

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

**ESTUDO DA REMOÇÃO DE Cd, Zn e As EMPREGANDO A QUITOSANA COMO
ADSORVENTE**

LAYLA ÂNGELES GOMES

**RECIFE
2025**

LAYLA ÂNGELES GOMES

**ESTUDO DA REMOÇÃO DE Cd, Zn e As EMPREGANDO A QUITOSANA COMO
ADSORVENTE**

Monografia apresentada à coordenação do curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Química.

Professora Orientadora: Maria José de Filgueiras Gomes

**RECIFE
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

G633e Gomes, Layla Ângeles
Estudo da remoção de Cd, Zn e as empregando a
quitosana
como adsorvente / Layla Ângeles Gomes. – Recife, 2025.
51 f.: il.

Orientador(a): Maria José de Filgueiras Gomes.
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura Plena em
Química) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Química, Recife, BR-PE, 2025.
Inclui referências.

1. Metais tóxicos – Poluição 2. Quitosana 3. Adsorção
(tratamento de água) I. Gomes, Maria José de Filgueiras,
orient.
II. Título.

CDD 540

LAYLA ÂNGELES GOMES

ESTUDO DA REMOÇÃO DE Cd, Zn e As EMPREGANDO A QUITOSANA COMO ADSORVENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura Plena em Química da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de licenciada em química.

Aprovado em: 30/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Maria José de Filgueiras Gomes (Orientadora)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^ª. Dr. Manoel de Farias Souza Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^ª. Dr. Jucleiton José Rufino de Freitas
Universidade Federal Rural de Pernambuco

RESUMO

Com o advento da agricultura e da pecuária no período Neolítico e, posteriormente, com o avanço da globalização e das revoluções industriais, a exploração dos recursos naturais se intensificou, gerando impactos negativos no meio ambiente. Entre esses impactos, destaca-se a poluição dos corpos hídricos, especialmente por metais pesados como zinco (Zn), cádmio (Cd) e arsênio (As), os quais são altamente tóxicos e representam um sério risco à saúde pública e à biodiversidade. Esses metais possuem alta persistência ambiental e bioacumulam-se em organismos vivos, provocando efeitos adversos mesmo em baixas concentrações. Frente às limitações dos métodos convencionais de tratamento de água, a adsorção surge como uma alternativa promissora por ser de baixo custo, eficiente e ambientalmente adequada. Nesse contexto, a quitosana tem se destacado como um bioissorvente eficiente, devido à sua estrutura química que favorece interações com os metais, além de sua disponibilidade abundante e biodegradabilidade. Derivada da quitina, presente em exoesqueletos de crustáceos, a quitosana oferece uma solução sustentável alinhada aos princípios da Química Verde. Além disso, sua modificação química, como a reticulação com glutaraldeído, amplia sua estabilidade e capacidade de reutilização. Este trabalho investiga a eficiência da quitosana na remoção de zinco, cádmio e arsênio de águas contaminadas, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias limpas e acessíveis voltadas à descontaminação hídrica e à proteção ambiental.

Palavras-chave: metais tóxicos, quitosana, adsorção.

ABSTRACT

Since the Neolithic period, with the rise of agriculture and livestock, and later intensified by globalization and industrial revolutions, the exploitation of natural resources has caused significant environmental impacts. Among these, water pollution by heavy metals such as zinc (Zn), cadmium (Cd), and arsenic (As) stands out as a major concern due to their toxicity and persistence in aquatic ecosystems. These metals pose serious risks to human health and biodiversity, even at low concentrations, due to their bioaccumulative nature. Conventional water treatment methods often present limitations in efficiency, cost, and selectivity. As an alternative, adsorption has emerged as a low-cost and effective method for removing such pollutants. In this context, chitosan has proven to be a promising biosorbent due to its chemical structure, biodegradability, and availability, especially in crustacean-rich regions. Derived from chitin, chitosan contains functional groups that bind effectively to metal ions. Furthermore, its chemical modification, such as crosslinking with glutaraldehyde, enhances its stability and reusability. This work aims to evaluate the effectiveness of chitosan in the removal of zinc, cadmium, and arsenic from contaminated water, supporting the development of environmentally friendly and sustainable water treatment technologies in alignment with Green Chemistry principles.

Keywords: toxic metals, chitosan, adsorption.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivos Gerais	8
2.2 Objetivos Específicos	8
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
3.1 Contaminação dos corpos hídricos no cenário mundial e brasileiro	9
3.2 Contaminação das águas por metais tóxicos	14
3.3 Metais Tóxicos	17
3.4 Quitosana	22
3.4.1 Aplicações da Quitosana	26
3.4.2- Partículas magnéticas envolvidas por quitosana	29
3.4.3- Trietilenodiamina aplicado a quitosana	29
4. METODOLOGIA	31
4.1 Fabricação das Esferas de Quitosana	31
4.2 Caracterização morfológica por MEV	32
4.3 Fabricação de Quitosana em um novo formato	33
4.4 Ensaios de Adsorção	35
4.4.1 Teste - Amostras dos Ensaios de Adsorção	35
4.5. Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS)	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Caracterização Morfológica	37
5.2 Teste de Adsorção	38
5.2.1 Teste de Adsorção com Zn	38
5.2.2 Teste de Adsorção com Cd e As	39
6. CONCLUSÕES	41
7. PERSPECTIVAS	42

1. INTRODUÇÃO

Com o fim do estilo de vida nômade no período Neolítico e a introdução das atividades agrícolas e pecuárias, ocorreram mudanças significativas no uso e na ocupação da terra. Com a globalização e as revoluções industriais e tecnológicas, a exploração dos recursos naturais foi se intensificando, gerando desequilíbrios ambientais e aumentando os níveis de poluição. Esse cenário levou, a partir da década de 1960, à necessidade de repensar práticas humanas que impactam negativamente o meio ambiente (Schama, 1996; Duarte, 2007). Nesse contexto, em 1972, a Organização das Nações Unidas (ONU) realizou a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente, pressionando países como o Brasil a adotar políticas de gestão ambiental integrada (Costa et al., 2015).

Entretanto, com o aumento da globalização e o crescimento de atividades industriais desordenadas, diversos ciclos naturais passaram a ser comprometidos, incluindo o ciclo da água, essencial à manutenção da vida. De acordo com a literatura, estudos indicam que a contaminação de águas superficiais por metais tóxicos como zinco, cádmio e arsênio é uma realidade, sendo apontada como a causa de doenças quando esses elementos se acumulam em concentrações significativas (Yabe, 1998; Sankhla, 2016). Portanto, o tratamento dessas águas tem se tornado uma prioridade, pois a presença contínua desses contaminantes representa riscos à saúde humana, à fauna aquática e às populações expostas (Attallah et al., 2015).

Dentre os diversos contaminantes encontrados em águas superficiais, os metais tóxicos se destacam pela sua persistência no ambiente e pela capacidade de se acumularem nos organismos vivos, principalmente no tecido adiposo. Elementos como cádmio (Cd), arsênio (As) e zinco (Zn) são frequentemente detectados em corpos hídricos próximos a áreas industriais, de mineração e de intensa atividade agrícola (Nriagu, 1990). Esses metais, mesmo em baixas concentrações, podem provocar sérios danos à saúde humana, incluindo efeitos neurológicos, renais, reprodutivos e até cancerígenos (Hsu et al., 2024). Além disso, sua presença compromete o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos, afetando a biodiversidade e a qualidade da água utilizada para abastecimento e irrigação (Leitão, 2025).

Os métodos convencionais de tratamento de água incluem processos físicos, químicos e biológicos, como filtração, coagulação-floculação, precipitação química, troca iônica e tratamentos biológicos (Hsu et al, 2024; apud Wang, 2009). Embora eficientes em determinados contextos, esses métodos apresentam limitações importantes, como alto custo operacional, complexidade técnica, geração de resíduos secundários e, muitas vezes, baixa seletividade na remoção de metais tóxicos (Saleh et al, 2022)..

Dessa forma, tem crescido o interesse por técnicas alternativas de baixo custo e alto rendimento, como o método de adsorção. Esse processo é caracterizado por ser um fenômeno físico-químico de superfície, no qual os poluentes presentes em uma fase fluida se fixam na superfície de um material sólido, o adsorvente. Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (Ruthven, 1984). A eficiência desse processo pode variar de acordo com diversos fatores, como o pH da solução, a concentração dos contaminantes, o tempo de contato entre as fases, o tamanho das partículas envolvidas, a temperatura do sistema e as características tanto dos poluentes quanto do material adsorvente (Cooney, 1999).

Diante dessa conjuntura, a quitosana pode ser utilizada como adsorvente para remoção de elementos químicos em água, devido à presença de grupos amina e hidroxila que servem como sítios ativos além de ser uma alternativa atraente como biomaterial devido às características físico-químicas, estabilidade química, alta reatividade, excelente comportamento de quelação e alta seletividade com relação aos poluentes (Dash et al., 2015). A quitosana é um polímero proveniente da desacetilação da quitina, sendo considerada um dos biopolímeros mais abundantes e largamente distribuídos na natureza por estar presente no exoesqueleto de animais invertebrados, na maioria dos artrópodes e na parede celular de fungos (Macedo, 2016).

Os dois principais biopolímeros são a quitina e a quitosana, obtidos a partir de carapaças de crustáceos (camarão, lagosta e caranguejo), matéria-prima disponível de forma abundante na região do Nordeste (Stopa, 2007). Com o objetivo de reaproveitar os rejeitos da atividade pesqueira e, considerando o baixo impacto ambiental causado pela quitosana, a quitosana proveniente da quitina apresenta

elevado potencial de aplicação nas indústrias de alimentos, medicina, agricultura e ambiente (Macedo, 2016). Por isso, seu uso pode contribuir significativamente no aspecto econômico e ambiental para tratamento de resíduos com desenvolvimento de uma tecnologia sustentável (Horita et al., 2009). Em altos valores de pH, os grupos amino da quitosana são desprotonados e seus pares de elétrons reagem com aldeídos, ácidos, anidridos, epóxidos (Stopa, 2007).

Nessa perspectiva, é factível utilizar a quitosana para remoção de elementos químicos em água. Além de suas propriedades naturais, a quitosana pode ser modificada quimicamente com o objetivo de potencializar sua capacidade de adsorção. A reticulação com agentes como o glutaraldeído, por exemplo, confere maior estabilidade estrutural ao biopolímero, permitindo sua reutilização em múltiplos ciclos de adsorção. Outras estratégias incluem a inserção de grupos funcionais específicos ou a combinação da quitosana com outros materiais, formando compósitos que ampliam a seletividade e a eficiência na remoção de determinados contaminantes (Gonsalves, 2011).

Do ponto de vista ambiental, o uso da quitosana está em consonância com a Química Verde, definida como a projeção de meios reacionais e técnicas de síntese bio-enzimáticas que oferecem novas maneiras de obter a entidade química pretendida, mas com a alternativa de ser menos poluentes ou não poluentes e diminuir o custo energético, quando executadas em larga escala (Anastas e Williamson, 1996). Portanto, a utilização da quitosana como material adsorvente representa uma alternativa viável e sustentável para o tratamento de águas contaminadas. Seu aproveitamento, além de agregar valor a resíduos da cadeia produtiva de crustáceos, contribui com os princípios da química verde, promovendo soluções menos agressivas ao meio ambiente (Antunes, 2016).

Nesse sentido, a adoção de materiais como a quitosana nos processos de adsorção se mostra uma estratégia promissora para o desenvolvimento de tecnologias limpas, acessíveis e ambientalmente corretas. No presente trabalho, há a demonstrativa dos objetivos gerais e específicos, o embasamento teórico as metodologias utilizadas e os resultados obtidos experimentalmente, sendo os metais tóxicos em foco a serem adsorvidos pelos biossorvente de quitosana zinco, cádmio e arsênio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Avaliar a capacidade de adsorção da quitosana em zinco, cádmio e arsênio presentes em águas superficiais.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização de elementos químicos presentes em águas superficiais por Espectrometria de Absorção Atômica e Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (EDXRF);
- Preparar o bioissorvente a partir da quitosana para adsorção dos elementos zinco, cádmio e arsênio presentes nas amostras;
- Determinar as concentrações de zinco, cádmio e arsênio em amostras de água com e sem bioissorvente em solução;
- Avaliar a eficiência das esferas de quitosana como adsorvente dos elementos químicos por meio da Espectrometria de Absorção Atômica em Chamas e Absorção Atômica em Forno Grafite.
- Avaliar o aumento da eletronegatividade dos bioissorventes da quitosana por trietilenodiamina e óxido de grafeno.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente degradação dos recursos hídricos tem se tornado uma das principais preocupações ambientais do século XXI, afetando diretamente a saúde humana, a biodiversidade aquática e o equilíbrio dos ecossistemas. No Brasil e no mundo, a contaminação das águas por substâncias tóxicas, especialmente metais pesados, representa um dos maiores desafios no que diz respeito à gestão ambiental e ao acesso à água potável (Montagner, 2017). Diante desse cenário, diversas tecnologias têm sido estudadas para a remoção de contaminantes, entre elas, destaca-se o uso de biopolímeros como a quitosana, material de origem natural com alto potencial adsorvente. Esta fundamentação teórica tem como objetivo discutir os principais aspectos relacionados à poluição hídrica, a presença de metais tóxicos em corpos d'água, e as propriedades da quitosana que a tornam uma alternativa viável e sustentável para o tratamento de águas contaminadas (Hsu,2024).

3.1 Contaminação dos corpos hídricos no cenário mundial e brasileiro

Ao longo do tempo, a contaminação dos recursos hídricos tem sido motivo de alerta, especialmente após episódios marcantes que evidenciaram seus riscos à saúde pública. Mas, medidas só foram colocadas em prática após vários incidentes que afetaram a saúde humana. Sendo o caso mais famoso, o de Minamata, ocorrido entre 1932 no Japão, em que uma fábrica de produtos químicos descarregou líquido contendo altas concentrações de metais tóxicos em uma baía local (Costa,2015).

Entretanto, o debate sobre a poluição da água não pode ser singularizado em uma única causa. De acordo com (Rodrigues, 2019), a Revolução Industrial representou um marco na história da humanidade, especialmente no que diz

respeito à produção em larga escala e à expansão do sistema capitalista, dando origem ao capitalismo industrial, que acabou se espalhando globalmente. Assim, com a Revolução Industrial, intensificaram-se tanto a exploração e o uso dos recursos naturais quanto o descarte de resíduos no meio ambiente.

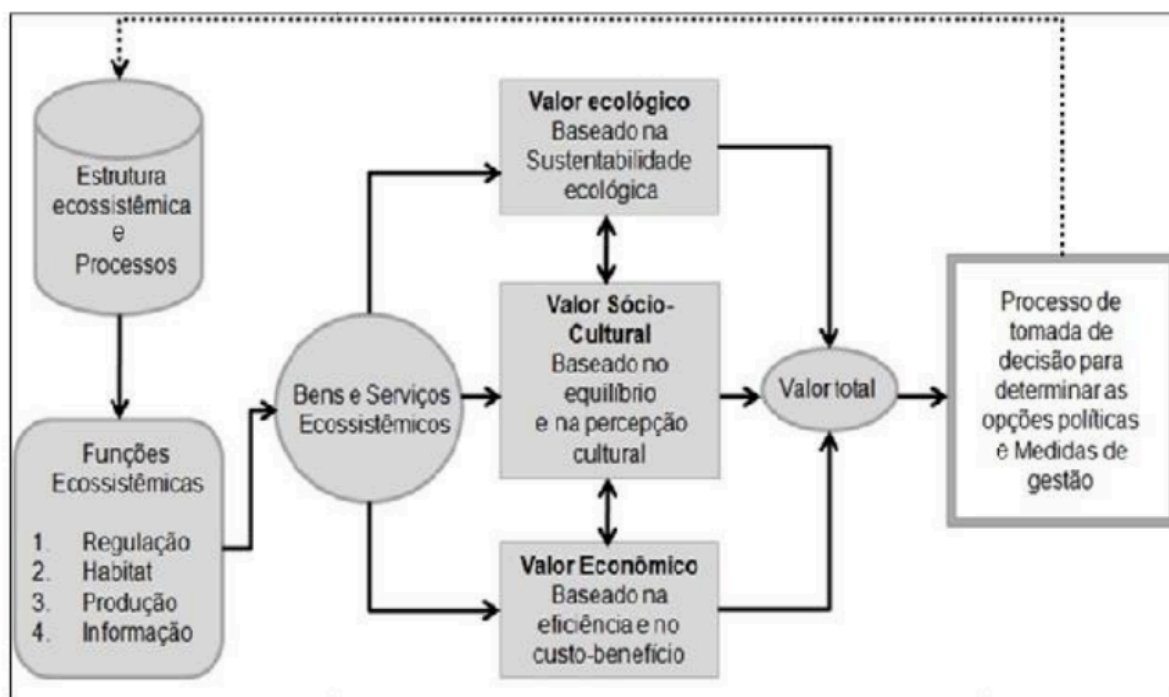
Os ecossistemas podem ser definidos como sistemas que envolvem as complexas, dinâmicas e constantes interações entre os componentes bióticos e abióticos, funcionando de forma integrada para a manutenção da vida. (Tansley, 1935 apud Willis, 1997).

O não entendimento dos ecossistemas e dos serviços ecossistêmicos pode ocasionar sérias consequências em relação à contaminação dos recursos hídricos e à poluição das águas (Costa, 2015). Isso ocorre porque a falta de compreensão sobre as interações entre os componentes bióticos e abióticos afeta diretamente a qualidade e a disponibilidade da água, como a filtragem natural, o ciclo hidrológico e a purificação por meio da vegetação e dos microrganismos.

Sem esse entendimento, as ações humanas tendem a ser orientadas apenas por interesses econômicos imediatos, resultando na degradação dos ecossistemas aquáticos, na contaminação por poluentes industriais, agrícolas e domésticos, e na perda da capacidade de autorregulação dos corpos hídricos. Além disso, compromete-se a oferta de serviços ecossistêmicos essenciais, como o abastecimento de água potável, o controle de enchentes e a manutenção da biodiversidade (Hu et al, 2025).

O discurso sobre a preservação ambiental nunca esteve tão presente, porém, paradoxalmente, também nunca se estimularam tantas demandas de consumo, o que resulta em uma geração de resíduos sem precedentes (Duarte, 2007). O fluxograma apresentado na Figura 01 busca evidenciar a conexão entre os serviços ecossistêmicos e a complexidade ecológica, ressaltando a relevância dessa relação para a elaboração de estratégias de planejamento ambiental.

Figura 1:



Fonte: (Costa,2015)

.A contaminação de mananciais por metais pesados tem sido um dos principais desafios da gestão hídrica no Brasil, especialmente em função de atividades como mineração, descarte industrial e uso indiscriminado de defensivos agrícolas. Elementos como cádmio (Cd), arsênio (As) e zinco (Zn) apresentam alta toxicidade mesmo em baixas concentrações, sendo persistentes no ambiente e com potencial de bioacumulação. De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, os limites máximos permitidos para águas doces de Classe 2, destinadas ao abastecimento humano após tratamento, são de 0,001 mg/L para Cd, 0,01 mg/L para As e 0,18 mg/L para Zn, e para água salgada são de 0,01 para As, 0,005 para Cd e 0,09 para Zn, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1

ELEMENTO E LIMITES MÁXIMOS PERMITIDOS mg/L	ÁGUAS SALGADAS	ÁGUAS DOCES
ARSÊNIO	0,01	0,01
CÁDMIO	0,005	0,001
ZINCO	0,09	0,18

Fonte: CONAMA nº 357/2005 adaptado

Estudos recentes comprovam a presença desses metais em níveis alarmantes em diversos corpos hídricos do país. Zini e Gutterres (2021) realizaram uma revisão sistemática que identificou concentrações de cádmio e outros contaminantes acima dos padrões legais em amostras de água potável em várias regiões do Brasil. Da mesma forma, Ellwanger e Chies (2023) reportaram a contaminação por arsênio e cádmio em águas consumidas pela comunidade indígena Maxakali, em Minas Gerais. Além disso, pesquisa publicada por Silva et al. (2024) analisou a presença de zinco, cádmio e arsênio em água, sedimentos e macrófitas aquáticas em um rio da região semiárida, indicando risco ambiental e sanitário. Esses dados reforçam a urgência de políticas públicas voltadas ao monitoramento e controle desses poluentes, bem como a adoção de tecnologias para sua remoção, como o uso de adsorventes naturais.

Em 1972, foi a Conferência de Estocolmo, na Suécia, que os países começaram a debater sobre políticas públicas voltadas para o meio ambiente. Determinando uma nova ordem incorporada no seio do sistema jurídico nacional dos Estados. (Passos,2009). Sendo a água uma das principais preocupações a serem discutidas por ser um meio renovável segundo (Lanfredi, 2002).

O Brasil defendeu, desde os preparativos para a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, a necessidade de proteger o meio ambiente, mas sem abrir mão do seu direito ao desenvolvimento. A delegação brasileira argumentou que o crescimento econômico poderia ser compatível com a solução dos problemas ambientais, rejeitando a ideia de que a preservação ambiental devesse limitar o progresso dos países em desenvolvimento (Lago,2007). Conforme declarou o chefe da delegação brasileira na época, de acordo com Vera Pedrosa:

Obrava a Delegação brasileira no sentido de reorientar os trabalhos preparatórios da Conferência, ampliando o escopo inicialmente previsto, de forma a que incluísse o tema do desenvolvimento como elemento positivo de solução de problemas ambientais. Dessa forma, evitar-se-ia que a Conferências constituísse exercício meramente conservacionista, de interesse apenas para os países desenvolvidos. Tratava-se uma batalha para impedir que os interesses conservadores dos países desenvolvidos, no sentido da manutenção do statu quo econômico mundial, se valessem da "via ambiental" para tentar justificar procedimentos e estratégias imobilistas.

Embora o Brasil tenha assumido, na Conferência de Estocolmo, um compromisso discursivo com a proteção ambiental, a trajetória subsequente revelou um distanciamento entre a retórica e a prática. O avanço acelerado do desenvolvimento econômico, impulsionado por processos industriais e agrícolas pouco regulados, resultou em significativos impactos ambientais, especialmente sobre os recursos hídricos (Schmitz, 2017). Tais substâncias acumulam-se nos corpos d'água, afetando a biodiversidade aquática e representando sérios riscos à saúde humana (Costa,2015).

3.2 Contaminação das águas por metais tóxicos

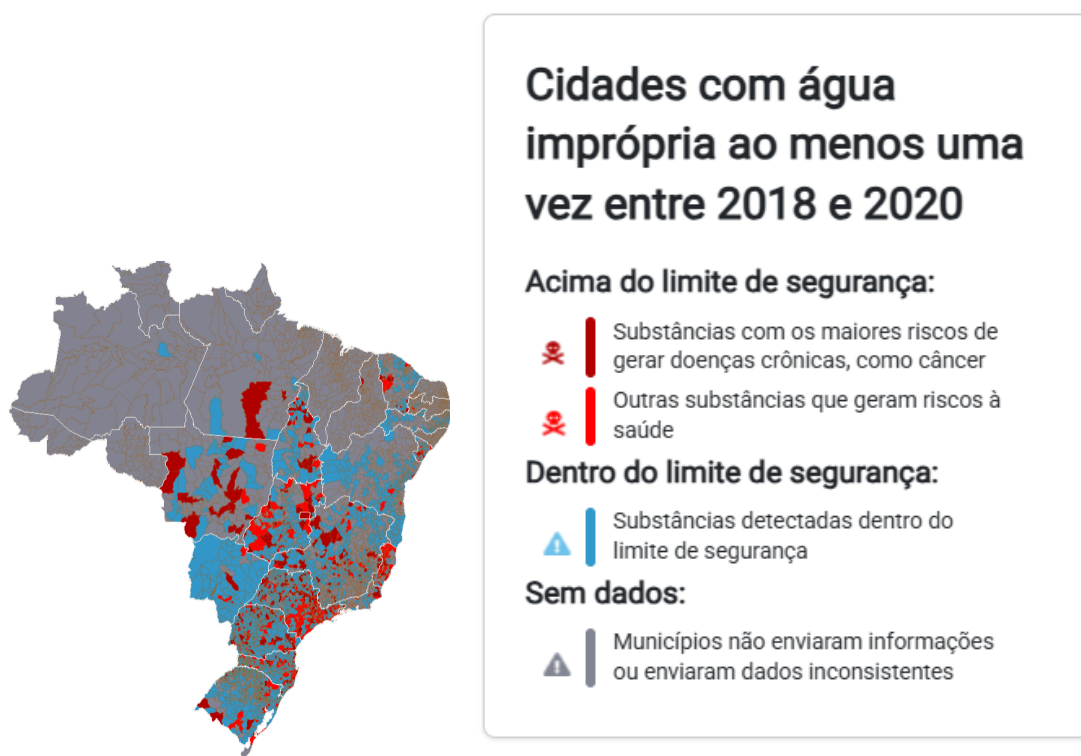
A água é um recurso essencial e de valor inestimável para a manutenção da vida. Sua grande presença no planeta muitas vezes gera a impressão equivocada de que é um bem ilimitado. Contudo, apenas cerca de 3% de toda a água doce existente está acessível para o consumo humano. O Brasil possui aproximadamente 53% dos recursos hídricos da América do Sul e cerca de 12% do total disponível no mundo, destacando-se ainda que os reservatórios subterrâneos possuem uma quantidade cerca de 100 vezes maior do que as águas superficiais (Tunsi, 2005; Silva et al., 2006;)

A presença de metais tóxicos em ambientes aquáticos pode provocar diversos impactos negativos à saúde humana, incluindo efeitos neurológicos significativos. Alguns desses metais são reconhecidos por sua capacidade de causar danos ao sistema nervoso central, podendo resultar no surgimento de doenças neurológicas graves e, muitas vezes, irreversíveis (Gonzaga et al., 2023). No Brasil, um exemplo alarmante de vulnerabilidade hídrica é observado entre os indígenas Maxakali, em Minas Gerais, onde a água consumida apresenta contaminação por metais tóxicos. Um estudo revelou a presença de arsênio e cádmio em 46% e 22% das amostras, respectivamente, com concentrações superiores às permitidas pela legislação (Assis, 2019). Esses metais, reconhecidamente perigosos à saúde humana, somados à ausência de saneamento básico, ampliam o risco de doenças de veiculação hídrica e revelam a urgência de políticas públicas voltadas à proteção dessas comunidades.

Segundo informações do *Global Burden of Disease*, a má qualidade da água é considerada um fator de risco significativo à saúde humana, sendo colocada no mesmo patamar de ameaça que a hipertensão arterial e as infecções sexualmente transmissíveis. No contexto brasileiro, apenas cerca de 30,26 milhões de pessoas têm acesso à água própria para o consumo, conforme dados da plataforma Our World in Data, com base em estudos da OMS e UNICEF. Essas entidades apontam o Brasil como uma das nações em situação crítica quanto ao perigo de enfermidades provocadas pela ingestão de água contaminada, tanto pela origem quanto pelas falhas nos processos de tratamento do recurso hídrico.

No Mapa 1, abaixo, é evidenciado um cenário preocupante: grande parte do território brasileiro, contém, na realidade, água imprópria. Sendo exposta a precariedade dos serviços de saneamento básico e a fragilidade das políticas de controle que são estabelecidas pelos órgãos responsáveis. O mesmo mapa destaca os principais agentes responsáveis por essa situação: uso de fertilizantes, agrotóxicos, ausência de infraestrutura adequada para o tratamento de esgoto, descarte incorreto de resíduos industriais e os impactos de acidentes ambientais.

Mapa 1- Mapa da água- Ministério da Saúde-2018-2020



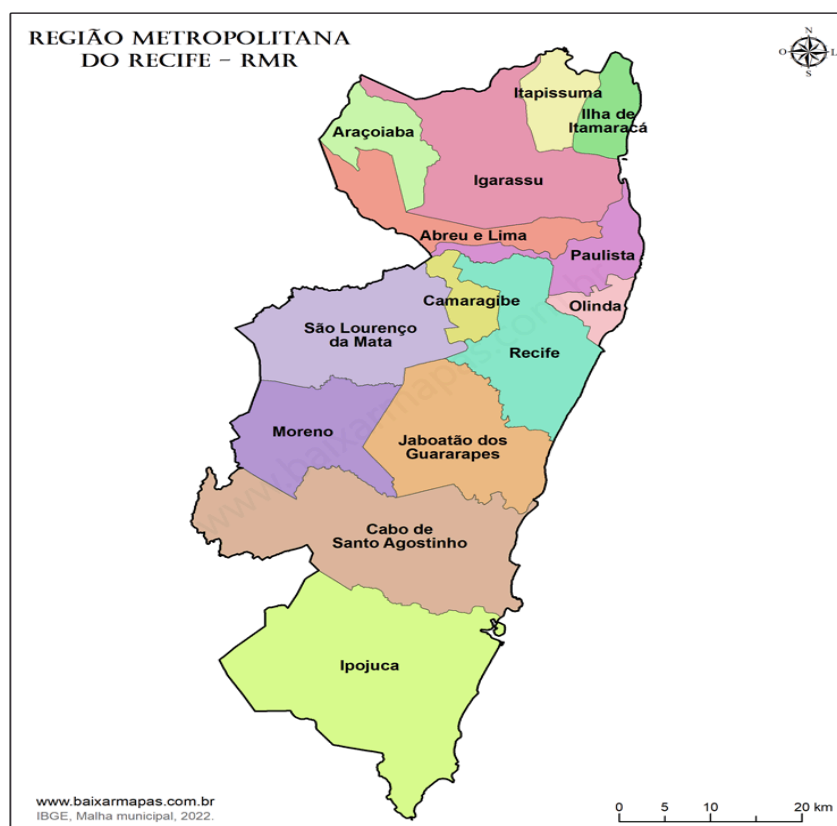
Fonte: Mapa da água- Ministério da saúde-2023

As informações apresentadas no mapa são provenientes de análises realizadas pelas companhias e instituições responsáveis pelo fornecimento de água potável. Esses resultados alimentam o Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua), coordenado pelo Ministério da Saúde. A interpretação dos dados foi feita seguindo os critérios estabelecidos por esse mesmo ministério.

O mapa mostra as substâncias químicas em dois níveis de risco, diferenciados por tonalidades de vermelho. Essa categorização foi elaborada pela equipe da Repórter Brasil, tomando como referência as classificações atribuídas a cada substância por instituições reguladoras internacional, como a Organização Mundial da Saúde (OMS).

No estado de Pernambuco, na Região Metropolitana do Recife (RMR), que é formada por 14 cidades, entre elas Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Igarassu, Abreu e Lima, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, São Lourenço da Mata, Araçoiaba, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Moreno e Itapissuma, como mostrado na Figura 2. Essa região concentra aproximadamente 3,6 milhões de habitantes, o que representa cerca de 72% da população de todo o estado de Pernambuco. O fornecimento de água em todos esses municípios é de responsabilidade da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), conforme dados da Agência Nacional de Águas - ANA.

Figura 2– Mapa da Região Metropolitana do Recife (RMR).



Fonte: IBGE, 2022

O abastecimento de água na RMR não vem de uma única fonte ou de um único sistema, mas de um conjunto de fontes e estruturas diferentes, que funcionam de forma interligada ou isolada, a depender do local. As principais fontes de água superficial (rios e barragens) que abastecem a região são: Barragens De Tacaimbó, Gurjaú e Botafogo, bem como, os rios Capibaribe, Ipojuca, Beberibe, entre outros. Muitos municípios dependem também de poços para complementar seu abastecimento, e apenas dois (Ilha de Itamaracá e Itapissuma) captam exclusivamente em poços (ANA, 2009).

Essa diversidade de fontes, apesar de essencial para atender a demanda populacional, levanta preocupações em relação à qualidade da água fornecida, principalmente no que diz respeito às águas subterrâneas. Um estudo preliminar sobre a presença de metais traço nas águas, realizado por Silva et al. (2010), identificou picos isolados acima dos limites permitidos para alguns elementos.

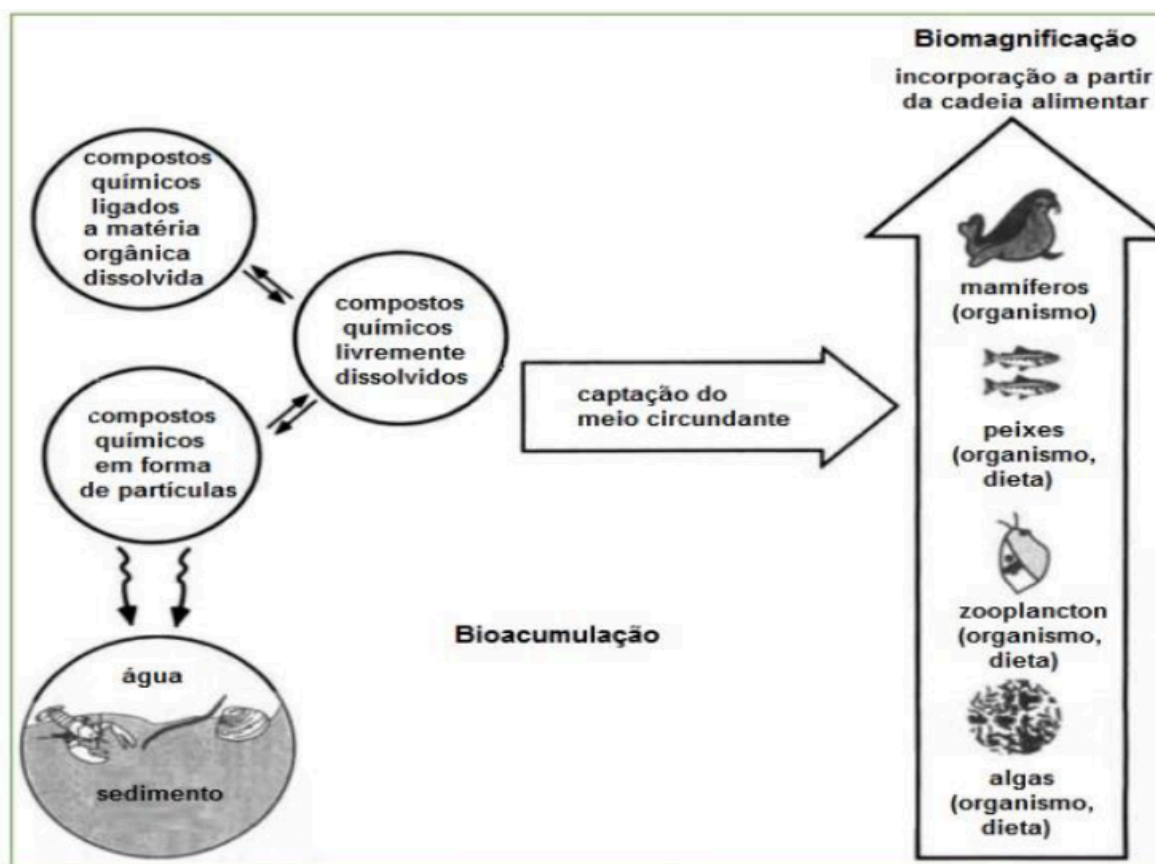
A contaminação por metais se dá por meio da atividade industrial ou a partir de fontes naturais. A mineração, fundição e purificação de minerais fazem com que haja uma disseminação mundial. A longo prazo, por não serem eliminados normalmente pelo corpo, podem levar a doenças graves, que variam de acordo com o metal intoxicante (Silva, 2005).

3.3 Metais Tóxicos

Os metais tóxicos são elementos químicos que, por sua natureza, não sofrem degradação no meio ambiente e podem representar sérios riscos à saúde humana. Embora em sua forma elementar e livre apresentem baixa toxicidade, seu perigo real surge quando estão na forma catiônica ou quando se ligam a pequenas cadeias de carbono, formando compostos altamente reativos e bioativos. Uma vez incorporados aos organismos vivos, esses metais tendem a se acumular progressivamente nos tecidos biológicos, processo conhecido como bioacumulação (Hsu, 2024). Além disso, à medida que passam de um nível trófico para outro, ao longo da cadeia alimentar,

podem ocorrer aumentos significativos de concentração, fenômeno denominado biomagnificação, como ilustrado na Figura 3. (Garcia, Passos, 2012).

Figura 3- Acumulação e Bioacumulação de metais na água-Brasil



Fonte: [http://jovenspesquisadores.com.br/2018/uploads/posteres/1/poster-jp-ketinibaccin_21_16_38.p](http://jovenspesquisadores.com.br/2018/uploads/posteres/1/poster-jp-ketinibaccin_21_16_38.pdf)
df

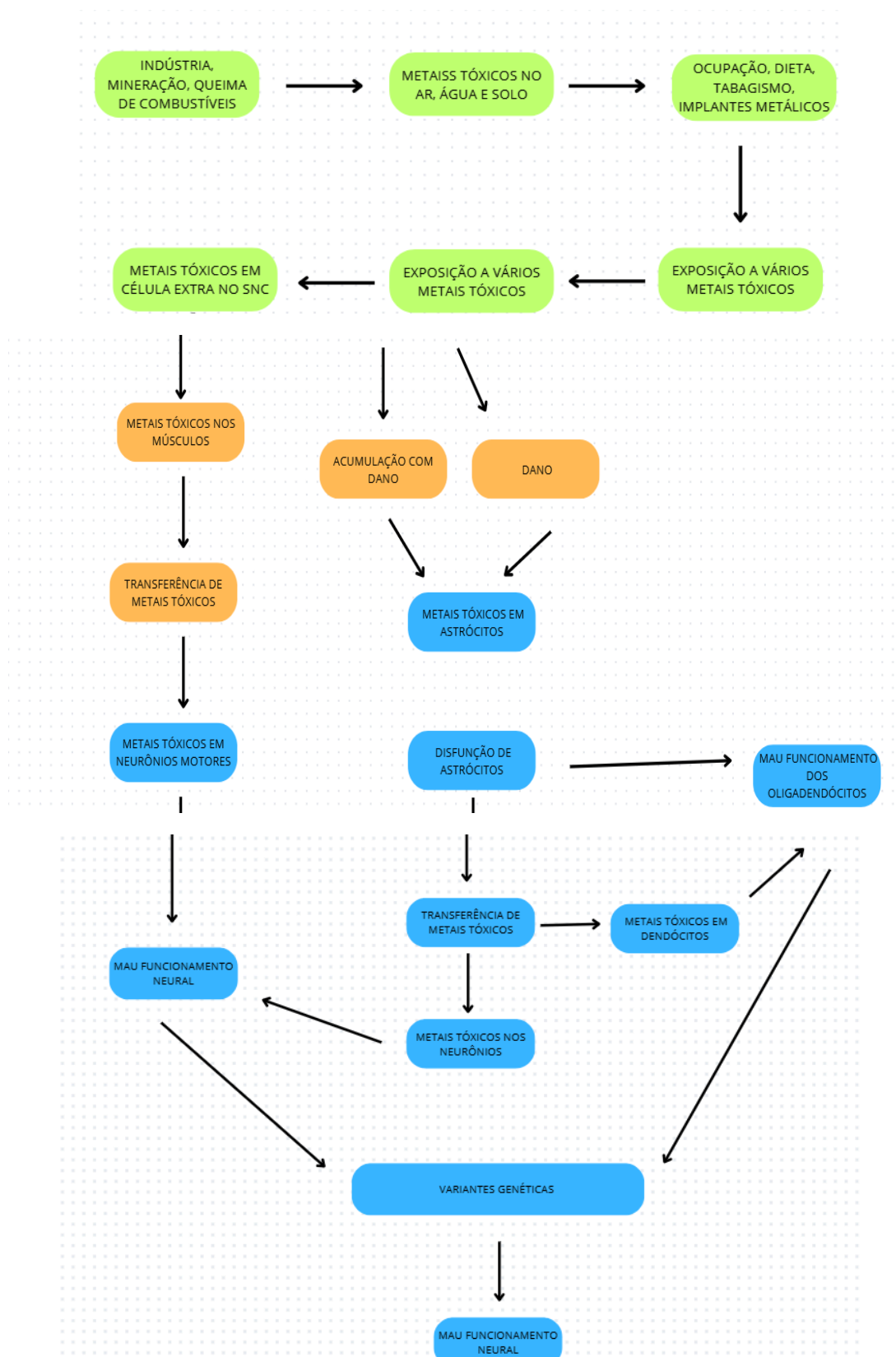
A exposição a metais tóxicos tem sido apontada como um fator ambiental de risco no desenvolvimento de diversas doenças que afetam o sistema nervoso central (Pourret, 2019). Entre os principais distúrbios neurodegenerativos esporádicos associados estão a esclerose múltipla, a esclerose lateral amiotrófica, a doença de Parkinson e a doença de Alzheimer (Pamphlett; Bishop; 2023). Embora avanços

científicos tenham permitido a identificação de predisposições genéticas relacionadas a essas enfermidades, a identificação dos agentes ambientais responsáveis por desencadeá-las ainda representa um desafio.

Nesse contexto, os metais tóxicos presentes no ambiente provenientes tanto de fontes naturais quanto de atividades humanas (como poluição industrial e agrícola), têm ganhado destaque como potenciais causadores de danos neurológicos. Sua capacidade de atravessar barreiras biológicas e acumular-se em tecidos sensíveis, como o cérebro, levanta preocupações sobre os mecanismos pelos quais podem contribuir para a morte de neurônios, a perda de substância branca e outras alterações estruturais no sistema nervoso (Pamphlett; Bishop; 2023). Entretanto, ainda existem lacunas científicas quanto à via exata de entrada desses metais no sistema nervoso, se a exposição isolada a um único metal é suficiente para desencadear a doença ou se a combinação de diferentes metais potencializa os efeitos neurotóxicos (Pamphlett; Bishop; 2023).

A hipótese que relaciona a exposição a metais tóxicos ao surgimento de distúrbios neurológicos (Figura 4) propõe que o processo se desenvolve em etapas interligadas: primeiramente, os metais tóxicos presentes no ambiente são absorvidos pelos neurônios localizados no locus ceruleus, uma região rica em neuromelanina, o que leva a danos multifocais na barreira hematoencefálica (Pamphlett; Bishop; 2023). Em seguida, essas substâncias tóxicas, agora circulantes, penetram nos astrócitos, que por sua vez transferem os metais para os oligodendrócitos e outros tipos de neurônios. Por fim, a hipótese sugere que os diferentes quadros de distúrbios neurológicos surgem a partir de variações no nível de disfunção dessas células (astrócitos, oligodendrócitos e neurônios), influenciados por fatores genéticos individuais e pelas diversas combinações de metais tóxicos envolvidos na exposição (Pamphlett; Bishop; 2023).

Figura 4- Metais e Formação das doenças neurológicas



Fonte: Roger Pamphlett and David P. Bishop in the toxic metal hypothesis for neurological disorders, 2023

As intoxicações mais comuns são provocadas por metais como arsênio, cádmio e zinco.. Paralelamente, do ponto de vista ambiental, a Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece os padrões de qualidade para corpos d'água (rios, lagos e reservatórios), classificando-os conforme seu uso (abastecimento, recreação, preservação da fauna aquática).

Determinados metais não deveriam estar presentes no corpo humano, nem mesmo em concentrações muito baixas, pois podem desencadear efeitos iniciais sutis e inespecíficos, que dificultam a identificação de um problema de saúde específico. Com o passar do tempo, devido à dificuldade de eliminação pelo organismo, esses elementos podem se acumular e causar doenças sérias, cujas manifestações dependem do tipo de metal envolvido na contaminação (SILVA, 2006) (Tabela 3).

Tabela 3 – Doenças relacionadas a intoxicação de alguns elementos metálicos

METAL	FONTES DE CONTAMINAÇÃO	SINTOMAS DE INTOXICAÇÃO
Arsênio	Óleos combustíveis, pesticidas e herbicidas metalúrgicas, plantas marinhas, frutos do mar e outro.	Transtorno gastrointestinais, espasmos musculares-viscerais, náuseas, diarreias, inflamações da boca, garganta e dores abdominais
Cádmio	Cigarros, materiais odontológicos, indústrias de aço, efluente gasosos industriais, fungicidas, solda e outros	Provoca aumento da pressão sanguínea e aumento do coração. Queda da imunidade, aumento da próstata, enfraquecimento ósseo, dores nas articulações, anemia, perda do olfato e perda do desempenho sexual
Zinco	Efluentes industriais (galvanoplastia, metalurgia, produção de baterias, tintas, papel), mineração, uso de fertilizantes e pesticidas, águas pluviais urbanas, corrosão de telhados galvanizados e resíduos domésticos	Náuseas, vômitos, cólicas abdominais, diarreia, dor de cabeça, fadiga, alteração do paladar, anemia e, em casos graves, danos aos rins e ao sistema nervoso central

Fonte: SILVA, 2006 adaptado.

3.4 Quitosana

A quitosana é um polímero natural obtido a partir da quitina, um polissacarídeo amplamente encontrado em organismos como crustáceos, insetos, moluscos e certos tipos de fungos. Sua produção envolve a retirada de grupos acetil da quitina, processo conhecido como desacetilação, realizado com o uso de hidróxido de sódio em condições controladas. Esse material destaca-se por estar amplamente presente na natureza e por apresentar características como biocompatibilidade, degradação facilitada no ambiente, ausência de toxicidade e viabilidade econômica para diversas aplicações (Stopa, 2007; Zhu et al., 2007; Nakano, 2016; Gachhi; Hungund, 2018, Sobreira, 2020). A quitosana tem se destacado como uma alternativa promissora frente a outros biomateriais, principalmente por suas propriedades físico-químicas, estabilidade em diferentes condições, elevada reatividade e habilidade de atuar como agente quelante, ou seja, sua aptidão para se ligar a íons metálicos, neutralizando-os. Essas características possibilitam seu uso em múltiplas áreas do conhecimento. Além disso, a presença de grupos funcionais ativos faz da quitosana um adsorvente altamente eficiente para elementos químicos tóxicos, incluindo também radionuclídeos (Modi et al., 2015; Nakano, 2016).

A quitosana é formada por unidade de $\beta(1, 4)$ -2-amino-2-desoxi-D-glucopiranosose ou, ainda, $\beta(1 \rightarrow 4)$ 2-amino-2-deoxi-D-glucose (D-glucosamina). Ela pode ser definida como biopolímero ou aminopolissacarídeo ou copolímero biodegradável. A mesma é obtida a partir da desacetilação da quitina, sendo retirado o grupo acetila (Kulkarni et al., 2007; Nakano, 2016; Stopa, 2007; Sobreira, 2020). Na Tabela 4, estão algumas fontes e organismos que possuem quitina em sua estrutura.

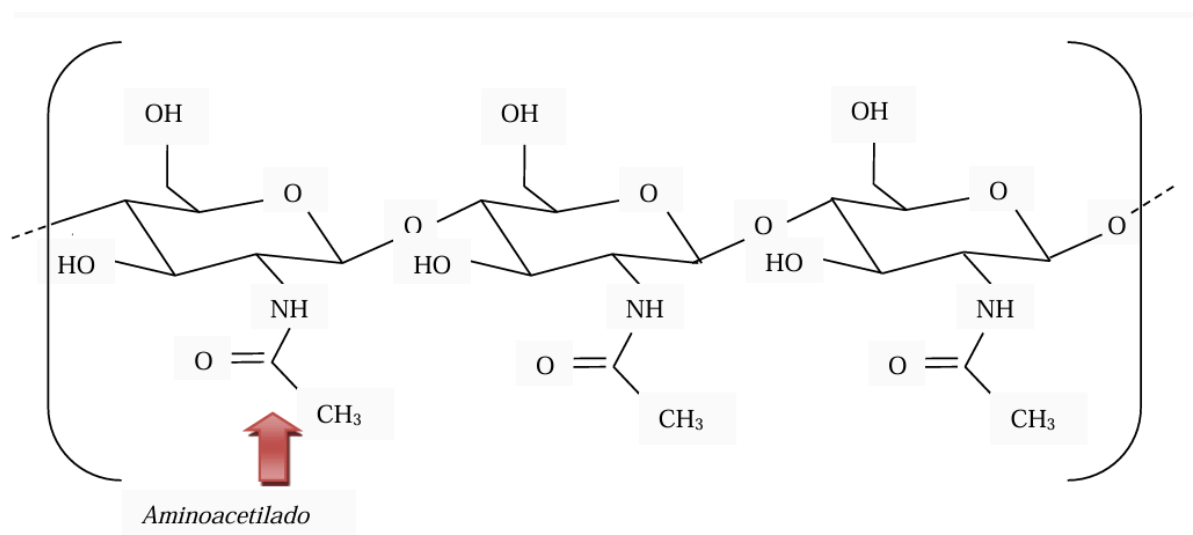
Tabela 4 - Fontes de quitina e organismos fonte de quitina

Fonte de Quitina	Organismos
Paredes celulares dos fungos	Basidiomicetos superiores
Exoesqueleto dos artrópodes (crustáceos e insetos)	Crustáceos: caranguejos, lagostas e camarão Insetos: besouros
Rádula de moluscos	Caracóis e lesmas

Fonte: Adaptado de Modi et al. (2015).

A quitina representa cerca de 1,4% da massa dos insetos e corresponde a aproximadamente 15 a 20% do peso das carapaças dos crustáceos (Stopa, 2007). A Figura 5 apresenta a estrutura química da quitina, destacando-se o grupo aminoacetilado em sua composição e a Figura 6 sua forma comercial.

Figura 5: Estrutura química da quitina antes da reação de desacetilação



Fonte: Sobreira, 2020

Figura 6- Quitina

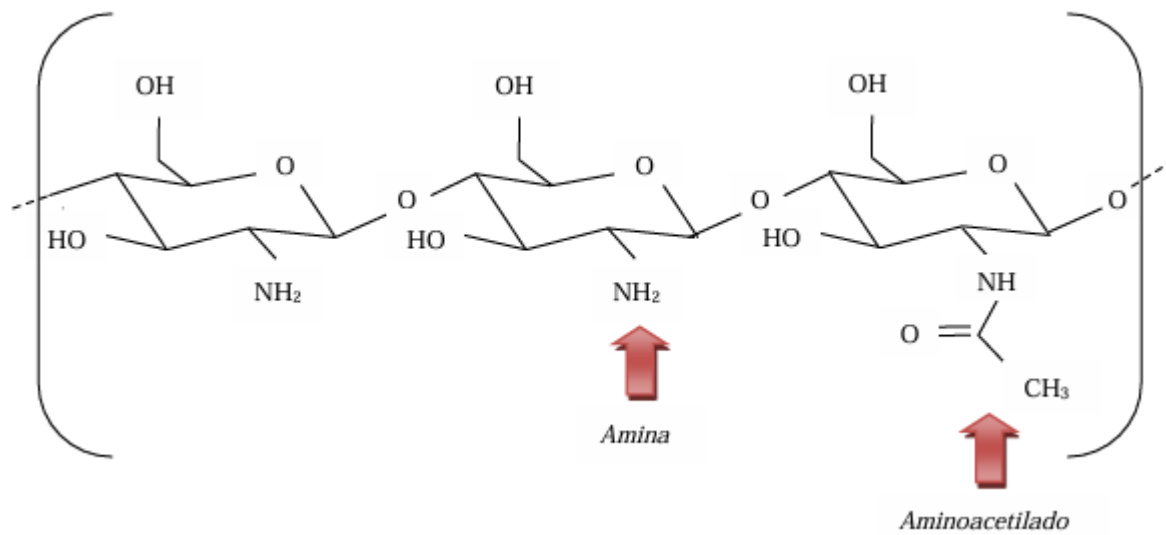


Fonte: Stopa,2007

As carapaças de crustáceos são compostas por carbonato de cálcio (CaCO_3), proteínas, lipídios e pigmentos. Para a obtenção da quitosana, realiza-se inicialmente a etapa de desmineralização, utilizando ácido clorídrico (HCl) para eliminar os carbonatos. Em seguida, ocorrem os processos de desproteinização e despigmentação. Logo em seguida é realizada a etapa de desacetilação, preparada com uma solução concentrada de 40 e 50% de hidróxido de sódio (NaOH), no qual consiste na retirada do grupo acetila, ocorrendo a liberação de grupos amino influenciando a natureza catiônica da quitosana sintetizada. Esses fatores irão influenciar a pureza da quitosana (Stopa,2007, Nakano 2016, Sobreira 2020).

Na Figura 7, é mostrada a estrutura química da quitosana após a retirada do grupo acetila e na Figura 8 como ela é na forma comercial. Observa-se que a estrutura resultante ainda apresenta grupos poliméricos parcialmente desacetilados. Com isso, entende-se que a quitosana é derivada da quitina, o polissacarídeo original, por meio de reações químicas heterogêneas, realizadas em um meio reacional não solvente e envolvendo mais de uma fase (Signini,Campana 2001).

Figura 7- Estrutura química da quitosana após reação de desacetilação da quitina



Fonte: Sobreira, 2020

Figura 8- Quitosana Comercial



Fonte: Stopa, 2007

3.4.1 Aplicações da Quitosana

A quitosana é um biopolímero atóxico, sem valor calórico, que se destaca por sua elevada capacidade de adsorção. Seu comportamento eletrônico varia conforme o pH da solução, alternando entre cargas positivas e negativas, o que influencia diretamente sua afinidade eletrostática. Em meio ácido diluído, a quitosana torna-se solúvel devido à protonação dos grupos amino livres presentes nas unidades desacetiladas, passando de NH_2 para NH_3^+ (Stopa, 2007). Essa modificação confere características especiais ao polímero, diferenciando-o das fibras vegetais. A presença dos grupos amino protonados em soluções ácidas permite a atração eletrostática por ânions, favorecendo seu uso em processos de adsorção (Stopa, 2007).

A quitosana é muito eficiente em adsorção de cátions metálicos, em pH próximo de neutro e por ânions em soluções ácidas (Stopa, 2007). Por causa dessas características naturais apresenta várias áreas de aplicação tecnológica como medicina, tratamento de águas residuárias (Hsien, 1997; Hu, 2006; Jansson, 1996; Lasko, 1999), agricultura, biotecnologia e odontologia (Rorrer, 1993; Lima, 2006). A quitosana possui propriedades que permitem a formação de fibras, filmes e membranas seletivas. Devido à sua flexibilidade e resistência à tração, é amplamente utilizada em curativos, especialmente em casos de queimaduras. Sendo um material hipoalergênico, contribui significativamente para o processo de cicatrização, acelerando a regeneração celular e promovendo a recuperação mais rápida dos tecidos danificados (Singh, 2017). Além disso, apresenta atividade antimicrobiana e pode ser empregada na separação e recuperação de microrganismos em suspensões celulares, por meio de interações eletrostáticas entre as cargas negativas das superfícies celulares e as partículas de quitosana (Hirouyuki, 1998).

A quitosana pode ser moldada em microesferas ou esferas, conhecidas como quitossomas, seja com substâncias puras ou em combinação com outros compostos. No contexto do tratamento de água, seu elevado teor de nitrogênio contribui para a capacidade de interação com metais e compostos orgânicos (Stopa, 2007). Quando apresenta caráter catiônico, devido à protonação dos grupos amino, atua como coagulante, promovendo a precipitação de partículas carregadas

negativamente, como complexos fosfolipídicos e proteínas (Shepherd,1997). Já em sua forma básica, com grupos amino não protonados, a quitosana se liga a íons metálicos tóxicos, sendo eficaz na remoção desses contaminantes em efluentes industriais (Hsien,1997; Hu,2006; Jansson, 1996). Além disso, a quitosana pode ter seu poder adsorvente melhorado. É usado partículas magnéticas como grafeno (Rheima, 2023; Salman, 2023; Fattahi, 2023) e a trietilenodiamina (Qin, 2012) para aumentar sua eletronegatividade a fim de que a torne mais eletronegativa para a captura de cátions metálicos.

No Brasil, diversos estudos com a quitosana vêm ganhando destaque devido ao seu potencial ambiental. Um dos trabalhos pioneiros, no país, foi divulgado pelo Jornal da Unicamp (2010), apresentando experimentos realizados com o biopolímero e destacando sua capacidade de adsorção de metais pesados. A pesquisa, conduzida pela doutoranda Elaine Lima, demonstrou a eficácia da quitosana na remoção de contaminantes em soluções aquosas, evidenciando sua aplicabilidade como alternativa sustentável no tratamento de efluente, como mostrado na Figura 9.

Figura 9:Aplicação da Quitosana como Adsorvente de Metais Pesados – Pesquisa da Unicamp (2010)

4 **Jornal da Unicamp**
Campinas, 13 a 19 de setembro de 2010

Quitossana é usada para despoluir água

Fibra retirada de crustáceos mostra-se capaz de extrair metais pesados de cursos poluídos

FABRÍCIO CARDINAL
Laboratório

A quitossana – uma fibra retirada de crustáceos – pode ser uma nova aliada da ciência na despoluição dos rios e afluentes despejados pela indústria. Ela se mostrou capaz de extrair metais da água, como o cobre, o zinco, o chumbo, o cádmio e o cromo, em um estudo de doutorado conduzido no Instituto de Química (IQ) pela pesquisadora Elaine Cristina Nogueira Lopes de Lima, orientada pelo docente do IQ professor Claudio Airolidi. Sua estratégia poderá contribuir para diminuir um dos maiores gargalos enfrentados pelas fábricas hoje que é a da destinação do lixo industrial, já que os metais pesados, em altas concentrações, se apresentam danosos ao meio ambiente e à saúde, não se degradando nem pela ação do tempo. Os experimentos foram elaborados por meio da técnica de adsorção.

Com essa descoberta, a autora já planeja fazer outras pesquisas em misturas com quitossana, desta vez em farmacos, com a finalidade de que os tratamentos sejam mais eficazes. Elaine Lima e Claudio Airolidi acreditam que outras novas pesquisas que vierem nesta linha serão promissoras.

A técnica de adsorção, explica Claudio Airolidi, é relativamente simples e barata e funciona como um todo, por isso ela foi a escolhida para o estudo. Nos testes, realizados no Laboratório de Termofísica de Materiais (LTM), foi selecionado um metal para simulação das mesmas condições que possivelmente ocorrem em um efluente, retirando-o completamente da água para não contaminar o meio ambiente. “A experimentação foi bem-sucedida e de grande aplicabilidade, pois serve à determinação não somente qualitativa, mas também quantitativa dos efeitos que acontecem perante o metal.”

O foco dessa investigação, afirma Elaine Lima, consiste em utilizar um recurso que modifica algumas propriedades químicas desse material a fim de submetê-lo a uma série de testes, com vistas a aumentar a adsorção dos metais e, com isso, favorecer a despoluição de rios. A ideia era melhorar a qualidade da água, principalmente nos tratamentos que devem ser feitos nos indústrias antes de serem efluente (produtos líquidos ou gasosos) serem lançados ao meio ambiente.

Existem relatos recentes que dizem de desastres ou metais como componentes deletérios à saúde que, em excesso, podem ocasionar câncer, em decorrência da exposição a eles e do seu efeito cumulativo no organismo humano, além de sua atuação no sistema nervoso central,

© professor Claudio Airolidi, do IQ, e a pesquisadora Elaine Cristina Nogueira Lopes de Lima, autora da tese de doutorado, a selar a água quitossana: experimentos foram elaborados por meio de adsorção

Imagens microscópicas da quitossana e da quitossana modificada.

um particular no caso do chumbo.

Modificação

A pesquisadora conta que adota a quitossana por ser um material muito abundante na natureza. “A proposta era aproveitar propriedades como a sua capacidade de aderir e de capturar metais e, deste modo, adaptá-la ao futuro para tratamento de efluentes mais de indústrias de modo geral”, afirma Elaine. “Portanto, esses materiais poderão ser empregados com êxito na remoção de metais pesados de efluentes, atuando como agentes na diminuição dos efeitos tóxicos causados por metais pesados e também na remoção de contaminantes.”

Na pesquisa, após a modificação química da quitossana com clorato orgânico e posterior imobilização

de aminas (base orgânica nitrogenada, derivada do amoníaco, que entra na composição dos aminoácidos), Elaine percebeu uma alteração, mas clara, relação com o favorecimento da adsorção de metais, comparada à quitossana pura, não-modificada. “Vimos que a modificação neste caso garantia uma maior adsorção e que a quitossana auxiliava a perceber a adsorção, ou seja, como ocorre a interação entre a quitossana modificada e os metais estudados, um dado valioso na literatura e que seguramente será condições de dar sustentação a novos trabalhos”, afirma Claudio Airolidi.

Segundo o orientador de trabalho ainda, a modificação química deve ser realizada nesse processo, isso porque parte de um material que é transformado para se tornar cada vez mais com potencial de uso. “Isso é

fundamental porque nos dá a ideia de que se busca não apenas materiais não-tóxicos, mas também biocompatíveis. No caso da quitossana, ela é até comestível, não representando problema algum ao organismo.”

Ele relata que esses materiais garantem grande aplicabilidade, dentro da qual o que se procura no momento é obter a quitossana para

interagir com farmacos que sejam aplicados com propriedade ao ser humano, para que haja uma liberação paulatina de seus princípios durante um dado tratamento médico. Os pesquisadores, diz, têm se dedicado a um estudo sobre formas para o uso da quitossana, cujo alvo é a liberação controlada. Este trabalho vem sendo conduzido no IQ também por Elaine Lima, que ora dá prosseguimento à descoberta de novos aditivos para o pó-de-doutorado, já com apoio da Fapesp, igualmente orientado por Claudio Airolidi.

Entre o desenvolvimento das suas pesquisas e a sua atuação para ingressar nessa carreira, a pesquisadora chegou a uma outra conquista: foi aprovada recentemente num concurso da Universidade Federal de Sergipe (UFS), sua terra. Mas de modo algum

isso deverá interferir a sua pesquisa na Unicamp, comenta Claudio Airolidi. “Ela ainda trabalhará com esse tipo de enfoque em que os outros pesquisadores temos grande interesse.” Um aspecto que se deve dar ênfase, explica ele, inclusive é que esta instituição, como centro de pesquisa, também é formadora de recursos humanos qualificados. “Isso é muito importante para que Elaine Lima volte à sua universidade de origem e que esteja muito mais apta ainda a desenvolver ali as suas pesquisas.”

Calorimetria

Um dos instrumentos utilizados na pesquisa de Elaine Lima, e que é muito utilizado no meio acadêmico brasileiro, foi o calorímetro, que há anos está sob a guarda do IQ. A calorimetria estuda as trocas de energia entre corpos ou sistemas quando estes trocam de calor. Através da calorimetria, é possível fazer a determinação quantitativa dos efeitos que acontecem por exemplo na mistura, a quitossana, com uma outra espécie, no caso o metal. Com sua ajuda é possível orientar de que maneira este material pode melhor extrair determinados metais em relação a outros.

No Laboratório de Termofísica de Materiais, Claudio Airolidi atua mais com materiais que têm como característica serem adsorventes, ou seja, que podem retirar espécies indesejadas do meio ambiente. Porém, com o passar do tempo, o seu interesse foi se direcionando para os biomateriais, que derivam de plantas, sendo os mais destacados a quitossana e a quitina.

Com a quitina, é mais difícil de se trabalhar, do ponto de vista químico, explica o professor. Logo, o direcionamento maior foi para a quitossana, visto que ela é extraída de vários pequenos animais e pode ter o mesmo direcionamento na pesquisa. Em termos de reatividade, ela é bem mais ativa do que a quitina, o que facilita a sua modificação química e, consequentemente, dá-lhe uma utilidade mais aprimorada.

Artigos

Elaine Lima, E.C.N., Elaine C.N., Airolidi, C. Citotoxicidade de quitossana modificada e sua ação na inibição da proliferação de células tumorais. *Thermochimica Acta* 485: 17-21, 2010.

Elaine Lima, E.C.N., Lopes, E.C.N., Airolidi, C. The effectiveness of the modified chitosan in the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 77: 1004-1010, 2010.

Publicações

Teste de Toxicidade: Quitossana modificada quimicamente atenua o dano oxidativo e o estresse celular em células tumorais. *Química Nova* 33(1): 101-106, 2010. Orientador: Claudio Airolidi. Coorientador: Elaine Lima. Financiamento: CNPq.

Biopolímero é abundante na natureza

A quitossana é um biopolímero. Ela é obtida a partir da quitina, outro biopolímero, hoje o segundo material mais abundante da natureza, após a celulose, e que tem como principais fontes naturais as carapaças de crustáceos como caranguejos, camarão e lagosta, sendo também

encontrada em insetos, moluscos e na parede celular de fungos. Devido à sua abundância na costa marinha brasileira, existe uma grande quantidade de crustáceos que são rejeitados. A reutilização desses rejeitos, para retirada da quitina e posterior emprego como quitossana, tem chamado a atenção

da comunidade científica há muito tempo. Ela é aplicada em uma diversidade de áreas, principalmente nas áreas farmacêutica e alimentícia. Em si, já possui propriedades que garantem um bom material, um bom adsorvente, que foi, no

presente caso, a retirada de metais, carantes, poluentes orgânicos e inorgânicos em geral. “O que de fato queremos era utilizar este material para extrair de seus propriedades, elementos difundidos na literatura, para então modificá-lo, aumentando sua capacidade e, com isso, também

obter dados calorimétricos que são muito importantes a priori com este material utilizado”, comenta Claudio Airolidi, que orienta nesta linha a pesquisadora Elaine Lima. O estudo de Elaine Lima, de seu doutorado, deu de pó-de-doutorado e um de iniciação científica.

3.4.2- Partículas magnéticas envolvidas por quitosana

O grafeno consiste em uma monocamada atômica de carbono organizada em uma estrutura hexagonal semelhante a um favo de mel. Considerado o elemento fundamental de outros alótropos de carbono, como grafite, nanotubos de carbono e fulerenos (Smaisim, 2016; Mir, 2023), o grafeno tem suas origens no grafite mineral conhecido há cinco séculos. No entanto, diferentemente do grafeno, o grafite apresenta instabilidade estrutural devido às suas camadas de carbono interligadas apenas por forças de van der Waals (Wang, 2023).

A revolução científica ocorreu em 2004, quando Andre Geim e seus colaboradores da Universidade de Manchester isolaram pela primeira vez camadas individuais de grafeno. Esse avanço abriu novas fronteiras para pesquisas em física, química, biotecnologia e ciência dos materiais. Como o material mais fino já produzido, o grafeno destaca-se por sua condutividade elétrica e térmica excepcionais, transparência óptica e baixa expansão térmica (Farahani, 2023; Abderrahmane, 2023).

Devido a essas propriedades únicas, o grafeno tem atraído grande interesse científico e tecnológico, sendo aplicado como nanoenchimento em nanocompósitos poliméricos para melhorar propriedades mecânicas, elétricas e térmicas (Chen, 2023). Perspectivas futuras incluem seu uso em dispositivos bioeletrônicos e como substituto de condutores metálicos em eletrônicos, graças à sua flexibilidade mecânica combinada com alta condutividade (Zoubi, 2023; Fattah, 2023).

Além disso, o grafeno tem sido investigado para remoção de metais pesados da água, devido à sua elevada área superficial e capacidade de funcionalização com grupos químicos específicos [183–186]. (Esfahani, 2023; Niknejadi, 2023).

3.4.3- Trietilenodiamina aplicado a quitosana

A trietilenodiamina (TEDA) é uma amina terciária cíclica com alta basicidade e elevada densidade eletrônica, frequentemente utilizada como catalisador em reações com isocianatos. No contexto deste trabalho, a TEDA foi incorporada à matriz de quitosana com o objetivo de aumentar sua basicidade e promover maior afinidade com íons metálicos. A presença de grupos amino terciários da TEDA

potencializa a capacidade de adsorção da quitosana, favorecendo interações eletrostáticas com cátions metálicos tóxicos, como cádmio e arsênio, comumente encontrados em águas superficiais contaminadas (Wu,2016) Além disso, a modificação com TEDA pode ampliar a estabilidade química e a seletividade do biossorvente, tornando-o mais eficiente para aplicações em sistemas de tratamento de efluentes (Wang,2023).

4. METODOLOGIA

4.1 Fabricação das Esferas de Quitosana

A primeira etapa metodológica consistiu na síntese das esferas de quitosana, com o objetivo de produzir um material adsorvente com forma, porosidade e estabilidade adequadas para aplicação em testes de remoção de íons metálicos em solução aquosa.

A quitosana utilizada neste estudo foi adquirida comercialmente da empresa Polymar, apresentando as seguintes características: densidade aparente de 1,805 g/L, pH de 8,4 e grau de desacetilação de 85%. A produção das esferas de quitosana foi realizada em colaboração entre o Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), campus Recife, e o CRCN-NE (Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste).

O protocolo de fabricação das esferas foi adaptado a partir de metodologias descritas por Iglesias et al. (2005), Kulkarni et al. (2007) e Nitsae et al. (2016). Foram utilizados os seguintes reagentes:

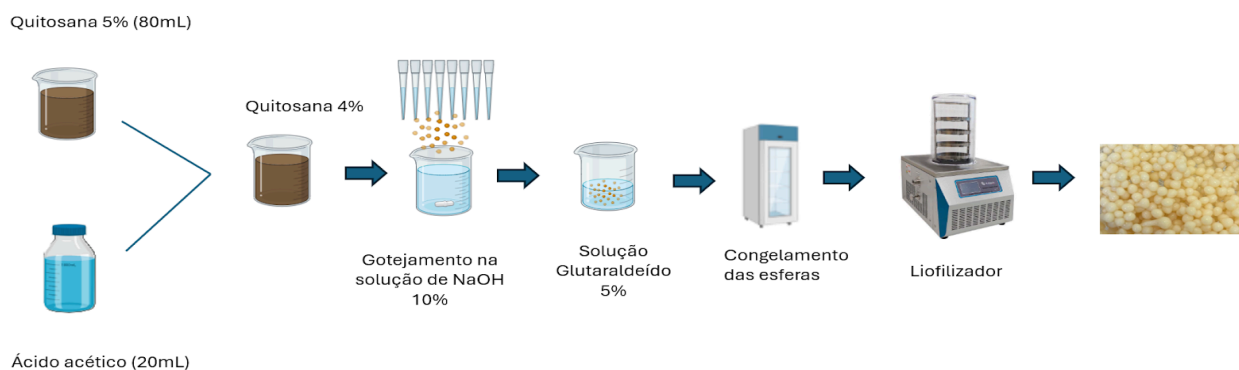
- Quitosana
- Ácido acético (CH_3COOH) grau p. a. (~99%)
- Hidróxido de sódio (NaOH)
- Glutaraldeído (25%).

A Figura 10 ilustra de maneira esquemática as etapas envolvidas na síntese das esferas de quitosana. Inicialmente, a quitosana (80 mL) foi solubilizada em ácido acético (20 mL). Em seguida adicionou-se uma solução de NaOH a 2,5%. Sob agitação em um misturador magnético. A imersão em hidróxido de sódio promoveu a coagulação da quitosana na superfície das esferas, conferindo-lhes rigidez estrutural (auto-suporte) e evitando a dissolução do polímero no meio reacional.

Na próxima etapa as esferas coaguladas foram submetidas a lavagem com água destilada para remoção de resíduos, seguida de reticulação química em solução de glutaraldeído (5%) por 24 horas. Posteriormente, realizou-se nova lavagem com água destilada em três ciclos consecutivos de 2 horas cada. Após essa etapa, as esferas foram congeladas por 24 horas e, finalmente, liofilizadas

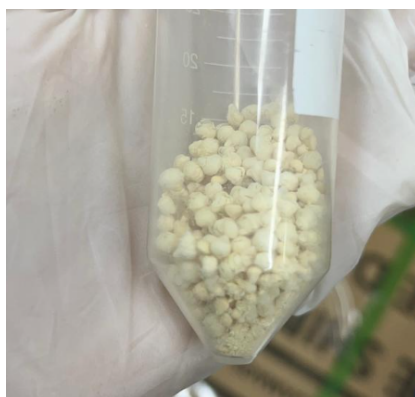
para completa secagem, como mostrado na Figura 11. Na fabricação das esferas foram realizados testes com esferas com trietilenodiamina e esferas sem trietilenodiamina.

Figura 10- Fluxograma do método de fabricação das esferas de quitosana



Fonte: a autora

Figura 11: Quitosana liofilizadas



Fonte: a autora

4.2 Caracterização morfológica por MEV

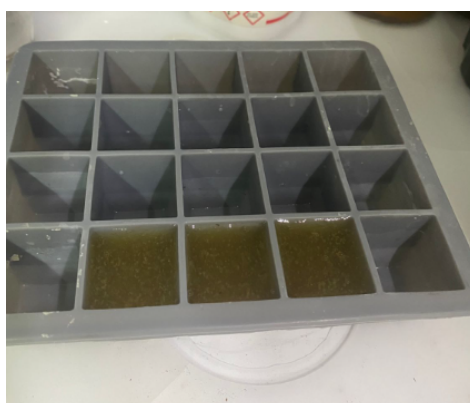
A caracterização morfológica das esferas de quitosana foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de observar a estrutura superficial do material após os processos de gelificação e reticulação. As análises foram conduzidas utilizando o equipamento MEV de bancada Phenom Pure G6, da marca Thermo Fisher Scientific. As esferas foram fixadas em suportes metálicos com fita condutiva de carbono e submetidas à metalização com ouro por

pulverização catódica (sputtering), a fim de evitar o acúmulo de carga durante a leitura. As imagens foram obtidas em diferentes ampliações, possibilitando a avaliação da forma, rugosidade e integridade das superfícies. Posteriormente, as micrografias foram analisadas por meio do software ImageJ (Rasband, 2022), permitindo a obtenção de dados quantitativos referentes às características morfológicas das esferas.

4.3 Fabricação de Quitosana em um novo formato

Com o objetivo de realizar novos testes e potencializar a capacidade adsorvente do material, a quitosana foi sintetizada em formato cúbico, conforme mostra a Figura 12, para posterior incorporação de partículas de óxido de grafeno. O processo de síntese seguiu o mesmo protocolo utilizado para a produção das esferas, conforme descrito por Iglesias et al. (2005), Kulkarni et al. (2007) e Nitsae et al. (2016). Após a síntese dos biossorventes de quitosana, eles foram submetidos à congelação por 24 horas e, em seguida, imersos por mais 24 horas em uma solução contendo glutaraldeído (10 mL), óxido de grafeno e etanol (90mL). Posteriormente, as amostras foram transferidas para uma nova solução de etanol, onde permaneceram por mais 24 horas, antes de serem submetidas ao processo de secagem, inicialmente por liofilização e, em seguida, em estufa, com mudança de formato como mostra a Figura 13, com variação de temperatura entre 150 °C, 200 °C e 300 °C, a metodologia é demonstrada na Figura 14.

Figura 12: Quitosana geleificada em formato cúbico



Fonte: A autora

Figura 13: Quitosana após secagem na estufa



Fonte: a autora

Figura14- Fluxograma das Quitosanas no formato cúbico



Fonte: A autora

4.4 Ensaios de Adsorção

Nesta seção, são apresentadas as metodologias adotadas para a preparação das amostras utilizadas nos testes de adsorção dos íons metálicos Zinco (Zn^{2+}), Cádmio (Cd^{2+}) e Arsênio (As), utilizando quitosana como bioissorvente.

4.4.1 Teste - Amostras dos Ensaios de Adsorção

Os ensaios foram realizados com base na metodologia descrita por Stopa (2007), com adaptações. As soluções dos metais foram preparadas em meio de ácido nítrico (HNO_3) a 2%, a fim de garantir a solubilidade e estabilidade dos íons em solução. Para o zinco, foram testadas três concentrações: 0,5 ppm, 1 ppm e 1,5 ppm, com volume de 50 mL para cada. Para o cádmio e o arsênio, foram preparadas soluções nas concentrações de 1 ppb, 50 ppb e 200 ppb, com volume de 20 mL cada.

Cada concentração foi preparada em amostra única, sem replicatas, caracterizando um experimento de natureza exploratória. As amostras foram transferidas para tubos Falcon estéreis e armazenadas sob refrigeração (aproximadamente 4 °C) por 24 horas, até o momento da análise.

4.5. Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS)

A quantificação preliminar do zinco foi realizada por meio de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS), com o objetivo de determinar a concentração do metal presente na amostra analisada. A análise foi conduzida utilizando o equipamento SpectrAA 220FS, da marca Varian, conforme mostrado na Figura 15, operando com chama do tipo ar-acetileno e lâmpada de cátodo oco específica para o elemento zinco.

Figura 15: Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS)



Fonte: A autora

A amostra foi introduzida por nebulização pneumática, sendo atomizada na chama sob condições otimizadas de operação, conforme especificações do fabricante. O comprimento de onda utilizado para a leitura foi de 213,9 nm, com largura de fenda de 1,0 nm, e o tempo de leitura médio foi de 5 segundos. O fluxo de gases foi ajustado para assegurar estabilidade da chama e sensibilidade adequada para a detecção do analito.

4.6. Espectrometria de Absorção Atômica com forno de Grafite (GFAAS)

As análises dos metais arsênio e cádmio serão realizadas por meio de Espectrometria de Absorção Atômica com Forno de Grafite (GFAAS), com o objetivo de obter resultados mais precisos e sensíveis, dada a expectativa de que esses elementos estejam presentes em concentrações da ordem de partes por bilhão (ppb). Essa técnica permite maior sensibilidade analítica em comparação à espectrometria com chama.

As determinações serão realizadas utilizando o equipamento SpectrAA 220Z, da marca Varian, como mostrado na Figura 16, o qual é equipado com forno de grafite e sistema de correção de background por efeito Zeeman, recurso essencial para minimizar interferências espectrais durante a atomização eletrotérmica. As amostras líquidas serão aplicadas diretamente nos tubos de grafite em volumes da ordem de

20 μL , sendo submetidas a um programa térmico composto pelas etapas de secagem, pirólise, atomização e limpeza, sob fluxo contínuo de gás argônio.

Os parâmetros operacionais, como temperatura, tempo e rampas de aquecimento, bem como o comprimento de onda e a largura de fenda, serão ajustados conforme recomendação do fabricante e especificidade de cada elemento. Os dados serão processados por meio do software de controle e aquisição SpectrAA, fornecendo resultados quantitativos com alta precisão.

Figura 16: Espectrometria de Absorção Atômica com forno de Grafite (GFAAS)



Fonte: A autora

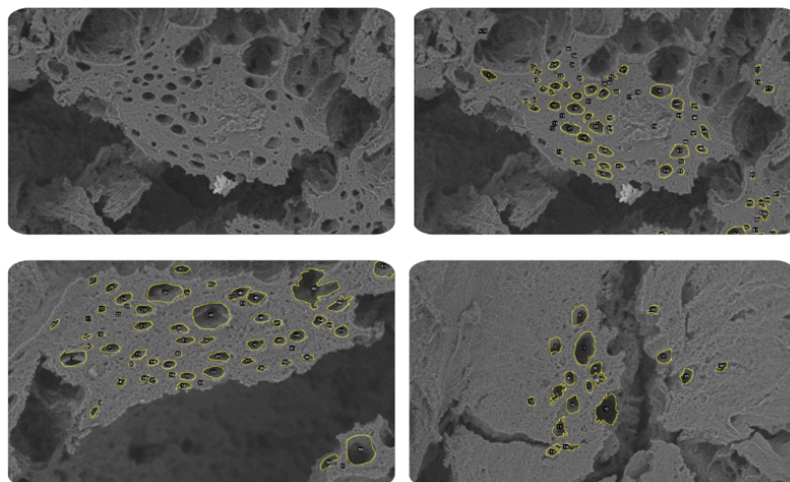
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização Morfológica

A caracterização morfológica foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), permitindo a observação da superfície das esferas de quitosana. Conforme ilustrado na Figura 16, a morfologia do material revelou uma estrutura predominantemente porosa. Embora não tenha sido identificado um padrão uniforme no tamanho dos poros, a análise realizada com o auxílio do software ImageJ indicou uma média de porosidade de 30,47 μm , com um desvio padrão de

84,12 μm , evidenciando uma variação considerável na distribuição dos poros ao longo da superfície, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17-Imagens obtidas a partir do Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte:A autora

5.2 Teste de Adsorção

Nesta seção, são apresentados os resultados adotados das amostras utilizadas nos testes de adsorção dos íons metálicos Zinco (Zn^{2+}), Cádmio (Cd^{2+}) e Arsênio (As), utilizando quitosana como bioissorvente.

5.2.1 Teste de Adsorção com Zn

A análise revelou que a técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com chama (FAAS) apresentou sensibilidade limitada para a detecção de Zinco, especialmente nas amostras com concentrações mais baixas 0,5 ppm, 1 ppm e 1,5 ppm. Essa limitação resultou na subestimação da concentração de Zinco adsorvido pelas esferas de quitosana, comprometendo a precisão na avaliação da capacidade de adsorção do material. No entanto, observou-se que, durante a passagem das soluções pelas esferas, não houve alterações visíveis ou falhas no comportamento do material, indicando que as esferas se mantiveram estruturalmente estáveis e

permitiram o fluxo adequado das soluções contendo os metais como mostrado na Figura 18.

Figura 18- Passagem da solução de Zinco nos biossorventes



Fonte: A autora

5.2.2 Teste de Adsorção com Cd e As

Em relação às soluções contendo Cádmio (Cd^{2+}) e Arsênio (As), os ensaios de adsorção não foram concluídos, uma vez que as esferas de quitosana apresentaram instabilidade ao entrarem em contato com essas soluções, dissolvendo-se durante o processo. Esse comportamento impossibilitou a continuidade dos testes e, conseqüentemente, a obtenção de dados analíticos para esses metais. A Figura 19 ilustra visualmente o fenômeno de desintegração das esferas, evidenciando a perda de integridade estrutural do material.

Figura 19- Esferas de Quitosana dissolvidas



Fonte: A autora

Diante da realização de apenas um ensaio preliminar com o metal zinco, não foi possível obter dados quantitativos conclusivos sobre a capacidade de adsorção das esferas de quitosana. A ausência do registro dos valores decimais das massas utilizadas comprometeu o cálculo preciso das concentrações, impossibilitando a avaliação da eficiência do processo de adsorção.

Apesar dessa limitação, o teste permitiu observar a estabilidade estrutural das esferas durante o contato com as soluções, o que sugere a viabilidade da matriz de quitosana como suporte adsorvente. A continuidade do trabalho contempla a análise dos metais arsênio e cádmio, que serão submetidos à técnica de espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (GFAAS), mais sensível e adequada para detecções em níveis de partes por bilhão (ppb).

Dessa forma, os resultados preliminares, embora limitados, servem como base para ajustes metodológicos e reforçam a importância de padronizações rigorosas nos próximos ensaios, de modo a garantir dados confiáveis e comparáveis para a avaliação da eficiência das esferas de quitosana na remoção de metais tóxicos.

6. CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento e caracterização dos bioissorventes à base de quitosana para aplicação na adsorção dos metais pesados Zinco (Zn), Cádmio (Cd) e Arsênio (As), foi possível obter resultados relevantes que contribuíram para a compreensão do comportamento do material frente aos diferentes testes.

A caracterização morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) evidenciou que as esferas de quitosana apresentaram superfície porosa, com média de porosidade de 30,47 μm . Essa estrutura porosa é indicativa de um bom potencial adsorvente, favorecendo interações com íons metálicos em solução.

Nos testes com Zinco, a técnica utilizada, Espectrometria de Absorção Atômica com chama (FAAS), mostrou-se pouco sensível, especialmente em concentrações mais baixas, o que comprometeu a detecção precisa do metal após o processo de adsorção. Em função disso, optou-se por realizar futuras análises com Cádmio e Arsênio utilizando Espectrometria de Absorção Atômica em forno de grafite, que apresenta maior sensibilidade e precisão, especialmente em escala de ppb.

Durante os testes de adsorção com Arsênio e Cádmio, observou-se a dissolução das esferas de quitosana, impedindo a continuidade da análise. Esse comportamento pode estar associado ao pH muito ácido da solução ou à interação desfavorável com a trietilenodiamina, indicando a necessidade de ajustes na formulação e reticulação do material.

Como alternativa, foi realizada a síntese de um bioissorvente com outro formato, incorporando óxido de grafeno à matriz polimérica da quitosana. Essa modificação teve como objetivo aumentar a resistência estrutural e melhorar a eficiência adsorvente do material, por meio de uma metodologia mais robusta e de maior controle na reticulação.

Dessa forma, o estudo demonstrou que, apesar de algumas limitações técnicas, a quitosana possui potencial significativo como bioissorvente, sobretudo quando adequadamente modificada e caracterizada.

7. PERSPECTIVAS

A partir do presente trabalho, como perspectiva de trabalhos posteriores, é possível destacar:

- O aprimoramento da formulação das esferas de quitosana, especialmente no que diz respeito à resistência estrutural em diferentes faixas de pH, com ajustes no processo de reticulação e na incorporação de aditivos que aumentem a estabilidade do material;
- A aplicação de técnicas analíticas mais sensíveis, como a espectrometria de absorção atômica em forno de grafite (GFAAS) ou espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), para quantificação mais precisa dos metais adsorvidos, especialmente em baixas concentrações;
- A continuidade dos ensaios com o bioissorvente modificado com óxido de grafeno, avaliando seu desempenho frente à adsorção de diferentes metais tóxicos;
- A realização de testes com águas reais, provenientes de corpos hídricos contaminados na Região Metropolitana do Recife, para avaliar a eficácia do bioissorvente em condições ambientais mais complexas e realistas;
- A análise cinética e isotérmica da adsorção, a fim de melhor compreender os mecanismos de interação entre os metais e a matriz de quitosana.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (**ANA**), Atlas Regiões Metropolitanas – Abastecimento humano, 2009

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (**ANA**), Atlas Regiões Metropolitanas – Abastecimento humano, 200942-Signini, Campana 2001 ÁGUAS, Instituto Mineiro de Gestão das Inicial PNQA Rede Nacional QUALIÁGUA Indicadores de Qualidade Avaliação de Qualidade Enquadramento Biblioteca de Arquivos Pesquisa Estações de Monitoramento Perguntas Frequentes Fale Conosco INDICADORES DE QUALIDADE -CONTAMINAÇÃO POR TÓXICOS. 2022. Instituto. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-contaminacao.aspx>>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (**ANA**), Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil, 2005

ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. **Green Chemistry: An Overview**. ACS Symposium Series, v. 626, p. 1–17, 5 maio 1996.

ANTUNES-VALCAREGGI, S. A.; HENSE, H.; FERREIRA, S. R. S. **Subprodutos com importância tecnológica provenientes do resíduo de crustáceos e suas aplicações**. Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial - ISSN - 1983-1838, v. 9, n. 2, p. 117–136, 12 dez. 2016.

ASSIS, E. M. DE et al. **High concentrations of toxic metals in water consumed by the Maxakali indigenous community in Brazil**. Revista Ambiente & Água, v. 14, p. e2215, 11 fev. 2019.

ATTALLAH, M. F.; MOSTAFA, M. H.; EL AFIFI, E. M.; ALY, H. F. **Removal of 226-Ra and 228-Ra from TENORM sludge waste using surfactants solutions**. *Journal of Environmental Radioactivity*, v.139, pp. 78 – 84. Amsterdã, 2015. carboxymethylchitosan in aqueous solutions. *Colloid and Polymer Science*, v. 285, p. 1535 – 1541, ago. 2007.

CLÁUDIO, L.; STOPA, B. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-29092009-134129/publico/LuizClaudioBarbosaStopa.pdf>>. Hsien, 1997; Hu, 2006; Jansson, 1996; Lasko, 1999

COONEY, D.O., 1999. **Adsorption Design for Wastewater Treatment**. Lewis

COSTA, CRISTIAN JOSÉ SIMÕES et al. **Avaliação preliminar e confirmatória da contaminação por hidrocarbonetos de petróleo das águas superficiais e subterrâneas no distrito dos mecânicos em Campina Grande-PB**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba. 2015.

DASH, N.; MODI, M. K.; PATTANAIK P.; SUBRAMANIAN, S. **Sorption of Radionuclides**. VIT University, India, v. 12, pp. 122 – 130. Bangalore, 2015

DARTE, 2007- DUARTE, Regina Horta. **História e natureza**. Belo Horizonte: Autêntica, 2007

Evaluation of Chitin and Chitosan from *Rhizopus oryzae*. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 8, n. 11, p. 116 – 122, nov. 2018.

GACHHI, D. B.; HUNGUND, B. S. Two-phase **Extraction, Characterization, and Biological**

GARCIA, PASSOS 2012- BORGES, C.; ELISANGELA, G.; PASSOS, A. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalago/13475109042012Quimica_Ambiental_Aula_9.pdf>.

GOMES, T. **Quitosana para tratamento de incrustações de petróleo após extração de Ra-226 e Ra-228**. Ufpe.br, 2021.

GONSALVES AA, Araújo CRM, Soares NA, Goulart MOF, de Abreu FC (2011) **Diferentes estratégias para a reticulação de quitosana**. Quim Nova 34:1215–1223.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000700021> DOI:10.1590/S0100-40422011000700021

GONZAGA. **View of Doenças neurológicas causadas pela contaminação de metais nas águas do Brasil**. Disponível em: <<https://ojs.latinamericanpublicacoes.com.br/ojs/index.php/ah/article/view/1406/1244>>.

HIROUYUKI, H.; KAWABE, A.; SHINKAI, M.; KOBAYASHI, T., **Development of chitosan-conjugated magnetite for magnetic cell separation**. J. Ferm. Bioen. v.86, n.2,p. 191-196, 1998.

HORITA, A. S., YAMAURA, H. T., YAMAURA, M. **Cinética do Processo de Adsorção de Íons de Th na Quitosana Magnética**. International Nuclear Atlantic Conference (INAC). Rio de Janeiro, 2009.

HSIEN, T-YANG.; RORRER, G.L. **Heterogeneous cross-linking of chitosan gel beads: kinetics, modeling and influence on cadmium ion adsorption capacity**. Ind. Eng. Chem. Res. v. 36, p. 3631-3638,1997

HSU, C.-Y. et al. **Adsorption of heavy metal ions use chitosan/graphene nanocomposites**: A review study. Results in Chemistry, v. 7, p. 101332–101332, 1 jan. 2024.

Hu, J.; Han, G.; Zhang, Q. **Impactos das Mudanças Ambientais e das Atividades Humanas nos Ecossistemas Aquáticos**. Water 2025 , 17 , 1669. <https://doi.org/10.3390/w17111669>

HU, Q.; CHEN, F.; LI, B.; SHEN, J. **Preparation of three-dimensional nanomagnetite/chitosan rod**. Mat. Lett., v. 60, p. 368,2006. IGLESIAS, R. B.; CORONILLA, R.; CONCHEIRO, A.; LORENZO, C. A. Preparation of chitosan beads by simultaneous cross-linking/insolubilisation in basic pH Rheological optimization and drug loading/release behavior. European Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 24, p. 77-84, nov. 2004, 2005.

IGNINI, R.; CAMPANA S. P. **Características e Propriedades de Quitosanas Purificadas nas Formas Neutra, Acetato e Cloridrato**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 11, n. 2, p. 58 – 64, 2001.

JANSSON-CARRIER, M.; GUIBAL, E.; ROUSSY, J.; SURJOURS, R.; CLAIREC, P.Le. **Dynamic removal of uranium by chitosan: influence of operating parameters**. Wat. Sci. Tech. v. 34, n. 10, p. 169-177, 1996.

JIMÉNEZ-GÓMEZ CP, Cecilia JA. Chitosan: **A Natural Biopolymer with a Wide and Varied Range of Applications**. *Molecules*. 2020 Sep 1;25(17):3981. doi: 10.3390/molecules25173981. PMID: 32882899; PMCID: PMC7504732.

KULKARNI 2007 (KULKARNI, V. H.; KULKARNI, P. V.; KESHAVAYYA, J. **Glutaraldehyde Crosslinked Chitosan Beads for Controlled Release of Diclofenac Sodium**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 103, n. 1, p. 211 – 217, jan. 2007.)

KULKARNI, V. H.; KULKARNI, P. V.; KESHAVAYYA, J. **Glutaraldehyde-Crosslinked Chitosan Beads for Controlled Release of Diclofenac Sodium**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 103, n. 1, p. 211 – 217, jan. 2007.

LAGO, André Aranha Corrêa do . Estocolmo, Rio, **Joanesburgo: o Brasil e as três Conferências Ambientais das Nações Unidas**. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão (Funag), 2006.

LANFREDI, G. F. Política ambiental. [s.l.] Editora **Revista DOS Tribunais**, 2002.

LASKO, C.L.; HURST, M.P. **An investigation into the use of chitosan for removal of solubles silver from industrial waste water**. *Enverion. Sci. Technol.* v. 33, p. 3622-3626, 199.

LEITÃO, Vítor Rocha; LEITÃO, Rafael Rocha. Contaminação Ambiental por Metais Pesados: Uma Revisão Sistemática de Revisões sobre Impactos Ecotoxicológicos, Riscos à Saúde Humana e Estratégias de Mitigação: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15807260>. **Journal of Convergent Scientific Inquiry** (ISSN 3085-8356), v. 1, n. 3, p. 1-12, 2025.

LIMA, S.I.; RIBEIRO, E. S.; AIROLDI, C. O emprego da quitosana quimicamente modificada com anidrido succínico na adsorção de azul de metileno. **Revista Quím. Nova**, v. 29, n.3, p. 501-506, 2006.

MACEDO, R. G. **Avaliação da carboximetilquitosana como inibidor de incrustação e corrosão em poços de petróleo**. Tese apresentada para título de doutor em Química, UFRN, 2016.

MODI, M. K.; PATTANAIK, P.; DASH, N.; SUBRAMANIAN, S. **Sorption of Radionuclides. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research**, v. 34, n. 19, p. 122 – 130, out. 2015.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Revista Química Nova**, 11 jul. 2017.

NAKANO, F. P. **Obtenção de microesferas quitosana/taninos extraídos da casca de Eucalyptus urograndis para utilização piloto na tratabilidade físico-química de água bruta com turbidez entre 100-110 NTU**. Lorena, SP: USP, 104 p., 2016.

NITSAE et al (NITSAE, M.; MADJID, A.; HAKIM, L.; SABARUDIN, A. **Preparation of Chitosan Beads Using Tripolyphosphate and Ethylene Glycol Diglycidyl Ether as Crosslinker for Cr(VI) Adsorption. Chemistry & Chemical Technology**, v. 10, n. 1, p. 105 – 113, dez. 2015, 2016.

NOMURA, S.; FUTATSUKA, M. **Minamata Disease from the Viewpoint of Occupational Health. Journal of Occupational Health**, v. 40, n. 1, p. 1–8, jan. 1998.

NRIAGU, Jerome O. **Global metal pollution: poisoning the biosphere?**. Environment: science and policy for sustainable development, v. 32, n. 7, p. 7-33, 1990.

OMS e UNICEF -WHO/UNICEF estimates of national immunization coverage iWorld Health Organization <https://www.who.int/teams/global-monitoring>

PAMPHLETT, Roger; BISHOP, David P. **The toxic metal hypothesis for neurological disorders**, 2023; Disponível em: file:///C:/Users/Pessoal/Downloads/fneur-14-1173779%20(1).pdf. Acesso em set. 2023

PAMPHLETT, Roger; BISHOP, David P. **The toxic metal hypothesis for neurological disorders**, 2023. Disponível em: file:///C:/Users/Pessoal/Downloads/fneur-14-1173779%20(1).pdf. Acesso em set. 2023

PASSOS, P. N. C. DE. A CONFERÊNCIA DE ESTOCOLMO COMO PONTO DE PARTIDA PARA A PROTEÇÃO INTERNACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Revista Direitos Fundamentais & Democracia**, v. 6, 17 dez. 2009.

POURRET, O.; Bollinger, J.-C.; Van Hullebusch, E.D. **On the difficulties of being rigorous in environmental geochemistry studies: Some recommendations for designing an impactful paper.** Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. [Google Scholar] [CrossRef]

POURRET, O.; Bollinger, J.-C.; Van Hullebusch, E.D. **On the difficulties of being rigorous in environmental geochemistry studies: Some recommendations for designing an impactful paper.** Environ. Sci. Pollut. Res. 2019.

POURRET, O.; Bollinger, J.-C.; Van Hullebusch, E.D. **On the difficulties of being rigorous in environmental geochemistry studies: Some recommendations for designing an impactful paper.** Environ. Sci. Pollut. Res. 2019.

QIN, Y. et al. **Synthesis and characterization of dithiocarbamate chitosan derivatives with enhanced antifungal activity.** Carbohydrate Polymers, v. 89, n. 2, p. 388–393, 14 mar. 2012.

RODRIGUES, S. C. M. et al. **Os Recursos Naturais no Processo de Desenvolvimento Econômico Capitalista.** Semioses, v. 13, n. 4, p. 50–68, 17 dez. 2019.

RORRER, G.L.; T-YANG.; WAY J.D. Synthesis of porous-magnetic chitosan beads for removal of cadmium ions from waste water. Ind. **Eng. Chem. Resv.** v. 32, p. 2170-2178, 1993.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption process.** New York: John

SALEH, T. A.; MUSTAQEEM, M.; KHALED, M. **Developing water treatment technologies in removing heavy metals from wastewater: A review.** *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, v. 17, p. 100617, dez. 2021.

SANKHLA, Mahipal Singh et al. Contaminação da água por metais pesados e seus efeitos nocivos à saúde humana – uma revisão. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci* , v. 5, n. 10, p. 759-766, 2016.

SCHAMA, 1996 -Schama, Simon. Paisagem e memória. São Paulo: **Companhia das Letras, 1996.**

SCHMITZ, 2017 - **Vista do Crescimento econômico e pressão sobre recursos hídricos.** Disponível em:<<https://revistas.usp.br/ee/article/view/102062/129364>>. Acesso em: 4 jul. 2025.

SHEPHERD, R.; READER, S.; FALSAW, A. **Chitosan functional properties.** *Glyconjugate J.*, v 14, p. 535-542, 1997.

SILVA, H.K.P et al. **Um breve estudo sobre qualidade de águas subterrâneas no Brasil, 2006 View of Doenças neurológicas causadas pela contaminação de metais nas águas do Brasil.** Disponível em: <<https://ojs.latinamericanpublicacoes.com.br/ojs/index.php/ah/article/view/1406/1244>>. Acesso em: 3 jul. 2025.

SILVA, H.K.P et al. **Um breve estudo sobre qualidade de águas subterrâneas no Brasil, 2006**

SILVA, NIVALDO VIEIRA DA. **A importância do estudo dos metais pesados na educação ambiental e suas interações como meio ambiente.** Recife: UFRPE, 2005. Originalmente apresentada como monografia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2005

SINGH R, SHITIZ K, SINGH A.**Chitin and chitosan: biopolymers for wound management.** *Int Wound J.* 2017 Dec;14(6):1276-1289. doi: 10.1111/iwj.12797. Epub 2017 Aug 10. PMID: 28799228; PMCID: PMC7949833.

STOPA, 2007; (STOPA, L. C. **Quitosana Magnética para Remoção de Urânio (VI)**. Dissertação para título de mestre em Tecnologia Nuclear – Materiais, IPEN, 2007.). São Paulo: IPEN, USP, 2007, 85 p.

TÂMIREZ, C. et al. **Concentrations of metals in water, sediments and aquatic macrophytes in a river located in a region with a hot semi-arid climate**. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 36, 1 jan. 2024.

TUNDISI, J.G. (2005) **Água no século XXI: Enfrentando a Escassez**. 2 ed. São Paulo-SP. Rima Editora. 251pVigilância da Qualidade da água para consumo Humano (Sisagua)

WANG, X. et al. Large-Scale Synthesis of Few-Layered Graphene using CVD. **Chemical Vapor Deposition**, v. 15, n. 1-3, p. 53–56, mar. 2009.

WANG, Y. et al. **Large area, continuous, few-layered graphene as anodes in organic photovoltaic devices**. v. 95, n. 6, p. 063302–063302, 10 ago. 2009.

WHO/UNICEF estimates of national immunization coverage iWorld Health Organization <https://www.who.int/teams/global-monitoring>

WILEY & SONS, 1984WILLIS, A. J. **The Ecosystem: An Evolving Concept Viewed Historically**. Functional Ecology, v. 11, n. 2, p. 268–271, 1997.

YABE, M. J. S.; OLIVEIRA, E. DE. Metais pesados em águas superficiais como estratégia de caracterização de bacias hidrográficas. **Revista Química Nova**, v. 21, n. 5, p. 551–556, out. 1998

ZHU, A.; YUAN, L.; LU, Y. **Synthesis and aggregation behavior of N-succinyl-o-carboxymethylchitosan in aqueous solutions**. Colloid and Polymer Science, v. 285, p. 1535 – 1541, ago. 2007.