evidente que a eficiência de remoção variou de acordo com o tipo de fármaco. A eficiência de remoção seguiu a ordem paracetamol > diclofenaco > dipirona em relação ao compósito QGBC, conforme mostrado nas informações da Figura 3 A-D. O paracetamol foi mais adsorvido, provavelmente devido à carga da molécula. O paracetamol é um composto orgânico contendo um grupo hidroxila (-OH) ligado a um anel aromático [10]. O paracetamol também é um composto neutro, o que significa que não tem carga elétrica. Essa neutralidade torna o paracetamol menos propenso a ser repelido pelos compósitos, facilitando sua adsorção. Isso pode facilitar a adsorção do paracetamol à quitosana, que é um polímero eletricamente neutro [23].

O pH da solução tem um efeito significativo na remoção de fármacos pela quitosana. Estudos examinando o pH na remoção de fármacos mostram que o mesmo efeito é observado, relatando interações químicas entre o pH e os grupos funcionais. Em pH neutro (pH 6), tanto os grupos carboxílicos dos fármacos quanto os grupos amino da quitosana podem estar em sua forma ionizada, o que significa que os grupos carboxílicos podem perder um próton (tornando-se negativamente carregados), e os grupos amino podem ganhar um próton (tornando-se positivamente carregados). Isso resultaria em uma configuração de carga que favorece a adsorção de fármacos à quitosana [24 -25].

Em resumo, a remoção de fármacos pela quitosana é afetada pelo pH da solução. No experimento, pH 6 foi o melhor para a remoção de fármacos porque é o pH no qual fármacos e compósitos têm cargas opostas.



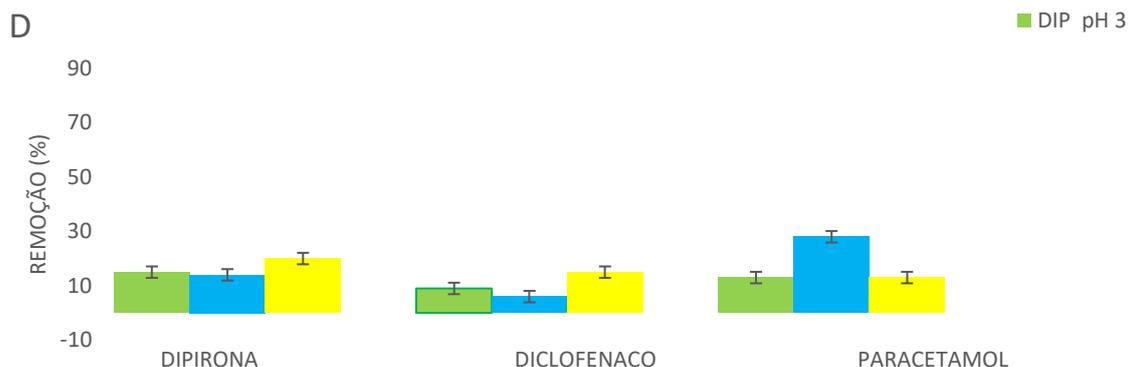


Figura 3. Remoção de fármacos usando diferentes compósitos sustentáveis. (A) Compósito QGBC, (B) Compósito QGPS, (C) Compósito QGPC e (D) Compósito QG.

Cinética de Adsorção

Para o estudo da cinética de adsorção, o compósito QGBC e o paracetamol a um pH de 6, que demonstraram melhores resultados, foram selecionados. O compósito de borra de café (QGBC) removeu 76% do paracetamol a pH 6. Os resultados representados na Figura 4 indicam que, para as soluções de paracetamol testadas, o aumento na concentração inicial de 0,25, 0,50, 1,00 e 2,00 mg/L leva a um aumento substancial nos valores de q_t nos primeiros 20 minutos. Além disso, observa-se que a taxa de adsorção experimenta uma redução entre 30 e 40 minutos para concentrações de 1,00 e 2,00 mg/L, atingindo o equilíbrio em 60 minutos. Em relação às outras concentrações, 0,25 e 0,50 mg/L, a taxa de adsorção diminui entre 40 e 80 minutos, atingindo o equilíbrio dentro do intervalo de 80 minutos. Esses resultados, caracterizados por um aumento significativo nos valores de "q" nos primeiros minutos, se assemelham às descobertas descritas nos estudos por [14-17].

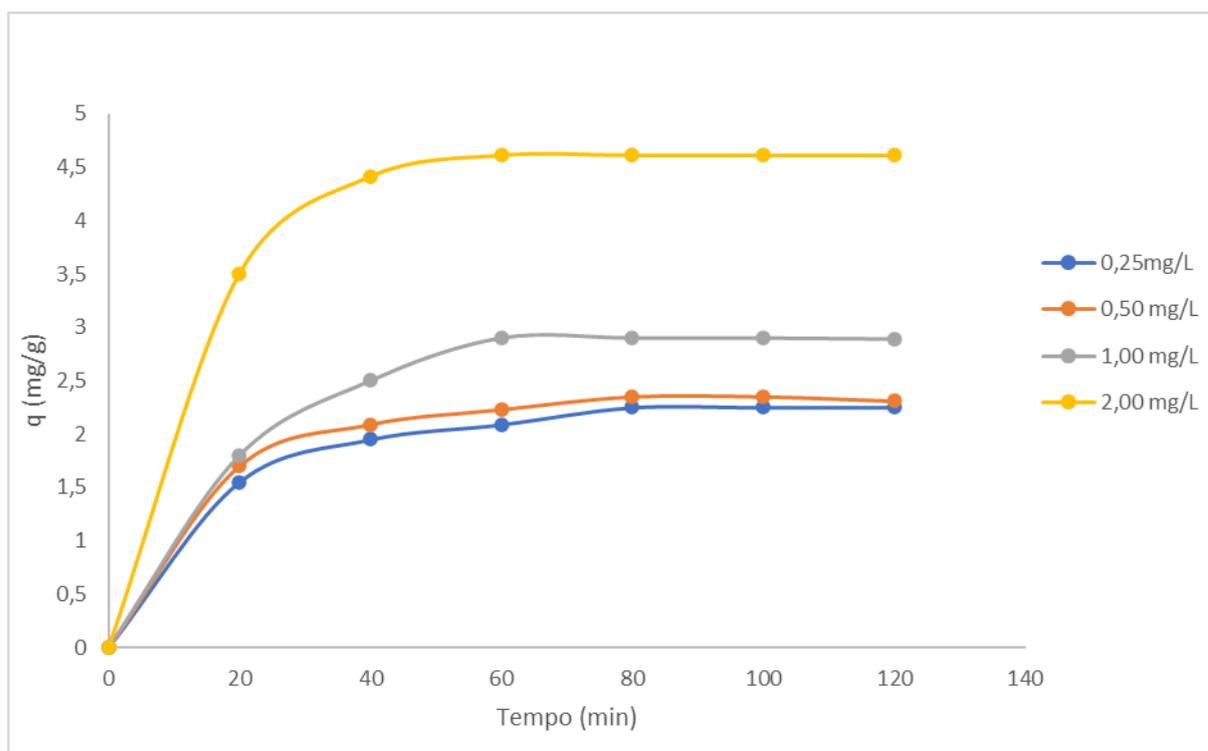


Figura 4. Cinética de adsorção do paracetamol pelo composto QGBC.

A análise dos dados experimentais de adsorção de paracetamol foi realizada utilizando modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, conforme ilustrado na Figura 5. O coeficiente de determinação (R^2) foi empregado como critério para selecionar o modelo cinético mais apropriado para descrever o processo de adsorção de paracetamol. Os valores de R^2 (0,25mg/L = 0,9816; 0,50mg/L = 0,9808; 1,00mg/L = 0,9824; 2,00mg/L = 0,9766) obtidos ao ajustar o modelo cinético de pseudo-segunda ordem às concentrações de paracetamol foram significativamente mais próximos de 1 em comparação com aqueles obtidos pelo modelo cinético de pseudo-primeira ordem. Essa evidência sugere que o modelo de pseudo-segunda ordem fornece uma melhor representação da cinética de adsorção de paracetamol no sistema estudado [26]. Além disso, constatou-se que a capacidade de adsorção de equilíbrio experimental (q_e) a partir do modelo cinético de pseudo-segunda ordem coincidiu com a capacidade de adsorção de equilíbrio calculada (q_t) (Tabela 2). Esses resultados indicam que a descrição da cinética de adsorção de paracetamol é mais adequada ao adotar o modelo cinético de pseudo-segunda ordem. De acordo com [27], sugere-se que a adsorção dessas substâncias está relacionada à hipótese de que a capacidade de adsorção do

adsorvente QGBC está relacionada ao número de sítios ativos na superfície. Além disso, o passo limitante da taxa neste processo é caracterizado pela adsorção química, mediada pela interação eletrostática entre os grupos carboxílicos do paracetamol e os grupos amino da quitosana presentes no adsorvente.

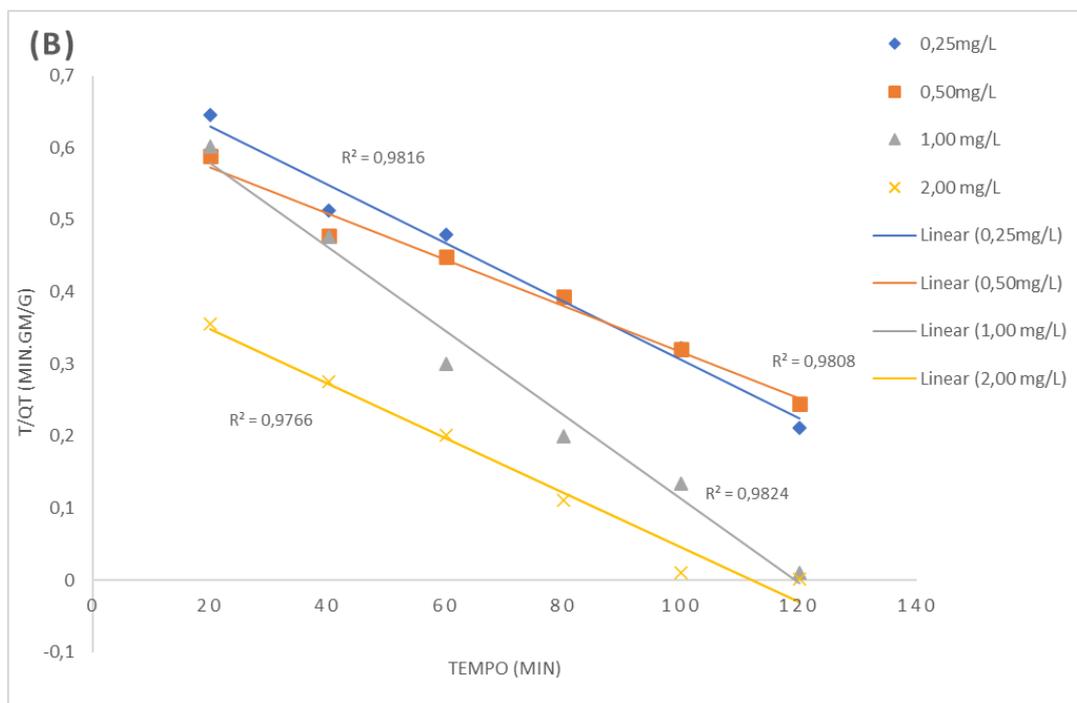


Figura 5. Cinética de adsorção do paracetamol - modelo cinético de pseudo-segunda ordem

Tabela 2. Parâmetros cinéticos para adsorção de paracetamol usando QGBC, modelo de pseudo-segunda ordem.

Fármaco/Concentrações (mg/L)	Pseudo-segunda ordem			
	q_e	K	q_t	R^2
Paracetamol 0,25	1,55	0,025	1,55	0,9816
Paracetamol 0,50	1,29	0,026	1,29	0,9808
Paracetamol 1,00	2,10	0,060	2,11	0,9824
Paracetamol 2,00	3,50	0,070	3,51	0,9766

Isotermas de Adsorção

As suposições inerentes ao modelo de adsorção de Langmuir pressupõem a presença, inicialmente, de uma quantidade fixa de sítios de adsorção na superfície. Além disso, é estabelecido que a adsorção é limitada à

formação de uma única camada molecular, e a variação na energia livre de adsorção é constante, sendo independente da cobertura superficial [24-28].

O modelo de isotermas de adsorção proposto por Freundlich difere do modelo de Langmuir ao considerar a ocorrência de adsorção de múltiplas camadas do adsorbato. Neste cenário, é assumida a presença de um adsorvente heterogêneo com uma variedade de sítios ativos com energias de adsorção distintas [28-29].

Com base nos resultados apresentados na Figura 6, os parâmetros de adsorção para paracetamol e o compósito QGBC mostraram um ajuste ao modelo de isotermas de Freundlich. Os coeficientes de correlação correspondentes (R^2) foram 0,9974, 0,9989, 0,9992 e 0,9999 para as concentrações estudadas de paracetamol (0,25; 0,50; 1,00; e 2,00 mg/L). Conforme discutido por [29], a adsorção desses fármacos pode ser atribuída ao processo de adsorção de múltiplas camadas em uma superfície heterogênea. Os valores das constantes de isotermas de Freundlich, obtidos sob condições apropriadas, estão apresentados na Tabela 3

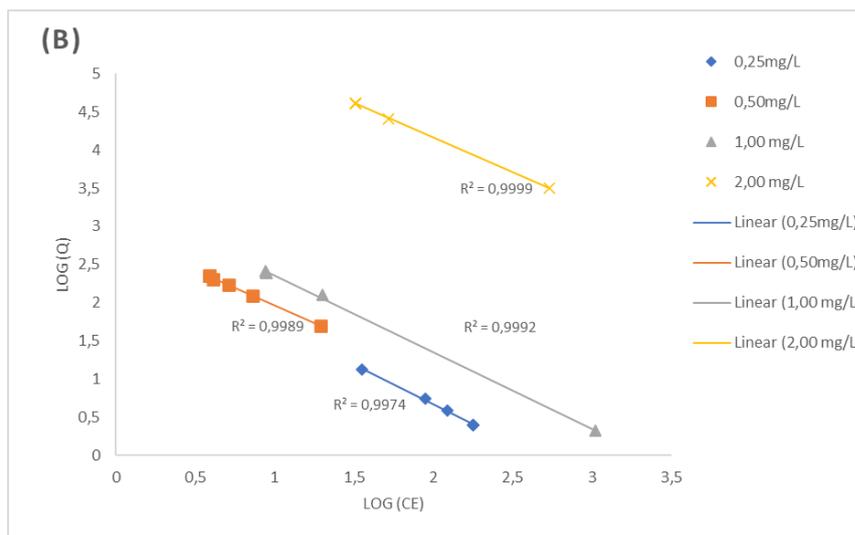


Figura 6. A linearização de Freundlich do compósito QGBC mostra os resultados da adsorção de paracetamol usando cada modelo de isotermas.

Tabela 3. Parâmetros da Isoterma de Freundlich para a adsorção de fármacos no QGBC a 28°C.

Freundlich

Fármaco/Concentração (mg/L)	K	1/n	n	R ²
Paracetamol 0,25	0,50	0,50	2,00	0,9974
Paracetamol 0,50	0,36	0,83	1,20	0,9989
Paracetamol 1,00	0,39	0,82	1,22	0,9992
Paracetamol 2,00	0,25	0,66	1,51	0,9999

Comparação de Estudos de Adsorção

A comparação do desempenho de adsorção e dos métodos de preparação foi consolidada na Tabela 4, incluindo outros três adsorventes mencionados na literatura. Cerca de 75% dos estudos relataram capacidades de adsorção para um fármaco específico em soluções aquosas com um pH em torno de 6 e temperaturas variando entre 25 e 28°C. Embora o adsorvente proposto neste estudo tenha mostrado capacidades de adsorção mais baixas, com apenas 25% apresentando valores de adsorção inferiores em comparação com estudos anteriores, ele se destaca pela simplicidade do método de preparação, baixo custo e potencial utilização de resíduos. O tempo de adsorção foi satisfatório em relação aos outros estudos, com o presente estudo apresentando o menor tempo, enquanto 75% dos estudos relataram tempos mais longos. Essas características indicam uma abordagem promissora para aplicações práticas, considerando não apenas o desempenho, mas também a viabilidade econômica e ambiental do processo de adsorção.

Tabela 4. Adsorção de Fármacos em Gráficos Comparativos de Diferentes Adsorventes.

	Adsorventes	q _e (mg/g)	C ₀ (mg/L)	pH	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Referências
Paracetamol	QGBC	4.61	2	6	0,50	28	Este trabalho
Paracetamol	Quitosana/Borra de café/5	7.52	2	6	0.67	25	[17]
Paracetamol	Palygorskite	1.48	0.1	6	24	25	[30]
Paracetamol	Quitosana granular ativada/ β -ciclodextrina	200.79	20	7.2	2.2	41.6	[31]

CONCLUSÃO

Os compósitos sustentáveis incorporando borras de café (QGBC) mostraram um aumento notável na eficiência de adsorção do fármaco paracetamol, alcançando uma melhoria significativa em comparação com a amostra original sem o resíduo de QG (Quitosana, Glicerol). Essa observação sugere que a presença de borras de café na matriz de quitosana amplia o número de sítios de adsorção na superfície do adsorvente, promovendo assim o processo de adsorção.

No geral, a remoção máxima foi registrada em um pH de 6, e a eficiência de remoção seguiu a ordem: paracetamol > dipirona > diclofenaco. significativamente, para o paracetamol, que apresentou a maior remoção, a cinética de adsorção foi consistente com o modelo de pseudo-segunda ordem. O mecanismo de adsorção associado a este compósito foi adequadamente explicado pela isoterma de Freundlich.

Esses resultados destacam não apenas a eficácia aprimorada do compósito QGBC na remoção de fármacos, mas também a influência positiva das borras de café na otimização dos sítios de adsorção. Essa abordagem, conduzida em um pH específico, sinaliza uma estratégia promissora para a aplicação prática deste adsorvente compósito em sistemas de tratamento de água contaminados com fármacos.

REFERÊNCIAS

1. Hoefler R, Tiguman GMB, Galvão TF, Ribeiro-Vaz I, Silva MT. Trends in sales of antidepressants in Brazil from 2014 to 2020: A time trend analysis with joinpoint regression. *J. Affect. Disord.* 2023 Feb;323:213–8.
2. Chaturvedi M, Mishra A, Sharma K, Sharma G, Saxena G, Amit Kumar Singh. *Emerging Contaminants in Wastewater: Sources of Contamination, Toxicity, and Removal Approaches.* Singapura: Springer eBooks; 2021. 103 p.
3. Abdallat GA, Salameh E, Shteiwi M, Bardaweel S. Pharmaceuticals as Emerging Pollutants in the Reclaimed Wastewater Used in Irrigation and Their Effects on Plants, Soils, and Groundwater. *Water.* 2022 May 12;14(10):1560.
4. Rodrigues AMB, Aoyama E de A. Cross-sectional study on conscious medication disposal and reverse logistics in the Administrative Region of Gama-Federal District. *Peer Rev.* 2023 May 26;5(10):1–28.
5. Kumar M, Sridharan S, Sawarkar AD, Shakeel A, Anerao P, Mannina G, et al. Current research trends on emerging contaminants pharmaceutical and personal care products (PPCPs): A comprehensive review. *Sci. Total Environ.* 2023 Feb;859:160031.

6. Farto CD, Júnior GBA, Sena RF de, Rosenhaim R. Emerging Contaminants in Brazil in the Decade 2010-2019 – Part I: Occurrence in Various Aquatic Environments. *Lat. Am. Water Manag. J.* 2021 Jun 14;18(2021). Available from: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/521/>
7. Puri M, Gandhi K, Kumar MS. Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *J. Environ. Manag.* 2023 Apr;332:117344.
8. Sellaoui L, Lima E, Dotto G, Ben Lamine A. Adsorption of amoxicillin and paracetamol on modified activated carbons: Equilibrium and positional entropy studies. *J. Mol. Liq.* 2017 May 1;234:375–81.
9. Ambaye TG, Vaccari M, Prasad S, van Hullebusch ED, Rtimi S. Preparation and applications of chitosan and cellulose composite materials. *J. Environ. Manag.* 2022 Jan;301:113850.
10. Ahmed MJ, Hameed BH, Hummadi EH. Review on recent progress in chitosan/chitin-carbonaceous material composites for the adsorption of water pollutants. *Carbohydr. Polym.* 2020 Nov;247:116690.
11. Quitino M. Use of coffee residues for adsorptive removal of dyes in aqueous solution [dissertation]. Maceió: Federal University of Alagoas, Technological and Industrial Chemistry: 2021. 59 p.
12. Forcina A, Petrillo A, Travaglioni M, di Chiara S, De Felice F. A comparative life cycle assessment of different spent coffee ground reuse strategies and a sensitivity analysis for verifying the environmental convenience based on the location of sites. *J. Clean. Prod.* 2023 Jan;385:135727.
13. Egídio AC de M, Andrade LG de, Lobo LC, Silva MS da. Pharmacist's Role in the Intoxication Process by Non-Opioid Analgesics and Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs). *Ibero-Am. J. Humanit. Sci. Educ.* 2021 Sep 30;7(9):884–984.
14. Choi HJ. Applicability of Composite Beads, Spent Coffee Grounds/Chitosan, for the Adsorptive Removal of Pb(II) from Aqueous Solutions. *Ind. Chem.* 2019 Jan 1;30(5):536–45.
15. Coutinho IB, Inês Santana IA, Iguti AM. Effect of Green Coconut Fiber Granulometry on the Adsorption of Compounds from Petroleum. *Atena.* 2020 Jun 30;191–202.
16. Montanher SF, Farias LBN de, Dalpasquale M. Adsorption of textile dyes on sawdust. *MDF (Medium-Density Fiberboard) / Adsorption of MDF (Medium-Density Fiberboard) sawdust. Braz. J. Dev.* 2019 Sep;5(9):14776–89.
17. Lessa EF, Nunes ML, Fajardo AR. Chitosan/waste coffee-grounds composite: An efficient and eco-friendly adsorbent for removal of pharmaceutical contaminants from water. *Carbohydr. Polym.* 2018 Jun;189:257–66.
18. Lopes JC, Chagas Junior AF, Scheidt GN, Soares LP, Chagas LFB. Biomass and chitin and chitosan extraction from *Cunninghamella* sp. isolates. *Semina Biol. Health Sci.* 2017 Dec 18;38(1):2.
19. Yang H, Shen XD. Dynamic TGA–FTIR studies on the thermal stability of lithium/graphite with electrolyte in lithium-ion cell. *J. Power Sources.* 2007 May;167(2):515–9.
20. Ruphuy G, Lopes CB, Dias MM, María Filomena Barreiro. New insights into nanohydroxyapatite/chitosan nanocomposites for bone tissue regeneration. *Amsterdã: Elsevier eBooks; 2019. 331 p.*
21. de Souza JF, da Silva GT, Fajardo AR. Chitosan-based film supported copper nanoparticles: A potential and reusable catalyst for the reduction of aromatic nitro compounds. *Carbohydr. Polym.* 2017 Apr 1;161:187–96.
22. Xavier L, Dos T, Lisboa S, Lula I. Reuse of Coffee Grounds to Obtain Biodiesel and Activated Carbon for the Treatment of Textile Industrial Waste. *Sci. Amazon.* 2017;(2):91–108.
23. Mitra D, Zhou C, Muhammad, Tai Ming Hang, Karina Yew-Hoong Gin, Wang CH, et al. Emerging pharmaceutical and organic contaminants removal using carbonaceous waste from oil refineries. *Chemosphere.* 2021 May 1;271:129542–2.
24. Phasuphan W, Praphairaksit N, Imyim A. Removal of ibuprofen, diclofenac, and naproxen from water using chitosan-modified waste tire crumb rubber. *J. Mol. Liq.* 2019 Nov 15;294:111554

25. Zhou X, Dong CY, Yang Z, Tian Z, Lu L, Yang W, et al. Enhanced adsorption of pharmaceuticals onto core-brush shaped aromatic rings-functionalized chitosan magnetic composite particles: Effects of structural characteristics of both pharmaceuticals and brushes. *J. Clean. Prod.* 2018 Jan 1;172:1025–34.
26. Wu J, Lin J, Zhan Y. Interception of phosphorus release from sediments using Mg/Fe-based layered double hydroxide (MF-LDH) and MF-LDH coated magnetite as geo-engineering tools. *Sci. Total Environ.* 2020 Oct 1;739:139749–9.
27. Rodrigues AE, Silva CM. What's wrong with Lagergreen pseudo first order model for adsorption kinetics? *Chem. Eng. J.* 2016 Dec;306:1138–42.
28. Abo El Naga AO, El Saied M, Shaban SA, El Kady FY. Fast removal of diclofenac sodium from aqueous solution using sugar cane bagasse-derived activated carbon. *J. Mol. Liq.* 2019 Jul;285:9–19.
29. Didamony AME, Youssef WM, Abdou AA. Modification of Amberlite XAD-2 resin for U(VI) adsorption from Egyptian crude phosphoric acid. *Egypt. J. Pet.* 2019 Mar;28(1):71–6.
30. Leal M, Martínez-Hernández V, Meffe R, Lillo J, de Bustamante I. Clinoptilolite and palygorskite as sorbents of neutral emerging organic contaminants in treated wastewater: Sorption-desorption studies. *Chemosphere.* 2017 May 1; 175:534–42.
31. Rahman N, Nasir M. Effective removal of acetaminophen from aqueous solution using Ca (II)-doped chitosan/ β -cyclodextrin composite. *J. Mol. Liq.* 2020 Mar;301:112454.

CAPÍTULO III

CONCLUSÕES GERAIS

- O bioprocesso mostrou-se eficiente e sustentável;
- A partir dos dados obtidos foi demonstrada a valorização dos substratos agroindustriais atendendo aos requisitos da bioeconomia circular, transformando o descarte (borra de café, casca de coco e pó de serra) em matéria-prima para o desenvolvimento de compósitos para remoção de fármacos do meio ambiente;
- A tecnologia utilizada pode contribuir com a redução da poluição do meio ambiente pelo uso de resíduos agroindustriais e pela remoção de fármacos de águas contaminadas;
- A produção biotecnológica de compósitos sustentáveis demonstrou simplicidade, empregando materiais economicamente acessíveis e de baixo custo, que pode resultar em significativa redução nos custos operacionais.;
- A remoção rápida dos fármacos (dipirona, paracetamol e diclofenaco de sódio) e o alcance de equilíbrio em um período curto é uma das indicações que os QBGBC são eficientes e possibilita que o tratamento de efluentes seja mais econômico devido à diminuição do tempo de serviço.

CAPÍTULO IV

PERSPECTIVAS FUTURAS

- Otimizar o processo;
- Determinar os parâmetros termodinâmicos dos processos de adsorção dos fármacos nos compósitos;
- Avaliar a adsorção dos fármacos nos compósitos sustentáveis em outras temperaturas;
- Efetuar a construção de um filtro (piloto) para aplicação dos compósitos sustentáveis em sistemas de tratamento de água.