

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Engenharias
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais Mestrado em Ciências Ambientais

Dissertação de Mestrado



**ADSORVENTE BASEADO EM BIOMASSA DE CAMARÃO PARA A REMOÇÃO DE
CORANTES SINTÉTICOS DE SOLUÇÕES AQUOSAS**

Adrize Medran Rangel

Orientador: Prof. Dr. Fernando Machado Machado
Coorientador: Prof. Dr. Pascal Silas Thue

Pelotas, março de 2025.

Adrize Medran Rangel

**Adsorvente Baseado em Biomassa de Camarão para a Remoção de Corantes
Sintéticos de Soluções Aquosas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Machado Machado

Coorientador: Prof. Dr. Pascal Silas Thue

Pelotas, março de 2025.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

R196a Rangel, Adrize Medran

Adsorvente baseado em biomassa de camarão para a remoção de corantes sintéticos de soluções aquosas [recurso eletrônico] / Adrize Medran Rangel ; Fernando Machado Machado, orientador ; Pascal Silas Thue, coorientador. — Pelotas, 2025.
95 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Adsorção. 2. Biomassa. 3. Camarão. 4. Corantes azo. 5. Modelos não lineares. I. Machado, Fernando Machado, orient. II. Thue, Pascal Silas, coorient. III. Título.

CDD 363.7

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

Adrize Medran Rangel

Adsorvente baseado em biomassa de camarão para a remoção de corantes sintéticos de soluções aquosas

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais , Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 31/03/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fernando Machado Machado
(Orientador)

Doutor em Engenharia com ênfase em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Pascal Silas Thue (Coorientador)
Doutor em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dra. Rubia Flores Romani
Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Ana Carolina Ferreira Piazzzi Fuhr
Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Maria

Profa. Dra. Alice Gonçalves Osório (Suplente)
Doutora em Engenharia com ênfase em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

“O essencial é invisível aos olhos, e só se vê bem com o coração.”

O Pequeno Príncipe

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre me guiar pelos melhores caminhos e me conceder forças para jamais desistir dos meus sonhos. Sou imensamente grata à minha família, que é a minha base; sem o apoio deles, eu não teria chegado até aqui. À minha mãe, um ser humano único, uma mulher forte, batalhadora, professora dedicada e amorosa. À minha irmã, meu exemplo de vida, que sempre me orientou a crescer tanto profissionalmente quanto como ser humano. Ela lutou incansavelmente para chegar aonde está e, com seu exemplo, sempre me incentivou a seguir seus passos. Espero um dia ser, ao menos, metade da mulher que ela é e tudo o que representa.

Ao meu marido, que sempre esteve ao meu lado, incentivando-me e me apoiando em cada conquista e desafio. Ao meu sobrinho, que é o sol que ilumina nossa família, e ao meu cunhado, que completa esse círculo com amor e alegria.

Agradeço ao meu orientador, Fernando, que, desde o início, embarcou nessa jornada comigo, me incentivando a não desistir e me ajudando de todas as formas possíveis. Ele é um grande exemplo de professor/orientador. Ao meu coorientador, Pascal, que aceitou entrar nesse desafio com uma disposição contagiante, sempre pronto para ajudar. Às minhas colegas de aula, com quem compartilhei experiências e formamos um grupo sólido e colaborativo. Não poderia deixar de agradecer também a minha colega de laboratório, Júlia, pelo apoio incansável durante toda parte experimental da pesquisa, minha imensa gratidão.

Agradeço também à UFPel e ao PPGCAmb pela oportunidade de me aperfeiçoar e pelas inúmeras portas profissionais que se abriram para mim.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

Lista de Figuras

Figura 1	Corantes e suas possíveis aplicações industriais.	21
Figura 2	Estrutura química do corante Verde Reativo 19	23
Figura 3	Estrutura química do corante Vermelho Ácido 114.	24
Figura 4	Biocarvão poroso hierárquico da casca de camarão.	28
Figura 5	Mapa de localização da Colônia de Pescadores (Z3) da cidade de Pelotas.	34
Figura 6	Casca de camarão separada para análise laboratorial.	35
Figura 7	Fluxograma da metodologia escolhida neste estudo	36
Figura 8	Preparação do adsorvente CC <i>in natura</i> .	37
Figura 9	Fluxogramada da preparação do adsorvente CC <i>in natura</i> ilustrado	37
Figura 10	Micrografias obtidas via MEV do material <i>in natura</i> .	43
Figura 11	Análise química elementar da CC <i>in natura</i> . Obs.: A área em laranja foi considerada para análise.	44
Figura 12	FTIR casca de camarão <i>in natura</i> .	45
Figura 13	Difração de raio X da casca de camarão <i>in natura</i> .	46
Figura 14	Curva de Adsorção e Dessorção Obtida pelo Método BJH.	48
Figura 15	Influência da acidez do meio sobre o CC <i>in natura</i> .	51

Figura 16	Cinética de adsorção do corante (a) VR-19 e (b) AR-114 em CC	54
Figura 17	Isotermas de adsorção do corante (a) VR - 19 e (b) AR – 114 sobre o CC	58
Figura 18:	Eficiência de remoção dos corantes VR-19 e AR-114 ao longo do tempo de contato com o adsorvente de casca de camarão.	59

Lista de Tabelas

Tabela 1	Percentual dos elementos químicos presentes na amostra de CC.	45
Tabela 2	Área superficial e porosidade da CC obtidos através de BET e BJH.	47
Tabela 3	Comparação do adsovente CC <i>in natura</i> com os demais apresentados na literatura.	49
Tabela 4	Parâmetros da Cinética de adsorção dos corantes VR - 19 e AR – 114 em CC.	52
Tabela 5	Parâmetros isotérmicos de adsorção dos corantes sintéticos VR – 19 e AR - 114 sobre o adsorvente CC.	56

Sumário

1. Introdução	14
2. Objetivos	18
2.1 Objetivos Gerais	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. Hipóteses	19
4. Referencial Teórico	20
4.1 Corantes e o meio ambiente	20
4.1.1 Corante sintético Verde Reativo 19 (VR 19)	22
4.1.2 Corante sintético Vermelho Ácido 114	23
4.2 Tratamento de efluentes contaminados com corantes	24
4.3 Técnicas de adsorção	25
4.4 Casca do camarão como biomassa para produção de materiais adsorventes	27
4.5 Estudo de adsorção	29
4.5.1 Isotermas de adsorção	29
4.5.2 Cinética de adsorção	31
5. Material e Métodos	34
5.1 Materiais	34
5.2 Métodos	36
5.2.1 Preparo do adsorvente a base de casca de camarão	37
5.2.2 Caracterização do adsorvente a base de biomassa de camarão	39
5.2.3 Estudos de adsorção	40
6. Resultados e Discussões	43
6.1 Caracterizações do adsorvente de casca de camarão	43
6.2 Ponto de carga zero e estudo do pH	50
6.3 Estudo Cinético	51
6.4 Estudo Isotérmico	56
6.5 Mecanismo de adsorção e comparação de eficiência	60
7. Conclusões	61
8. Sugestões de trabalhos futuros	63
9. Produção Científica	64

9.1 Artigos completos publicados em periódicos	64
9.2 Capítulos de livros publicados	65
10. Referências Bibliográficas	67

RESUMO

A utilização de materiais adsorventes preparados a partir da biomassa da casca de camarão para a remoção de corantes em soluções aquosas representa uma abordagem promissora no campo da remediação ambiental. A casca de camarão, uma fonte abundante e sustentável de biomassa, se destaca na produção de materiais adsorventes de baixo custo e alta eficiência. O processo de remoção de contaminantes, como os corantes, utilizando materiais adsorventes, envolve a transferência das substâncias presentes na solução aquosa para os sítios ativos do material. Esses materiais, com estruturas porosas — apresentando área superficial de $2,32 \text{ m}^2/\text{g}$, volume de poros de $0,0105 \text{ cm}^3/\text{g}$ e tamanho médio de poros de $16,98 \text{ nm}$ — têm a capacidade de reter compostos indesejados através de interações físicas e/ou químicas. A presente dissertação de mestrado tem como objetivo a produção de um material adsorvente a partir da biomassa da casca de camarão do tipo *Farfantepenaeus paulensis*. Para isso, adotou-se uma metodologia que utiliza o material in natura, o qual foi seco, lavado e triturado. Após a preparação do material adsorvente, ele foi caracterizado por meio de técnicas físicas, químicas e morfológicas. Em seguida, foi aplicado na remoção de dois corantes sintéticos, o Verde Reativo 19 (VR-19) e o Acid Red 114 (AR-114), presentes em soluções aquosas. Os testes foram conduzidos em soluções com concentrações variando entre 10 e 400 mg/L, demonstrando eficiência de remoção de aproximadamente 95% para ambos os corantes, alcançada em 328 minutos para o VR-19 e 389 minutos para o AR-114, sob pH 2,0. Os resultados experimentais de adsorção foram ajustados aos modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich e Liu, fornecendo uma compreensão detalhada da capacidade de adsorção do material. Para os testes cinéticos de adsorção, foram utilizados os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e de ordem fracionária de Avrami, que permitiram identificar o mecanismo de adsorção mais adequado. O modelo não linear de pseudo-segunda ordem foi o mais adequado para descrever a cinética de adsorção de VR-19 em CC. Para o corante AR-114, o modelo de ordem fracionária de Avrami apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. Nos estudos isotérmicos, os modelos de Freundlich e Liu foram os mais adequados para descrever a adsorção do corante VR-19. Já para o corante AR-114, o modelo de Freundlich apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. Com base nos estudos de adsorção e nas características dos corantes e do adsorvente, foi possível propor um mecanismo de adsorção. Esse mecanismo considera a atração eletrostática entre os grupos sulfônicos ($-\text{SO}_3^-$) e azo ($-\text{N}=\text{N}-$) dos corantes VR-19 e AR-114, carregados negativamente, e a superfície do CC, carregada positivamente em pH 2,0. Este trabalho apresenta uma abordagem inovadora ao utilizar casca de camarão in natura, sem modificação química, como adsorvente para remoção de corantes sintéticos, aliado à valorização de resíduos pesqueiros locais e à adoção de metodologias de análise rigorosas. O desenvolvimento deste projeto resultou em um adsorvente com propriedades texturais adequadas para a remoção de corantes sintéticos a partir de uma biomassa pouco explorada. Além disso, o estudo contribui para a redução de impactos ambientais ao promover a reutilização de resíduos da indústria pesqueira, valorizando essa biomassa e oferecendo uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes industriais.

Palavras-Chave: Adsorção, biomassa, camarão, corantes azo, modelos não lineares.

ABSTRACT

The use of adsorbent materials prepared from shrimp shell biomass for the removal of dyes from aqueous solutions represents a promising approach in the field of environmental remediation. Shrimp shell, an abundant and sustainable source of biomass, stands out in the production of low-cost and highly efficient adsorbent materials. The contaminant removal process, such as dye removal using adsorbent materials, involves the transfer of substances present in the aqueous solution to the active sites of the material. These materials, with porous structures — exhibiting a surface area of $2.32 \text{ m}^2/\text{g}$, a pore volume of $0.0105 \text{ cm}^3/\text{g}$, and an average pore size of 16.98 nm — have the capacity to retain unwanted compounds through physical and/or chemical interactions. This master's dissertation aims to produce an adsorbent material from the biomass of the shrimp species *Farfantepenaeus paulensis*. For this, a methodology was adopted using the raw material, which was dried, washed, and crushed. After preparing the adsorbent material, it was characterized through physical, chemical, and morphological techniques. It was then applied to the removal of two synthetic dyes, Reactive Green 19 (VR-19) and Acid Red 114 (AR-114), from aqueous solutions. The tests were conducted in solutions with concentrations ranging from 10 to 400 mg/L, demonstrating a removal efficiency of approximately 95% for both dyes, achieved within 328 minutes for VR-19 and 389 minutes for AR-114, at pH 2.0. The experimental adsorption results were fitted to the Langmuir, Freundlich, and Liu isotherm models, providing a detailed understanding of the material's adsorption capacity. For the adsorption kinetic studies, pseudo-first order, pseudo-second order, and Avrami fractional order models were applied, allowing the identification of the most suitable adsorption mechanisms. The non-linear pseudo-second order model best described the adsorption kinetics of VR-19, while for AR-114, the Avrami fractional order model presented the best fit to the experimental data. In the isothermal studies, the Freundlich and Liu models were most appropriate for describing the adsorption of VR-19, while the Freundlich model best fit the AR-114 adsorption data. Based on the adsorption studies and the characteristics of the dyes and the adsorbent, an adsorption mechanism was proposed, considering electrostatic attraction between the sulfonate ($-\text{SO}_3^-$) and azo ($-\text{N}=\text{N}-$) groups of the negatively charged dyes and the positively charged surface of the adsorbent at pH 2.0. This study presents an innovative approach by using *in natura* shrimp shell, without chemical modification, as an adsorbent for synthetic dye removal, combined with the valorization of local fishery waste and the application of rigorous analytical methodologies. The development of this project resulted in an adsorbent with suitable textural properties for the removal of synthetic dyes from an underutilized biomass. Furthermore, the study contributes to reducing environmental impacts by promoting the reuse of fishery industry residues, adding value to this biomass and offering a sustainable alternative for the treatment of industrial effluents.

Keywords: Adsorption, biomass, shrimp, azo dyes, nonlinear model

1. INTRODUÇÃO

Segundo relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 844 milhões de pessoas no mundo não têm acesso à água potável (Global Commission on Adaptation, 2019). Devido a recursos econômicos ou infraestrutura limitados, milhões de pessoas morrem a cada ano de doenças causadas por água insuficiente e de má qualidade (Mohapi et al., 2020). Portanto, a ausência ou inadequação dos sistemas de tratamento leva ao acúmulo de produtos químicos tóxicos não biodegradáveis no ciclo da água (Benjelloun et al., 2022). Ainda, de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2017; 2021), cerca de 380 bilhões de m³ de esgoto são gerados no mundo, sendo que mais de 80% desse volume (aproximadamente 20% do volume de água que corre nos rios por todo o mundo) não recebe nenhum tipo de tratamento (ONU, 2021b). O lançamento de esgotos domésticos e industriais *in natura*, assim como a baixa eficiência do tratamento adotado, quando presente, impacta diretamente a qualidade da água disponível para abastecimento. Um retrato disso é o fato de aproximadamente 90% dos mananciais utilizados no abastecimento de água nas cidades estarem contaminados (Geissen et al., 2015). Isto é preocupante, uma vez que a demanda por água aumenta a cada ano devido a fatores como mudanças climáticas, superpopulação, industrialização, padrões de consumo insustentáveis e degradação ambiental (ONU, 2018b; Ougougdal et al., 2020).

A crescente quantidade de efluentes contaminados com corantes orgânicos tais como o Verde Reativo 19 (VR-19) e o Vermelho Ácido 114 (do inglês *Acid Red* 114, AR-114), tem causado grandes desafios em todo o mundo no que diz respeito ao tratamento de águas residuais. Particularmente, com o desenvolvimento da indústria, muitos corantes orgânicos têm sido descartados de forma incorreta em corpos hídricos, causando profundo impacto no meio ambiente e nos sistemas vivos (Zhao et al., 2023). As moléculas de corantes orgânicos geralmente contêm um ou mais anéis benzênicos, que são difíceis de degradar por métodos químicos e biológicos convencionais (Nachiyar et al., 2023). Estima-se que o volume de produção

de corantes orgânicos sintéticos comercialmente disponíveis seja superior a 1.000.000 toneladas e que a quantidade de efluentes coloridos gerados anualmente durante o processo de fabricação e aplicação seja superior a 200 bilhões de litros (Tkaczyk; Mitrowska; Posyniak, 2020).

Sabe-se que muitos corantes da indústria têxtil têm efeitos adversos (Aquino et al., 2014). Essas substâncias são capazes de causar danos às espécies vegetais e aquáticas (Hassan; Carr, 2018) e resultam na coloração da massa de água e do ambiente conectado (Sarkar et al., 2021). Além disso, os corantes podem causar alergias, dermatites, irritação da pele e também provocar câncer e mutações nos seres humanos (Alqarni, 2022).

Dentre as diversas técnicas de tratamento de efluentes contaminados com corantes, podemos citar a degradação fotocatalítica, adsorção, filtração por membrana, troca iônica e coagulação (Han et al., 2019). A adsorção é considerada uma das técnicas mais promissoras devido ao baixo custo, fácil escalonamento, boa eficiência e rápida recuperação do corante (Almoisheer et al., 2019).

Para um processo de adsorção eficiente, a escolha do adsorvente é primordial (Machado; Bergmann, 2015). O carvão ativado (CA) é reconhecido como um adsorvente superior devido à sua alta porosidade e área de superfície, sendo amplamente aplicado no tratamento de efluentes industriais (Wu et al., 2021). Devido ao alto custo das matérias-primas, a aplicação em larga escala do carvão ativado no tratamento e purificação de águas pode ser cara.

Recentemente, biomassas e resíduos orgânicos, como aqueles advindos de indústrias de alimentos (Rodrigues et al., 2020) e agroindústrias (Nascimento et al., 2023), são considerados alternativas interessantes para a produção de biocarvões mais baratos (Lakshmikandan et al., 2011; Mondal et al., 2017). No entanto, apesar da promessa dos biocarvões reduzirem os custos dos processos de tratamento de efluentes através do método de adsorção, materiais economicamente mais baratos são desejados.

Nessa esteira, a casca de camarão (CC) surge como uma interessante biomassa para produção de adsorvente (Li; Wu; Xue, 2022; Yu et al 2020). Com base na demanda de consumo, grandes quantidades de resíduos de marisco são geradas pela carcinicultura e indústrias de processamento (FAO, 2020), que deve ser valorizado para agregar valor aos produtos para evitar a poluição ambiental. Cerca

de 45 a 48% do camarão é descartado como resíduo, o que inclui a casca (carapaça do corpo) e a cabeça (Su et al., 2023).

Alguns dos resíduos de camarão produzidos são usados localmente como alimento na aquicultura ou na alimentação de animais, mas a maioria é descartada a céu aberto em aterros sanitários ou em mar aberto (Zhou et al., 2021). A casca de camarão gerada pelas indústrias de frutos do mar contém proteína de quitina e seus derivados, como a quitosana, têm uma série de atividades biológicas (por exemplo, efeitos anticancerígenos, antioxidantes e de melhoria do sistema imunológico) e podem ser usados em vários campos (por exemplo, médico, cosmético, alimentar e têxtil) (Hamed; Özogul; Regenstein, 2016).

Os estados do Ceará e do Rio Grande do Norte participam com 70% da produção brasileira de camarão (IBGE, 2022). Em relação ao cultivo, existem 1,3 mil fazendas de produção, totalizando 70 mil toneladas métricas e um valor de produção de R\$700 milhões (ABCC, 2016). Na região Sul, o estado que mais se destaca é Santa Catarina com uma produção de 276 t, seguido do estado do Rio Grande do Sul com produção de 104 t. O estado de Santa Catarina foi o 8º em que mais se pescou camarão, e 1º na região Sul. O total capturado na região Sul foi 301,5 mil t (IBGE, 2014).

Considerando o elevado volume de cascas de camarão geradas anualmente, a preparação de um material adsorvente utilizando essa biomassa como matéria-prima surge como uma alternativa atraente. Tal afirmação é justificada, uma vez que as CCs são frequentemente descartadas de maneira inadequada após o processamento do marisco. Se convertidas em um adsorvente, esses resíduos podem ser utilizados como um recurso valioso, renovável e sustentável. Ainda, a produção de adsorvente a partir de resíduos de camarão também reduz a pegada de carbono do processamento de frutos do mar. Isso o torna uma alternativa mais sustentável para outros métodos de gerenciamento de resíduos (Pinto et al., 2018; Rodde et al., 2008).

Destaca-se também que o uso dessa biomassa como matéria-prima para a produção de materiais sustentáveis pode beneficiar as economias locais e estimular a Economia Circular, criar empregos e aumentar a resiliência das comunidades costeiras.

Diante desse contexto, essa dissertação de mestrado teve como foco a produção de um adsorvente a partir da biomassa de camarão (*Farfantepenaeus*

paulensis) e sua aplicação na remoção de corantes sintéticos (Verde Reativo 19 e Vermelho Ácido 114) presentes em soluções aquosas. Destaca-se que, apesar do melhor esforço, não foram encontrados na literatura estudos que abordem a utilização da casca de camarão conforme aqui proposta para a produção de adsorventes, bem como sua utilização na remoção de corantes sintéticos de efluentes aquosos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto de dissertação de mestrado é avaliar o potencial da biomassa de camarão para a produção de materiais adsorventes, bem como sua aplicação na remoção de corantes sintéticos presentes em soluções aquosas.

2.2 Objetivos específicos:

- I- Desenvolver um adsorvente ambientalmente amigável à base de biomassa de camarão, com potencial para a produção de material com alta capacidade adsorvente
- II- Avaliar a capacidade de remoção do adsorvente preparado quando exposto a soluções aquosas contaminadas com corantes sintéticos.
- III- Propor um mecanismo de interação entre adsorvato e adsorvente com base nos estudos de adsorção, técnicas de caracterização e nas características das espécies envolvidas.

3. HIPÓTESES

a) É plausível preparar um adsorvente utilizando casca de camarão, de forma ambientalmente amigável.

b) É possível remover corantes sintéticos com o auxílio de materiais adsorventes preparado a partir de biomassa de camarão;

c) É possível estabelecer, através das características das espécies envolvidas, uma relação de interação entre adsorvente – adsorvato.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Corantes e o meio ambiente

O uso excessivo de corantes por empresas e indivíduos frequentemente leva à liberação descontrolada e prejudicial de efluentes contaminados com corantes em corpos d'água, representando práticas ambientais inadequadas. O nível/concentração de descarga anula a capacidade natural de autolimpeza desses corpos d'água, levando ao aumento da toxicidade, redução das atividades fotossintéticas e remoção significativa da demanda química de oxigênio (DQO) (Rápó; Tonk, 2021). Portanto, os corantes sintéticos se não forem completamente degradados – removidos do meio ambiente podem resultar na formação de produtos perigosos (Ghanbari; Moradi, 2017).

A presença de corantes nos corpos d'água pode trazer danos devastadores à vida aquosa por impedir a demanda química de oxigênio e os processos de fotossíntese. Essas substâncias podem ser tóxicas e carcinogênicas (Alqarni, 2022). Além disso, muitos corantes são difíceis de hidrolisar porque são resistentes à luz, agentes oxidantes e digestão aeróbia, o que pode levar ao acúmulo dessas substâncias químicas no meio (Abdel-Fadeel et al., 2022).

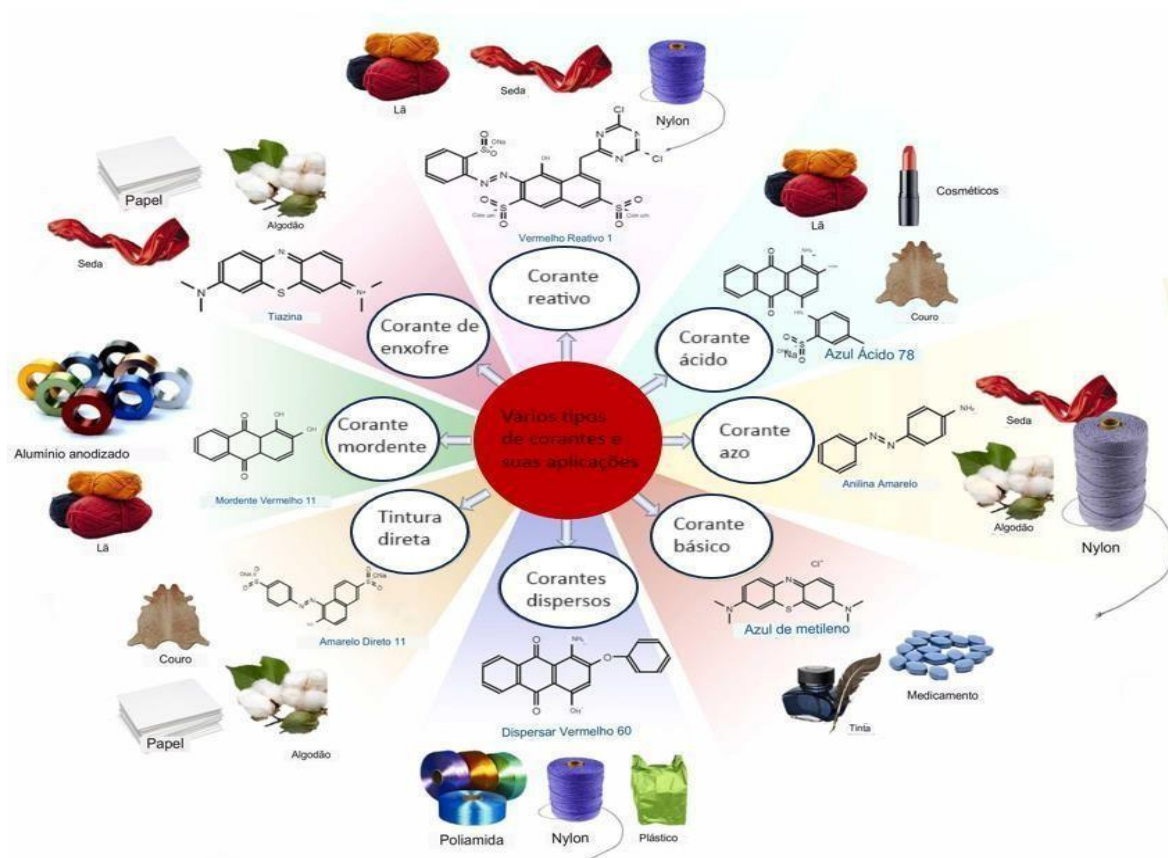
Os corantes têxteis também atuam como agentes tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos (Khatri et al., 2018), persistem como poluentes ambientais e atravessam cadeias alimentares inteiras proporcionando biomagnificação, de modo que organismos em níveis tróficos mais elevados apresentam níveis mais elevados de contaminação em comparação com suas presas (Artifon et al., 2021).

A literatura destaca que águas residuais têxteis contêm uma ampla gama de corantes tóxicos, metais pesados, como mercúrio, cromo, cádmio, chumbo e arsênio, que são necessários na produção de pigmentos de cor de corante têxtil, bem como compostos aromáticos (Varjani; Upasani, 2017). A presença de metais pesados como mercúrio, cromo, cádmio, chumbo e arsênio é necessária na produção de pigmentos corantes têxteis, o que justifica a presença desses nesse tipo de efluente (Singha et al., 2021).

Quando dispersos em meios aquosos, esses produtos químicos são transportados por extensas distâncias, juntamente com as águas residuais, permanecendo na água e no solo por longos períodos. Tal fenômeno apresenta sérios

riscos à saúde dos organismos vivos, além de reduzir significativamente a fertilidade do solo (Nachiyar et al., 2023). Adicionalmente, afeta adversamente a atividade fotossintética das plantas aquáticas, resultando no desenvolvimento de condições anóxicas prejudiciais à fauna e flora aquáticas (Dutta; Bhattacharjee, 2022). Além disso, corantes quando ingeridos por peixes e outros organismos vivos podem ser metabolizados em seus corpos em intermediários tóxicos, o que pode levar a um impacto negativo na saúde tanto dos peixes quanto de seus predadores (Elgarahy et al., 2021). Humanos e outros mamíferos podem ser expostos a corantes sintéticos em águas residuais industriais através de ingestão oral ou contato direto com a pele (Yaashikaa et al., 2021). A microbiota intestinal no intestino humano converte corantes em aminoácidos tóxicos, o que afeta negativamente vários tecidos humanos (Elgarahy et al., 2021). A Figura 1 mostra os vários tipos de corantes e sua ampla gama de aplicações.

Figura 1: Corantes e suas possíveis aplicações industriais.



Fonte: Al-Tohamy et al., (2022), modificado.

Os corantes alimentares são igualmente importantes porque dão cor estética e sabor aos alimentos, atraindo muitos consumidores. Por outro lado, há muitos aspectos nocivos relacionados ao consumo – descarte desse tipo de corante, como a possível morte da forma de vida marinha, o desequilíbrio do sistema imunológico em humanos, TDAH (transtorno do déficit de atenção com hiperatividade) entre crianças, reações de hipersensibilidade e o surgimento de certos cânceres (Ali; Amjad; Rehman, 2023).

Os corantes azoicos são uma classe importante de corantes sintéticos. Esses são explorados em produtos de uso cotidiano, como em alimentos, em medicamentos, e em produtos produzidos pela indústria de vestuário. Os corantes azo contêm vários grupos aminas ($R_1-N = N-R_2$), dando produtos tóxicos de forma reduzida (Feng et al., 2018). Corantes alimentares azoicos, por exemplo, podem apresentar riscos à saúde (Dey; Nagababu, 2022).

A maioria dos efeitos tóxicos após a ingestão oral é provavelmente devido à redução dos corantes pela microflora intestinal, ou seja, clivagem de ligações azo levando à formação de aminas aromáticas, que podem posteriormente ser N-hidroxiladas ou N-acetiladas (Kaya; Cetinkaya; Ozkan, 2021). Os corantes azos têm os efeitos mais carcinogênicos, variando de cânceres de pele a aberrações cromossômicas em um indivíduo (Chung, 2016).

Quando presentes em altas concentrações, os corantes têxteis nas águas esgotam os níveis de oxigênio, bloqueiam a luz solar e prejudicam a atividade biológica da flora e fauna aquáticas (Sarvajith; Reddy; Nancharaiah, 2018). Quando consumido por animais ou indiretamente por humanos causa sérios efeitos reprodutivos, dérmicos, genéticos e neurológicos (Tohamy, 2022).

Podemos trazer como exemplos de corantes azoicos o corante verde reativo 19 e o vermelho ácido 114, ambos têm estruturas contendo grupos azo ($-N=N-$).

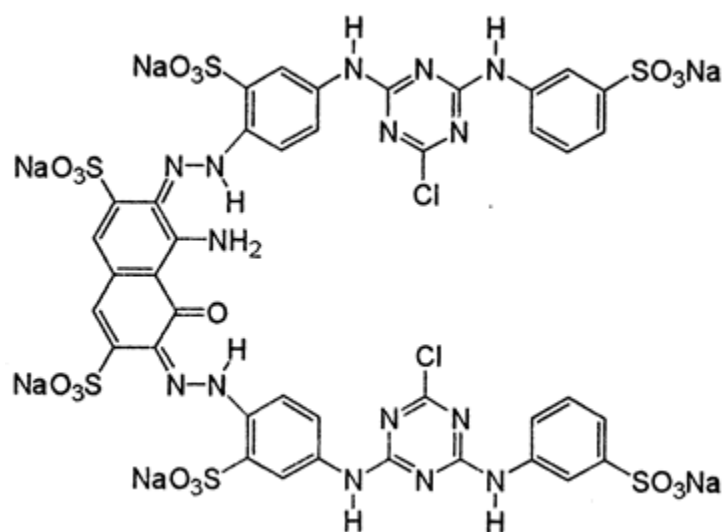
4.1.1 Corante sintético Verde Reativo 19 (VR 19)

O Verde Reativo 19 do inglês *reactive green* (VR19), $C_{40}H_{23}Cl_2N_{15}Na_6O_{19}S_6$, é um corante que tem uma estrutura molecular muito complexa, com dois grupos azo como a fração cromófora e dois grupos clorotriazina reativos (Zuorro, Fidaleo e Lavecchia; 2013).

O VG 19 é amplamente utilizado na indústria têxtil para tingir algodão, devido ao seu custo-benefício e resistência à luz. No entanto, sua fixação incompleta nas

fibras (50-90%) resulta em liberação significativa na água de tingimento, e sua alta resistência à degradação microbiana e química o torna persistente no ambiente. Para mitigar esses impactos ambientais, é crucial desenvolver métodos eficientes de remoção do VR 19 de efluentes industriais e buscar alternativas sustentáveis (Zuorro e Lavecchia, 2014) (Petrucci et al., 2015).

Figura 2: Estrutura química do corante Verde Reativo 19



Fonte: World dye variety.

Corantes reativos como VR 19, ilustrado na figura 2, são conhecidos por serem citotóxicos, mutagênicos e potencialmente cancerígenos, representando riscos ambientais e de saúde significativos. Sua resistência a métodos de tratamento convencionais necessita do desenvolvimento de estratégias de remoção e degradação mais eficazes (Alaka Samal; Das, 2024).

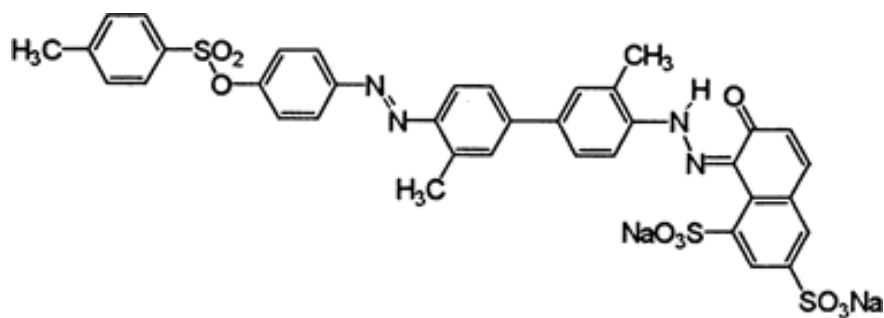
Um estudo realizado por Silva e colaboradores (2022) mostra o potencial citotóxico do corante VR 19, os autores após a análise concluíram que os corantes reativos, incluindo o VR 19, podem causar efeito mais severo em células epidérmicas (HaCaT) do que em células hepáticas (HepaRG).

4.1.2 Corante sintético Vermelho Ácido 114

O Vermelho Ácido 114 (Acid Red 114 - AR-114), ilustrado na figura 3, é um corante da classe dos corantes ácidos azoicos, caracterizados pela presença de um ou mais grupos azo ($-N=N-$) em sua estrutura molecular. Esse tipo de corante é amplamente utilizado na indústria têxtil, especialmente para tingimento de fibras

sintéticas e naturais, como lã, nylon, seda e algumas fibras acrílicas, devido à sua alta solubilidade em água e forte interação com substratos catiônicos em meio ácido (Shojaei e Shojaei, 2018).

Figura 3: Estrutura química do corante Vermelho Ácido 114.



Fonte: World dye variety

O AR-114 contém grupos azo (-N=N-), responsáveis por sua coloração intensa, além de grupos sulfônicos (-SO₃⁻), que conferem alta solubilidade em meio aquoso (Shen et al., 2024).

4.2 Tratamento de efluentes contaminados com corantes sintéticos

Devido à baixa biodegradabilidade dos corantes sintéticos, o processo biológico convencional de tratamento de efluentes não é muito eficiente no tratamento de efluentes contendo corantes (Nachiyar et al., 2023). Processos de tratamento físico e químico são geralmente utilizados nesta situação. Várias técnicas de tratamento de águas residuais incluindo osmose reversa, troca iônica, precipitação química, ultrafiltração, floculação e nanofiltração (Amarasinghe; Williams, 2007; Lewoyehu, 2021) são utilizadas no tratamento de águas contaminadas.

Os sistemas de membranas têm sido amplamente explorados na área de dessalinização de água do mar, produção de alimentos e produtos farmacêuticos, corantes e proteção ambiental, sendo categorizados por seu tamanho de poro, de um a milhares de nanômetros, ou seja, microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa (Licona et al., 2018).

Processos oxidativos avançados (POAs), são técnicas que fornecem soluções viáveis e promissoras para resolver o problema da degradação malsucedida e

mineralização parcial desses poluentes. As POAs se caracterizam por utilizar um semicondutor como catalisador, como, por exemplo, a fotocatalise heterogênea usando TiO_2 , que é considerado um processo de tratamento eficaz para a remoção de compostos recalcitrantes e persistentes (Kanakaraju; Glass; Oelgemöller, 2018).

No entanto, os métodos acima apresentam desvantagens, como altos custos operacionais e de manutenção, grandes necessidades de energia e gerenciamento complexo (Ravi et al., 2020).

A técnica físico-química de adsorção, em especial com o uso de carvão ativado, é utilizada para remover uma gama de contaminantes do meio ambiente, sendo considerada barata, não poluente e eficaz (Tang; Zaini, 2020). Por se tratar da técnica escolhida para esse projeto, essa será descrita em maiores detalhes na próxima seção.

4.3 Técnicas de adsorção

A adsorção é um fenômeno que consiste na retenção de uma espécie (adsorvato) na superfície de um sólido ou líquido. Na adsorção em fase líquida, a espécie sorvida apresenta-se na fase fluídica, como um soluto sólido dissolvido em um solvente e é retida superficialmente por um adsorvente. Cabe ressaltar que quando a espécie sorvida penetra dentro do adsorvente, o processo é chamado de absorção. Em alguns processos é difícil distinguir entre os fenômenos de adsorção ou absorção, e a terminologia mais adequada é sorção (Sorção= Adsorção+ Absorção) (Bergmann & Machado, 2015).

O método de adsorção é um método que tem sido amplamente estudado para sua utilização no tratamento de meios contaminados (Tao et al., 2015). Esse método tem design simples, fácil operação e alta eficiência (Djilani et al., 2015). Um processo de adsorção eficaz requer material adsorvente com bom desempenho e alta afinidade por analitos poluentes. Muitos materiais orgânicos, inorgânicos ou uma combinação de ambos os materiais têm sido desenvolvidos para produzir processos de adsorção eficientes (Abuelnoor et al., 2021). Ainda, esse é um dos métodos mais populares e eficazes para a recuperação de íons tóxicos de soluções aquosas, principalmente pela flexibilidade de operação, assim, vários adsorventes são utilizados para remoção de íons metálicos tóxicos de efluentes industriais (Pang et al., 2011), onde a maior

eficiência é observada para concentrações inferiores a 100 ppm (Guijarro-Aldaco et al., 2011)

A escolha de um adsorvente deve atender critérios fundamentais como alta disponibilidade, eficiência, resistência mecânica e alta capacidade de adsorção. Materiais consolidados como carvão ativado, alumina, resinas poliméricas, zeólitas de sílica e outros são amplamente relatados como adsorventes no tratamento de águas residuais (Qiu et al., 2022). Além dos materiais tradicionais, diversos estudos têm demonstrado a aplicação de uma grande variedade de adsorventes visando remediar os custos de produção e maximizar a eficiência do processo de adsorção (Sophia; Lima, 2018).

O desenvolvimento de adsorventes à base de carbono tem atraído a atenção de pesquisadores e indústrias. Esse interesse ocorre porque o material precursor de carbono possui diversas características de suporte, incluindo significativa abundância natural, possibilidade de reutilização e baixo custo (Liu et al., 2020), (Niazi; Lashanizadegan; Sharififard, 2018).

O carvão ativado é o adsorvente mais comumente empregado em escala industrial, tendo sido utilizado no tratamento de água em décadas (Qiu et al., 2022). O carvão ativado é um material à base de carbono com uma grande área superficial, estrutura de poros internos, várias distribuições de tamanho de poros e um amplo espectro de grupos funcionais oxigenados em sua superfície (Queiroz et al., 2020). Esses são comumente usados para remediar águas residuais e subterrâneas contaminadas, seja na forma de pó, seja na forma granulado. No entanto, a distribuição intraparticular retardada em adsorventes granulares é um dos principais desafios na aplicação de técnicas de adsorção ao tratamento de água (Sashikesh et al., 2023).

Em geral, carvões ativados com uma área superficial substancial e uma estrutura porosa interna bem estruturada têm uma capacidade de adsorção significativa. As três principais zonas reconhecíveis na superfície interna heterogênea do carvão ativado são o plano basal do carbono, os grupos químicos e o conteúdo de cinzas inorgânicas. Os planos basais, que respondem por mais de 90% da superfície do carvão ativado, são os locais mais comuns de adsorção de líquidos orgânicos. Entretanto, a forte interação química dos grupos funcionais pode ter um impacto substancial na capacidade total de adsorção (Fischer et al., 2019).

Devido ao alto custo das matérias-primas, a aplicação em larga escala de carvão ativado no tratamento de águas pode ser cara. Recentemente, biomassas, como aqueles advindos de indústrias de alimentos (Rodrigues et al., 2020) e agroindústrias (Nascimento et al., 2023), são considerados interessantes para produção de biocarvão ativado (do inglês *biochars*) devido ao baixo custo e ampla disponibilidade (Qu et al., 2016).

Os *biochars* podem ser obtidos a partir da pirólise de biomassa, que envolve a decomposição térmica da matéria-prima na ausência de oxigênio, resultando na formação de um produto sólido rico em carbono (Rodrigues et al., 2020; Nascimento et al., 2023).

O biocarvão pode ser ativado física ou quimicamente dependendo das propriedades de superfície desejadas. A ativação é mais comumente realizada é aquela com vapor d'água ou dióxido de carbono – ativação física, e com cloreto de zinco, ácido fosfórico, hidróxido de potássio ou sódio e carbonato de potássio ou sódio – ativação química (Angin; Altintig; Köse, 2013).

4.4 Casca do camarão como biomassa para produção de materiais adsorventes

A utilização da casca de camarão como biomassa é atraente devido a elevada disponibilidade dessa matéria-prima. Cerca de 93 bilhões de toneladas de crustáceos (compostos por camarões e lagostas) são produzidos globalmente por ano (Mathew et al., 2020). Ainda, entre 6 e 8 milhões de toneladas de resíduos de cascas de caranguejo, camarão e lagosta são descartados como lixo em escala global (Piotrowska-Kirschling et al., 2021). A produção de camarão no Brasil chegou a mais de 78 mil toneladas no ano de 2021, um aumento de aproximadamente 24,4% em comparação ao ano anterior (IBGE, 2021).

Em comparação a outras biomassas, a casca do camarão se destaca por ser rica em cálcio, proteína e, também por possui considera em percentual de carbono, podendo ser utilizada para produzir biocarvão com cálcio e nitrogênio residuais (Long et al., 2017, Xlao et al., 2017). A presença de cálcio no *biochar* pode fornecer sítios mais ativos para a adsorção de poluentes orgânicos de acordo com a literatura (Dai et al., 2017, Dai et al., 2018).

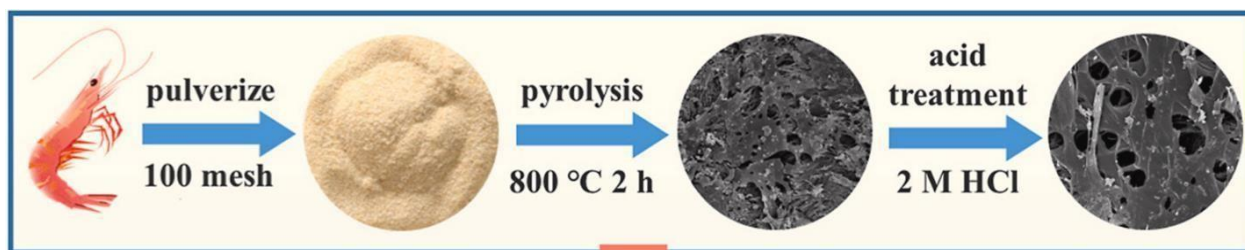
Em seu trabalho, Wang e colaboradores (Wang et al., 2023) produziram biocarvão utilizando casca de camarão, ativando-o com HCl 5% a 25 °C por 12 h. Dessa forma,

obtiveram um biocarvão com área superficial de $4,54 - 21,4 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Tais materiais foram submetidos a uma nova moagem para aumentar a área superficial, alcançando resultados de $14,31$ a $280,09 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Os materiais obtidos foram utilizados na remoção do corante azul de metileno.

Chen e colaboradores (Chen et al., 2023) demonstram em seu trabalho a obtenção de biocarvão poroso hierárquico (tipo de biocarvão que possui uma estrutura porosa em diferentes escalas, desde microporos e macroporos) da casca de camarão (ver Figura 4). Nesse estudo, os autores utilizaram HCl como agente ativador e temperaturas de síntese de 400°C , 600°C e 800°C (com taxa de aquecimento de $5^\circ\text{C}/\text{min}$ e patamar de 2h) em atmosfera de nitrogênio (vazão de $600 \text{ mL}/\text{min}$). Nessas condições, os autores prepararam um biocarvão com área superficial de $347,5 \text{ m}^2/\text{g}$ para a remoção de tris(2-cloroetil)fosfato para tratamento de água e remediação ambiental.

Como visto acima, a utilização de resíduos de casca de camarão como fonte de biocarvão com potencial de aplicação no tratamento de água pode ser uma estratégia para reciclagem de recursos e proteção ambiental. Essa abordagem pode contribuir para a transição para uma sociedade mais verde e resiliente, buscando soluções que sejam ao mesmo tempo ambientalmente e economicamente viáveis.

Figura 4: Biocarvão poroso hierárquico da casca de camarão.



Fonte: Chen et al. (2023).

Apesar da grande quantidade disponível de casca de camarão, poucos estudos utilizam essa biomassa como matéria-prima para a produção de adsorventes. Ainda, apesar dos melhores esforços, não foram encontrados na literatura estudos que apresentem a utilização da casca do camarão *in natura* e/ou com superfície modificada para a produção de adsorventes, bem como as suas aplicações na remoção de corantes sintéticos.

4.5 Estudo de adsorção

Tradicionalmente, um estudo de adsorção é dividido em estudos cinéticos, isotérmicos e termodinâmicos. Através desses é possível obter informações sobre o mecanismo e a dinâmica de um determinado processo de adsorção (Bergmann; Machado, 2015).

4.5.1 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção descrevem a relação entre a quantidade de adsorvato que foi removida pelo adsorvente (q_e) e a concentração de adsorvato remanescente na solução (C_e) após o equilíbrio ser atingido. O processo é avaliado em temperatura constante, avaliando o comportamento do sistema em diferentes temperaturas. Os parâmetros dos modelos de equilíbrio podem ajudar na determinação dos mecanismos de interações entre adsorvente – adsorvato (Bergmann; Machado, 2015).

Diversos modelos empíricos são utilizados para descrever o equilíbrio de adsorção (Bergmann; Machado, 2015). Dentre eles destacam-se as isotermas de Langmuir (Langmuir, 1918), Freundlich (Freundlich, 1907) e Liu (Liu, 2003). Tais modelos serão os modelos utilizados neste trabalho, por serem os mais relatados na literatura e possuírem ajustes adequados ao tipo de estudo (sistema adsorvato – adsorvente) proposto nesta pesquisa.

Modelo de isoterma de Langmuir

O modelo de isotermas de Langmuir (Langmuir, 1918) descreve a formação de uma monocamada na superfície do adsorvente, admitindo que:

- I - As moléculas são adsorvidas em um número fixo de sítios de localização definida;
- II - Cada sítio adsorve somente uma molécula;
- III - Todos os sítios são energeticamente equivalentes; e
- IV - Não há interação entre moléculas adsorvidas.

A expressão matemática que descreve o modelo é apresentada na equação 1.

$$q_e = \frac{Q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde, q_e é a quantidade de adsorvato adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1}), C_e é a concentração do adsorvato em solução após o sistema atingir o equilíbrio (mg L^{-1}), K_L é a constante de adsorção de Langmuir (L mg^{-1}), e Q_{max} é a capacidade máxima de adsorção do adsorvente (mg g^{-1}).

Modelo de isoterma de Freundlich

A equação de Freundlich foi uma das primeiras equações empíricas utilizadas para descrever dados de equilíbrio e características da adsorção de sistemas heterogêneos. O modelo de isotermas de Freundlich assume que a concentração do adsorvato na superfície do adsorvente aumenta infinitamente com a concentração do adsorvato (Freundlich, 1906), ou seja, ela não descreve o comportamento de saturação de um adsorvente (Tran et al., 2017). Matematicamente, o modelo é descrito pela equação 2.

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n_F} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde, q_e é a quantidade de adsorvato adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1}), C_e é a concentração do adsorvato em solução após o sistema atingir o equilíbrio (mg L^{-1}), K_F é a constante de Freundlich [$\text{mg g}^{-1} (\text{mg L}^{-1})^{-1/n_F}$], n_F é o expoente de Freundlich (adimensional).

É empregado para descrever sistemas heterogêneos e assume que a adsorção é multicamadas (Rathi; Kumar, 2021).

Modelo de isoterma de Liu

O modelo proposto de Liu é uma combinação dos modelos Langmuir e Freundlich. Porém, são descartados os conceitos de monocamada do modelo de Langmuir e de adsorção infinita do modelo de Freundlich (Liu et al., 2003). O modelo de Liu assume que os sítios ativos do adsorvente não podem ter a mesma energia.

Assim, a adsorção pode ocorrer em sítios ativos preferidos. E, em algum momento haverá saturação desses sítios. O modelo é descrito pela equação 3.

$$q_e = \frac{Q_{max} \cdot (K_g \cdot C_e)^{n_L}}{1 + (K_g \cdot C_e)^{n_L}} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde, q_e é a quantidade de adsorvato adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1}), C_e é a concentração do adsorvato em solução após o sistema atingir o equilíbrio (mg L^{-1}), K_g é a constante de Liu (L mg^{-1}), n_L é o expoente adimensional da equação de Liu.

4.5.2 Cinética de adsorção

A cinética do processo de adsorção fornece informações sobre a taxa de adsorção do soluto, determinando o tempo necessário para a realização do processo. A velocidade com que o processo progride caracteriza o comportamento cinético de um sistema. Esse dado é fundamental para definir o mecanismo de adsorção, tendo em vista que fatores como temperatura, concentração, pH, concentração inicial de adsorvato e tamanho das partículas do adsorvente influenciam diretamente o comportamento cinético de um sistema (Ho; McKay, 1999). Muitos modelos foram desenvolvidos para se encontrar as constantes intrínsecas de adsorção. Os resultados deste trabalho serão comparados com os modelos de pseudo – primeira ordem, pseudo – segunda ordem e ordem Fracionária de Avrami.

Modelo cinético de pseudo – primeira ordem

O modelo de pseudo – primeira ordem (PPO) foi proposto por Lagergren (1989), para descrever a adsorção de adsorvatos em fase aquosa. No entanto, a forma mais utilizada desta equação foi proposta por Ho e McKay (1999), sendo descrita pela equação 4.

$$\frac{dq}{dt} = k_f (q_e - q_t) \quad (\text{Eq. 4})$$

onde, k_f é a constante da taxa de pseudo – primeira ordem (min^{-1}), q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}), q_t é a quantidade de adsorvato adsorvida em

qualquer tempo (mg g^{-1}) e t é o tempo de contato (min) entre adsorvente e adsorvato. A integração nas condições de contorno ($q_t = 0$ em $t = 0$; e $q_t = q_e$ em $t = t$) leva a equação 5.

$$\ln \ln (q_e - q_t) = \ln \ln (q_e) - k_f \cdot t \quad (\text{Eq. 5})$$

Rearranjando para uma forma não linear, temos a equação 6.

$$q_t = q_e [1 - \exp \exp (k_f \cdot t)] \quad (\text{Eq. 6})$$

Modelo cinético de pseudo – segunda ordem

A equação de pseudo – segunda ordem (PSO) descreve a capacidade de adsorção do adsorvente onde essa capacidade de adsorção é proporcional ao número de sítios ativos do adsorvente que foram ocupados (Ho; Mckay, 1999). Matematicamente o modelo é descrito pela equação 7.

$$\frac{dq}{dt} = k_s (q_e - q_t)^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

onde, k_s é a constante da taxa de pseudo – segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$), q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}) e q_t é a quantidade de adsorvato adsorvida em qualquer tempo t (mg g^{-1}). A integração nas condições de contorno ($t = 0$; $q_t = 0$ e $t = t$; $q_t = q_t$), leva a equação 8.

$$q_t = \frac{k_s \cdot q_e^2 \cdot t}{(1 + k_s \cdot q_e \cdot t)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Então, a taxa inicial de adsorção pode ser obtida quando t se aproxima de zero, gerando a equação 9.

$$h_0 = k_s \cdot q_e^2 \quad (\text{Eq. 9})$$

onde, h_o é a taxa inicial de adsorção ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$) e q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}).

Modelo de ordem Fracionária de Avrami

O modelo de ordem fracionária de Avrami (OFA), propõe a determinação de alguns parâmetros cinéticos, como possíveis alterações das taxas de adsorção em função da concentração inicial e do tempo de adsorção, bem como a determinação de ordens cinéticas fracionárias (Lopes et al., 2003). Seu modelo é matematicamente descrito pela equação 10.

$$\alpha = 1 - \exp \exp [(-k_{AV}.t)]^{n_{AV}} \quad (\text{Eq. 10})$$

onde, α é a fração de adsorção (q_t/q_e) no tempo t , k_{AV} é a constante cinética de Avrami (min^{-1}) e n_{AV} é a ordem fracionária de reação relacionada ao mecanismo de adsorção. Substituindo o valor de α na equação (10), a equação de cinética de Avrami é mostrada na equação 11.

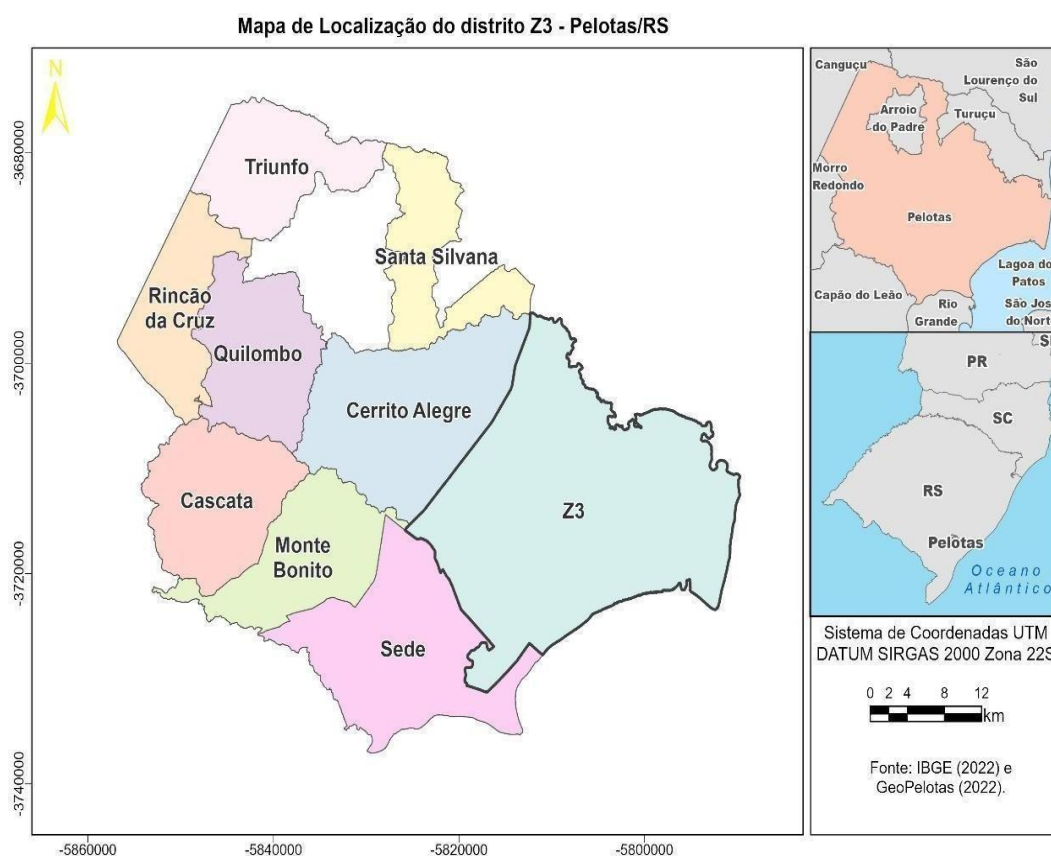
$$q_t = q_e \{1 - \exp \exp [-(k_{AV}.t)]^n \} \quad (\text{Eq. 11})$$

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Materiais

O exoesqueleto de camarão, cuja prática de pesca ocorre na Laguna dos Patos, foi retirado diretamente com os pescadores da região da colônia Z3 ($31^{\circ}42'01.4''\text{S}$ $52^{\circ}08'45.9''\text{W}$), localizada no município de Pelotas (RS), conforme ilustrado na Figura 5. A coleta ocorreu durante o período da safra (1^o de fevereiro a 31 de maio), quando os camarões são devidamente 'limpos' para o comércio, sendo separadas a carne, a casca e a cabeça. Após o processo de limpeza, o exoesqueleto foi imediatamente coletado, acondicionado e preparado para posterior análise no laboratório, como mostra a Figura 6.

Figura 5: Mapa de localização da Colônia de Pescadores (Z3) da cidade de Pelotas.



Fonte: Autoral

Figura 6: Casca de camarão separada para análise laboratorial.



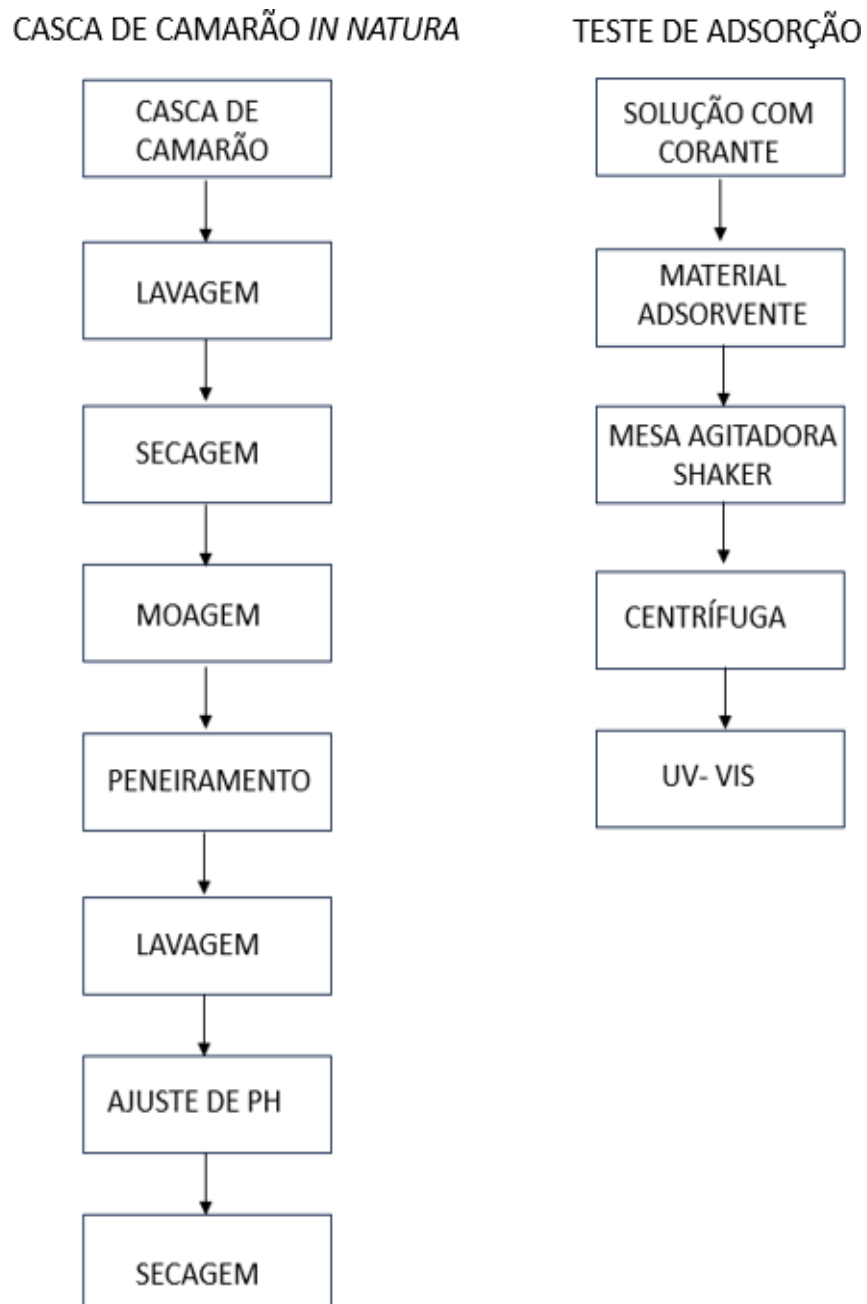
Fonte: Autoral

O corante sintético Verde Reativo 19 ($1418,9 \text{ g mol}^{-1}$, CAS: 61931-49-5), foi adquirido da Sigma-Aldrich, enquanto o corante Acid Red 114 (AR, $830.81 \text{ g mol}^{-1}$, CAS: 6459-94-5), foi adquirido da VeTec.

5.2 Métodos

A Figura 7 apresenta, de forma resumida, o fluxograma da metodologia abordada na realização desta pesquisa.

Figura 7: Fluxograma da metodologia escolhida neste estudo.

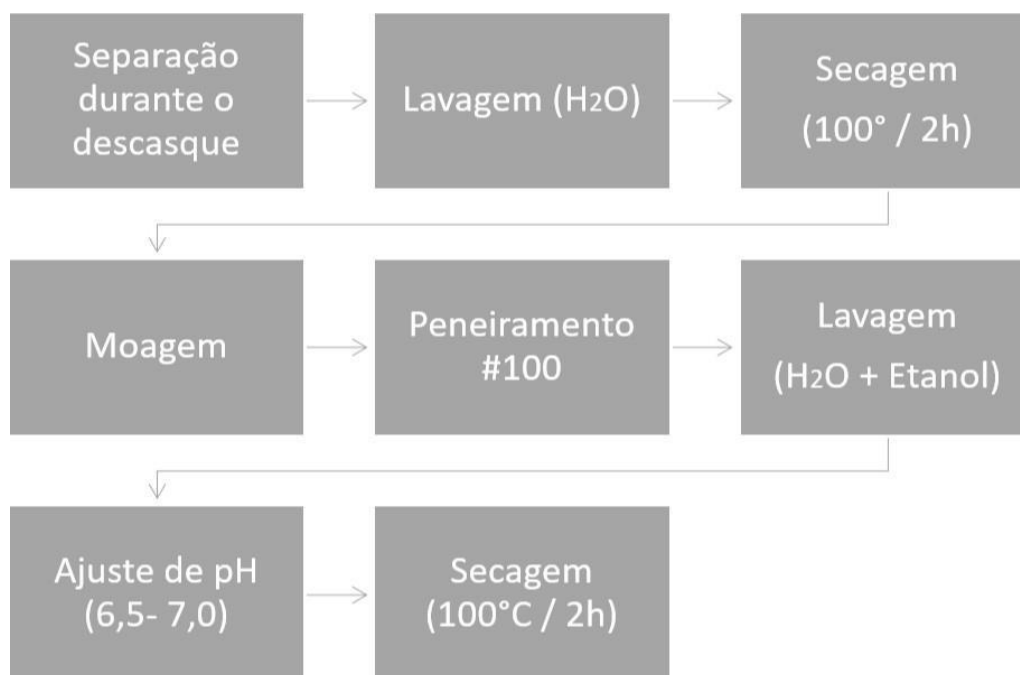


Fonte: Autoral

5.2.1 Preparo do adsorvente a base de casca de camarão

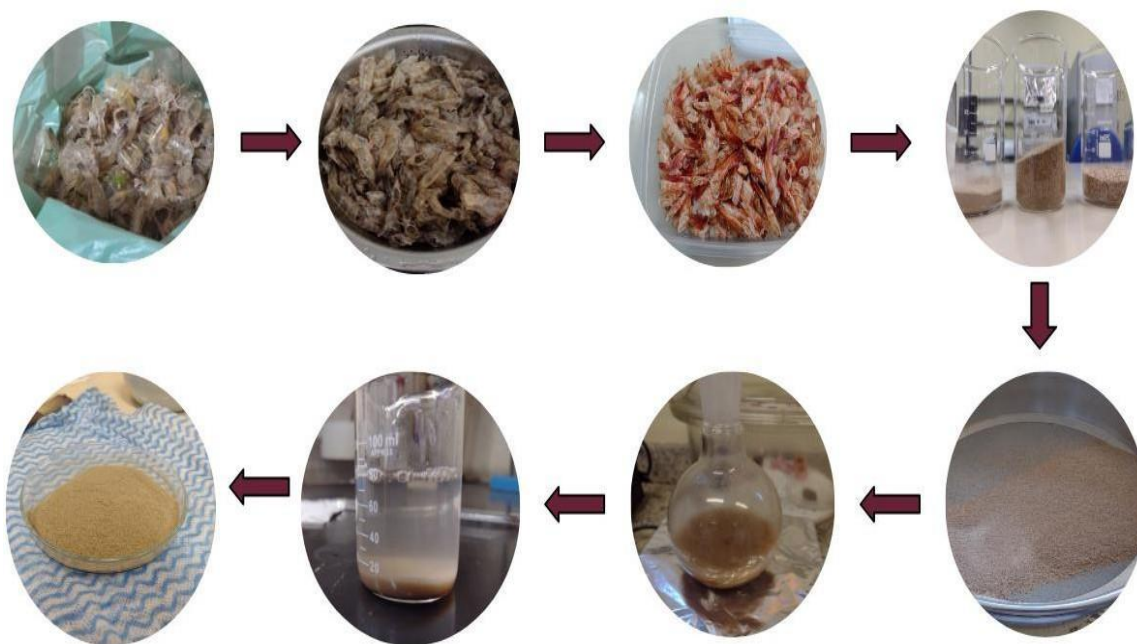
A Figura 8 apresenta, de forma esquematizada, as diferentes etapas utilizadas na preparação do adsorvente a base de casca de camarão via rota ambientalmente amigável. Já a figura 9 apresenta o mesmo, de forma ilustrativa.

Figura 8: Fluxograma da preparação do adsorvente CC *in natura*.



Fonte: Autoral

Figura 9: Fluxograma da da preparação do adsorvente CC *in natura* ilustrado.



Para obter o adsorvente CC *in natura*, o processo começou com a separação da casca logo no momento do descasque, já sendo acondicionado de forma correta para futura análise laboratorial; com a chegada do material, foi feito então uma lavagem rigorosa das cascas de camarão, seguida pela secagem (na temperatura de 100°C por 2h) e trituração até alcançar a granulometria desejada (passante em *mesh* 100). Em seguida, o material foi lavado com uma solução de água deionizada e etanol (na proporção de 1:1) para remover a coloração da amostra.

Após esse passo, foi realizado o ajuste de pH da solução de lavagem, onde foi lavado com água deionizada até obter a solução entre pH 6,5 e 7,0; e, por fim, a amostra foi completamente seca em estufa por 100 °C durante 2h.

5.2.2 Caracterização do adsorvente a base de biomassa de camarão

A análise morfológica do adsorvente foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um microscópio JEOL JSM - 6610LV, equipando com detector de energia dispersiva (EDS).

As propriedades de textura dos adsorventes foram realizadas através das isotermas de adsorção-dessorção de N₂, usando um analisador volumétrico Gemini VII 2390^a – Micromeritics, a -196 °C. A partir das isotermas de adsorção e dessorção foram obtidas a área superficial específica, utilizando o método BET (Brunauer, Emmet e Teller) (Brunauer; Emmet; Teller, 1938), e o volume de poros e a distribuição de tamanho de poros via método BJH (Barret, Joyner e Halenda) (Barrett; Joyner; Halenda, 1951).

A análise estrutural do adsorvente CC foi realizada por meio de análise de difração de raios X (XRD), utilizando um difratômetro Rigaku Miniflex® 300 equipado com ânodo de Cu ($\lambda_{K\alpha 1} = 1,54051 \text{ \AA}$). Os parâmetros de varredura foram configurados com uma faixa de 5 a 100° e uma taxa de varredura de 0,03° s⁻¹.

A identificação dos grupos funcionais presentes na superfície dos adsorventes foi obtida através da técnica de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier - FTIR, usando o espectrofotômetro da Shimadzu, modelo IRPrestige-21 0. Os espectros foram obtidos na faixa espectral de 400 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹, com resolução de 2,0 cm⁻¹.

O pH no ponto de carga zero (pH_{PZC}) foi obtido através da variação do pH de solução NaCl em contato com adsorvente, utilizando o seguinte procedimento: Primeiramente foi adicionado 50 mg de adsorvente em uma série de tubos Falcon. Em seguida, foi adicionado 20 mL de solução NaCl 0,05 mol L⁻¹ com o pH inicial (pH_i) da solução previamente ajustado de 2 a 10 (pela adição de HCl 0,1 mol/L ou NaOH 0,1 mol L⁻¹). Posteriormente, os tubos Falcon foram tampados e agitados em um agitador recíprocante climatizado a 25°C, 150 rpm por 24 h. Após, os valores de pH_{final} foram medidos. O pH_{PZC} é o ponto em que a curva de ΔpH (pH_f - pH_i) em função do pH_i intercepta a linha do zero. O pH_{PZC} é o valor de pH necessário para que a superfície do adsorvente tenha uma carga líquida neutra (De Azevedo et al., 2023).

5.2.3 Estudos de adsorção

Um dos fatores mais influentes nos estudos de adsorção é o efeito do pH da solução de adsorvato. Diferentes adsorvatos têm faixas de pH adequadas distintas, dependendo do adsorvente utilizado. A adsorção de moléculas de corantes sintéticos é influenciada pela carga superficial do adsorvente e pela especiação do poluente na solução, a qual, por sua vez, é afetada pelo pH (Lima; Adebayo; Machado, 2015). Ainda, o pH da solução impacta a capacidade de adsorção e o processo geral de adsorção. Dessa forma, foi avaliada a influência do pH da solução de corante no processo de adsorção. Para tanto, foram realizados ensaios utilizando 15 mg de CC em soluções de corantes Verde Reativo 19 e Acid Red 114 na concentração de 100mg L⁻¹. Para os estudos de adsorção em batelada, 20 mg do adsorvente foram adicionados em tubos Falcons (50 mL), contendo 20 mL de solução do corante sintético (Verde Reativo 19 ou Acid Red 114) com distintas concentrações (de 10 a 400 mg L⁻¹ para o estudo isotérmico; e 100 mg L⁻¹ para o estudo cinético). Os tubos foram agitados em um agitador climatizado (NT 715), com temperatura variando de 20 a 40 °C, por um período adequado (entre 10 e 360 min para o estudo cinético e 12 h para o estudo isotérmico).

Após o tempo de contato, alíquotas de 1 mL da solução final foram coletadas e centrifugadas em uma centrífuga YKG1 – YK Tecnologia a 4000 rpm por 10 min. As concentrações finais dos corantes Verde Reativo 19 e Acid Red 114 foram determinadas usando espectrofotômetro BEL (modelo UV-M51). As medidas de absorvância foram realizadas no comprimento de onda máximo dos corantes Verde Reativo 19 e Acid Red 114 em 624 nm e 531 nm, respectivamente. A quantidade e porcentagem dos corantes removido do meio aquoso foram obtidas usando as Eqs. (12) e (13) (De Azevedo et al., 2023):

$$q = \frac{(C_o - C_f)}{m} \cdot V \quad (\text{Eq. 12})$$

e

$$\%Remoção = 100 \times \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde q representa a quantidade de corante adsorvida (mg g^{-1}), C_o e C_f são, respectivamente, a concentração inicial e final da solução de corante (antes e depois do processo de adsorção (mg L^{-1}), m é a massa do adsorvente (g), e V é o volume da solução de trabalho (L).

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos não lineares isotérmicos de Langmuir (Equação 1), Freundlich (Equação 2) e Liu (Equação 3) e aos modelos não lineares cinéticos de pseudo – primeira ordem (Equação 6), pseudo – segunda ordem (Equação 8), e ordem fracionária de Avrami (Equação 10) de adsorção a partir do *software* Moccrocal Origin 2021.

Em adição, os modelos foram estatisticamente avaliados em função do coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustada (R^2_{adj}), Desvio Padrão (SD), soma residual de quadrados (RSS) e critério de informação Bayesiano (do inglês *Bayesian Information Criterion*, BIC), mostrados nas Equações 14 a 17 (De Azevedo et al., 2023). 14 - 18

$$R^2 = \left[\frac{\sum_i^n (q_{i,exp} - \bar{q}_{exp})^2 - \sum_i^n (q_{i,exp} - q_{i,model})^2}{\sum_i^n (q_{i,exp} - \bar{q}_{exp})^2} \right] \quad (\text{Eq. 14})$$

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \cdot \left(\frac{n - 1}{n - p - 1} \right) \quad (\text{Eq. 15})$$

$$SD = \sqrt{\left(\frac{1}{n - p} \right) \sum_i^n (q_{i,exp} - q_{i,model})^2} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$RSS = \sum_i^n (q_{i,exp} - q_{i,model})^2 \quad (\text{Eq. 17})$$

$$BIC = n \ln \left(\frac{RSS}{n} \right) + p \ln(n) \quad (\text{Eq. 18})$$

Nas Equações 14 a 17, $q_{i,model}$ é qualquer valor de q previsto por um dado modelo, $q_{i,exp}$ é qualquer valor q medido experimentalmente, q_{exp} é a média de todos

os valores de q medidos experimentalmente, p é o número de parâmetros no modelo de ajuste e n é o número de experimentos realizados;

Para avaliar um modelo, de acordo com Schwarz (Schwarz, 1978), utiliza-se o ΔBIC (ou seja, $BIC_{\text{modelo 1}} - BIC_{\text{modelo 2}}$):

- Quando $\Delta BIC \leq 2,0$, não há diferença significativa entre os dois modelos;
- Quando $2 < \Delta BIC < 6$, há uma perspectiva positiva de que o modelo com menor BIC seja o mais adequado;
- Para $6 < \Delta BIC < 10$, há uma forte possibilidade do modelo com menor valor de BIC ser o melhor modelo a ser ajustado;
- Para $\Delta BIC \geq 10,0$, pode ser previsto com precisão que o modelo com menor valor de BIC é o modelo mais bem ajustado.

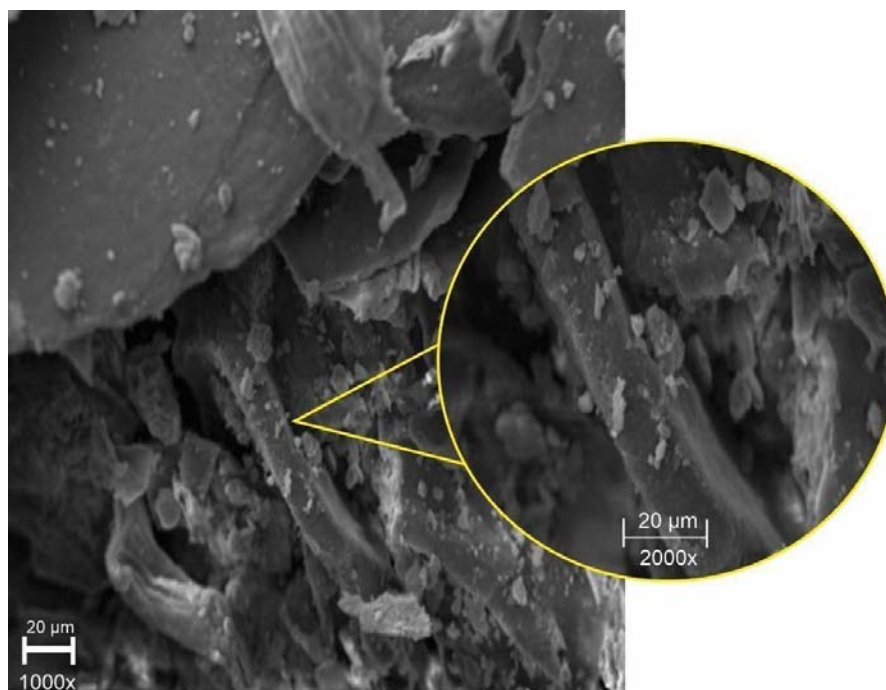
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterizações do adsorvente de casca de camarão

A Figura 10 mostra as micrografias obtidas via MEV do material *in natura*. A CC apresentou uma estrutura rígida, com uma superfície compacta e relativamente lisa, caracterizada por uma camada externa mais dura, composta por quitina e proteínas. Pode-se observar uma textura fibrosa ou com uma leve irregularidade na superfície, indicando a presença de fibras naturais (Rahman, Maniruzzaman; Saha; 2025).

Os resultados da microscopia eletrônica de varredura apresentam formato indicado na literatura característico da quitina, principal componente da casca de camarão, pode ser observada em forma de microfibrilas ou aglomerados, que são componentes estruturais responsáveis pela rigidez da casca (Madni, Kousar, Naeem; Wahid; 2021). As morfologias encontradas são semelhantes a Feng et al., (2021) na sua pesquisa que buscou produzir um material adsorvente derivado de cascas de camarão para adsorção eficiente de Pb_{2+} em soluções aquosas.

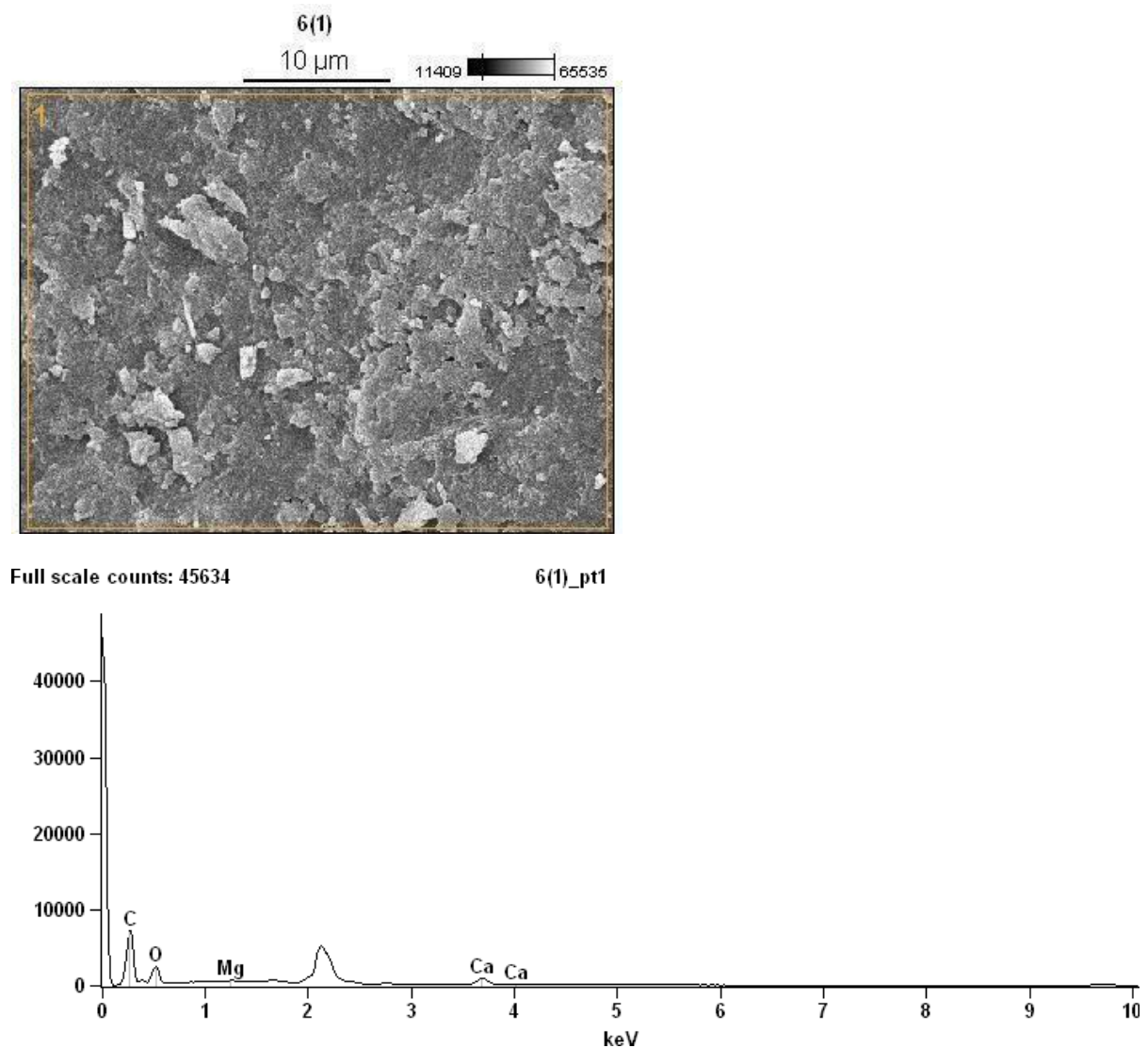
Figura 10: Micrografias obtidas via MEV do material *in natura*.



Fonte: Autoral

Com o objetivo de identificar os elementos químicos presentes na CC *in natura*, foi realizada a análise de espectroscopia de dispersão de raios X (EDS), conforme ilustrado na Figura 11 abaixo. A análise revelou a presença de elementos como carbono, oxigênio, magnésio e cálcio, cujas quantidades estão detalhadas na Tabela 1. O EDS da casca do camarão mostrou picos mais acentuados de cálcio e oxigênio, assim como o analisado por Gbenebor et al., (2017), que ainda afirma que esses resultados mostram que a superfície da casca do camarão consiste em calcita e outros oligoelementos, como nitrogênio e silício.

Figura 11: Análise química elementar da CC *in natura*. Obs.: A área em laranja foi considerada para análise.



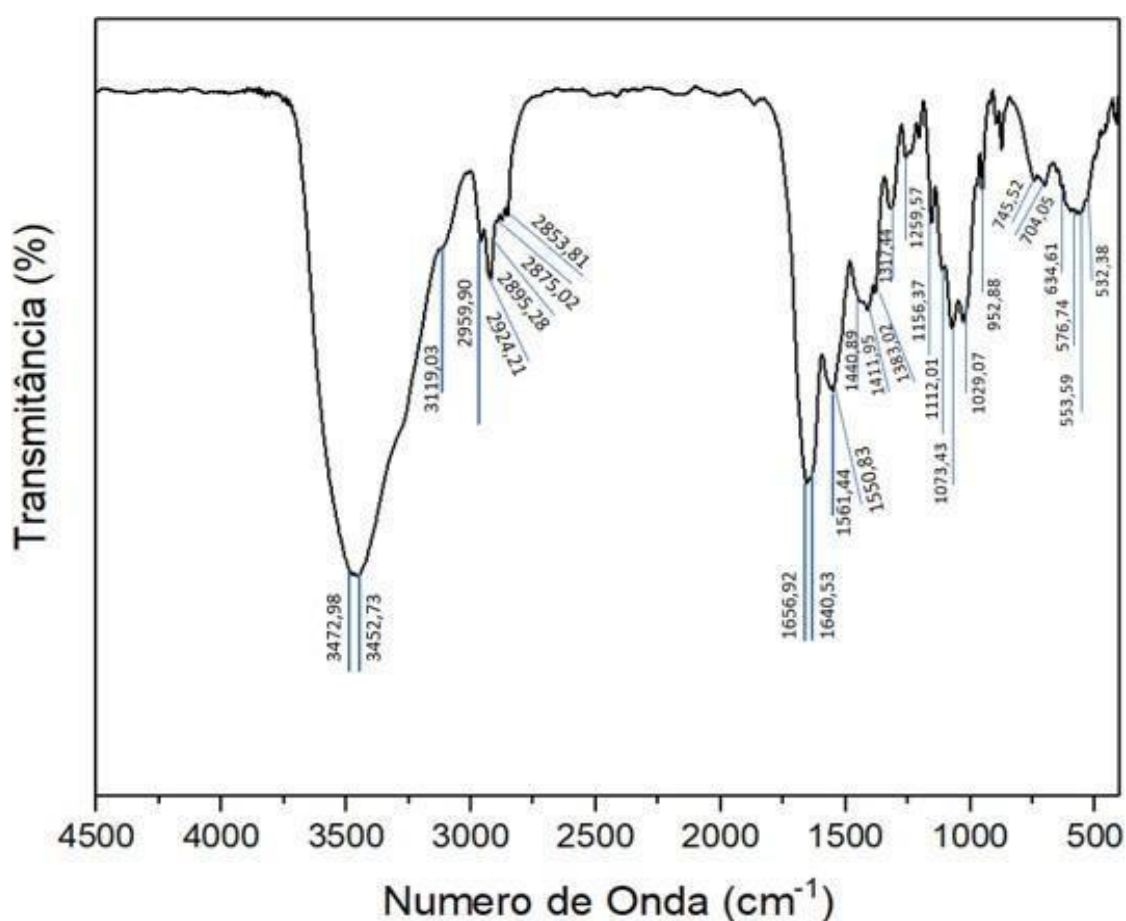
Fonte: Autoral

Tabela 1: Percentual dos elementos químicos presentes na amostra de CC.

Elemento	Carbono	Oxigênio	Magnésio	Cálcio
%	39,66	47,33	0,93	12,07

Com o objetivo de verificar os grupos presentes nas superfícies do adsorvente e identificar os possíveis grupos responsáveis pela adsorção do contaminante, foi realizada a espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de Fourier (Fig.12).

Figura 12: FTIR casca de camarão *in natura*.



Fonte: Autoral

A análise espectral de FTIR da casca de camarão revelou a presença de diversos grupos funcionais. Os picos em 3472,98 cm⁻¹ e 3452,73 cm⁻¹ indicam vibrações de estiramento dos grupos hidroxila e amino, típicos de polissacarídeos

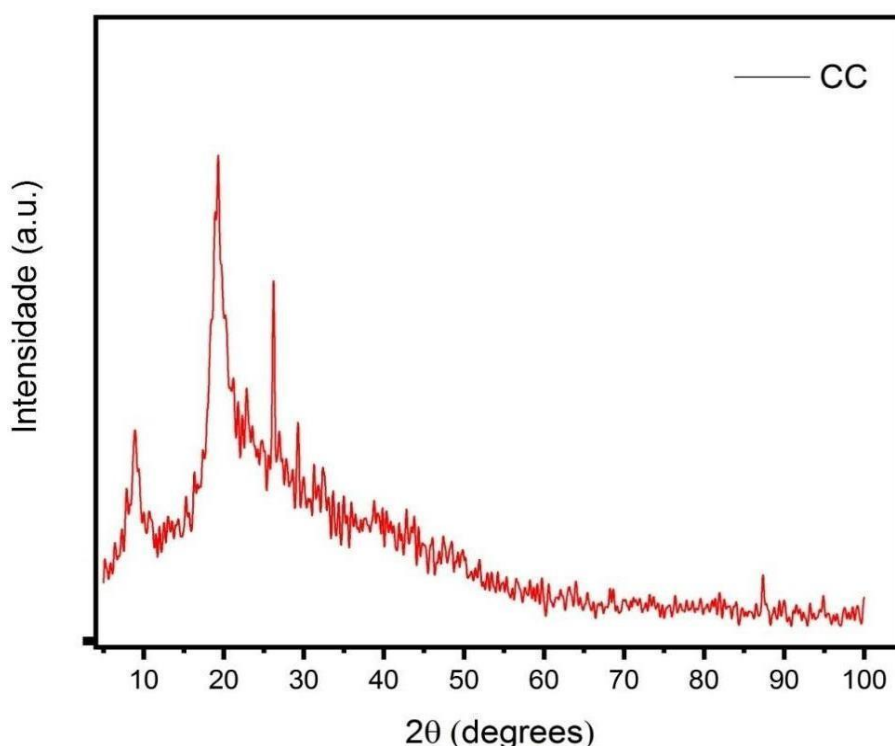
como quitina e quitosana, enquanto os picos em $3119,03\text{ cm}^{-1}$, $2959,90\text{ cm}^{-1}$ e $2924,21\text{ cm}^{-1}$ sugerem vibrações associadas a estruturas alifáticas, características da quitina (Moosa et al., 2016; Gbenebor et al., 2017).

As bandas em $1656,92\text{ cm}^{-1}$ e $1640,53\text{ cm}^{-1}$ estão associadas a grupos amida, tipicamente encontrados na quitina, e $1561,44\text{ cm}^{-1}$ e $1550,83\text{ cm}^{-1}$ correspondem a deformações de N-H ou C-N, características de quitina e seus derivados (Nouj et al., 2021).

Além disso, picos em $1259,57\text{ cm}^{-1}$, $1156,37\text{ cm}^{-1}$ e $1112,01\text{ cm}^{-1}$ indicam vibrações C-N e C-O, típicas de carboidratos, evidenciando a presença de quitina e quitosana na casca de camarão (Arabani e Farkhondeh, 2024).

Esses resultados confirmam a predominância de quitina e quitosana na composição da casca de camarão, reforçando sua estrutura rica em polissacarídeos. O pico em 2350 cm^{-1} foi atribuído à vibração da molécula de CO_2 (Nouj et al., 2021).

Figura 13: Difração de raio X da casca de camarão *in natura*.



Fonte: Autoral

A quitina é um biopolímero semicristalino cujos picos de difração geralmente aparecem na região entre 10° e 30° (2θ). O pico mais intenso, localizado em torno de

20°, pode estar associado ao plano cristalográfico (020) da quitina, um padrão frequentemente observado em estudos de DRX desse biopolímero. Esse pico específico também foi identificado no estudo realizado por Neves e colaboradores (2017), que investigaram a estrutura cristalina da quitina e confirmaram a presença desse pico característico, reforçando a consistência dos resultados em outros trabalhos científicos sobre o tema.

A casca de camarão contém carbonato de cálcio, geralmente na forma de calcita e aragonita, apresentando picos de aragonita em 26.2° (2 θ) e de calcita em torno de 29.5° (2 θ). A aragonita é uma forma cristalina do carbonato de cálcio que ocorre frequentemente em conchas de moluscos e exoesqueletos de crustáceos. Estudos, como o de Bessler e Rodrigues (2008), indicam que a aragonita é a fase cristalina mais comum em conchas calcárias de moluscos, devido à sua maior dureza e densidade em comparação com a calcita.

Além disso, a pesquisa de Rimar e seus colaboradores (2013) sobre o potencial das conchas de mariscos e crustáceos, destaca que as camadas calcárias podem ser compostas inteiramente de aragonita ou de uma mistura de aragonita e calcita. A identificação e diferenciação dessas fases cristalinas são realizadas por meio de técnicas como a DRX, que permite a identificação dos picos característicos de cada forma cristalina.

A Tabela 2 mostra os resultados das análises de área superficial e porosidade da CC *in natura* obtidos através dos métodos de BET e de BJH.

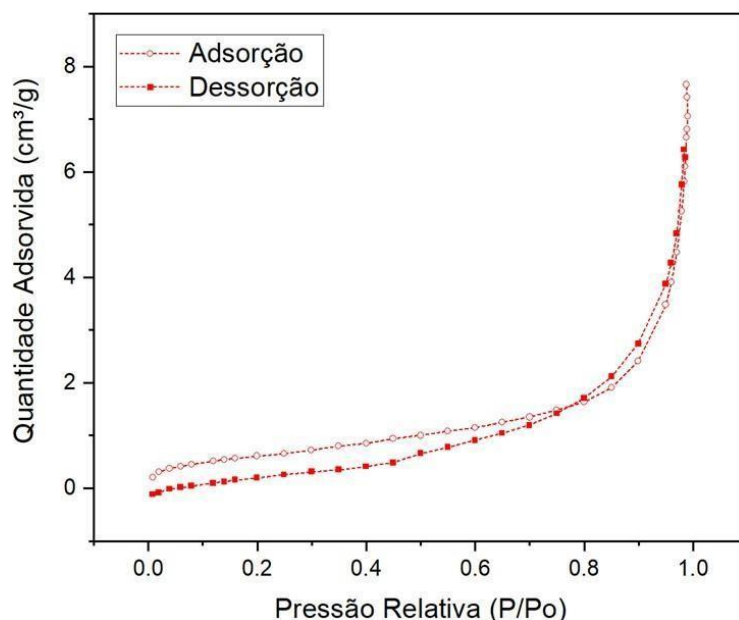
Tabela 2. Área superficial e porosidade da CC obtidos através de BET e BJH.

Material	Área superficial (m² g⁻¹)	Volume de poros (cm³ g⁻¹)	Tamanho de poros (nm)
CC <i>in natura</i>	2,32	0,0105	16,98

A partir da Tabela 2, observa-se que o material apresenta baixa área superficial específica (2,32 m² g⁻¹) e volume de poros (0,0105 cm³ g⁻¹), especialmente quando comparado a adsorventes convencionais, como adsorvente a base de carbono (Bergmann; Machado, 2015). Destaca-se que valores de área superficial dessa magnitude são esperados para materiais sem modificações, como o utilizado no presente estudo (Su et al., 2024). Dessa forma, a capacidade de adsorção do CC

será determinada principalmente pelos grupos funcionais presentes na superfície e na estrutura do material, em vez das propriedades texturais como a área superficial e volume de poros.

Figura 14: Curva de Adsorção e Dessorção Obtida pelo Método BJH.



Fonte: Autoral

Os resultados obtidos a partir da isoterma de adsorção e dessorção (Figura 14) indicam que o material apresenta um comportamento típico de sistemas mesoporosos, conforme a classificação da IUPAC (Donohue e Aranovich, 1998). A presença de um laço de histerese sugere que a adsorção ocorre com preenchimento progressivo dos poros, seguido por um mecanismo de condensação capilar durante a dessorção (Barsotti et al., 2020). Esse fenômeno é característico de isothermas do tipo IV, com histerese possivelmente do tipo H1 ou H2, indicando uma estrutura de poros cilíndricos uniformes ou com gargantas estreitas (Thommes et al., 2015). A análise pelo método BJH, amplamente utilizado para determinar a distribuição de tamanho de poros, reforça a presença de mesoporos, que são fundamentais para aplicações em catálise, adsorção e materiais porosos avançados. Dessa forma, os resultados confirmam a adequação do método BJH para a caracterização estrutural do material, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela IUPAC.

Tabela 3: Comparação do adsovente CC *in natura* com os demais apresentados na literatura.

Material / Tratamento	Área Superficial (m²/g)	Volume de Poros (cm³/g)	Diâmetro Médio dos Poros (nm)	Fonte
KOH-ativado (K-Ac)	3160	2,38	10	Guo et al., 2019
Carbonizado (CPS)	6,21	0,0276	17,77	Fanfan et al., 2022
Biochar derivado de resíduos de camarão (SPC)	2262	—	—	Salawu, Han e Adeleye (2022)
CC in natura	2,32	0,0105	16,98	Este estudo

Comparando-se os valores obtidos para área superficial (2,32 m²/g) e volume de poros (0,0105 cm³/g) do material produzido neste estudo com adsorventes derivados de casca de camarão modificados disponíveis na literatura, como aqueles desenvolvidos por Wang et al. (2023) e Chen et al. (2023), observa-se que o adsorvente obtido apresenta propriedades texturais inferiores. Essa diferença é atribuída ao fato de o material ter sido utilizado *in natura*, sem a aplicação de processos de ativação química ou térmica, que normalmente promovem o desenvolvimento de estruturas porosas mais complexas e o aumento da área superficial. Assim, a baixa área superficial observada é condizente com a metodologia adotada, a qual priorizou um método simples, sustentável e de baixo impacto ambiental, preservando a biomassa em sua forma mais natural possível.

6.2 Ponto de carga zero e estudo do pH

O pH do meio afeta a adsorção na medida em que determina o grau de distribuição das espécies químicas envolvidas no processo, sendo sua intensidade maior ou menor conforme o adsorvente, já que as cargas da superfície desse dependem da sua composição e características (Appel et al., 2003). Portanto, compreender o comportamento eletrostático da superfície do adsorvente em função do pH é de grande importância para o entendimento do mecanismo de adsorção (Do Nascimento et. al., 2014; Bergmann; Machado, 2015).

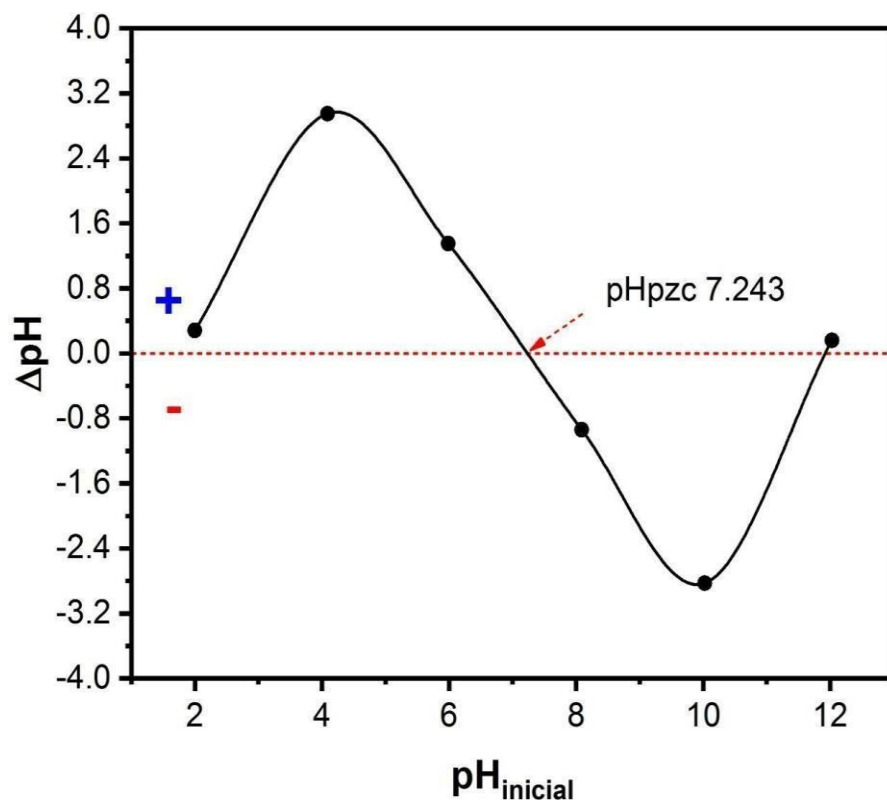
A influência da acidez do meio sobre as características superficiais da casca de camarão foi avaliada dentro da faixa de pH 2,0 até 12,0, conforme mostra a figura 15.

O pH do ponto de carga zero do material foi de 7,24 (Figura 15). Portanto, para soluções com pH acima desse valor, a CC apresenta carga superficial negativa. Por outro lado, abaixo desse valor, a CC apresenta carga superficial positiva (Machado et al., 2011). Tais resultados são semelhantes àqueles encontrados por Boudouaia et al., (2019) e Benazouz et al., (2023).

Os corantes sintéticos VR - 19 e AR - 114 são corantes aniônicos, contendo grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$) em suas estruturas, o que lhes confere carga negativa quando dissolvidos em água (Hanbing; Haase; Mahltig, 2020). A adsorção desses corantes ocorre por interação eletrostática quando o adsorvente apresenta carga superficial positiva. Portanto, para o CC, a interação eletrostática ocorrerá em situações nas quais o pH da solução for inferior a 7 (Machado et al., 2011).

No entanto, quanto mais baixo estiver o valor do pH da solução (ou seja, mais distante do pH_{PZC}), mais positiva será a superfície do adsorvente (Calvete et al., 2009). Sendo assim, nos estudos de adsorção, o pH inicial da solução foi fixado em 2,0. Vale ressaltar que o pH final da solução do adsorvato, após o procedimento de adsorção, não teve uma mudança considerável.

Figura 15. Influência da acidez do meio sobre o CC *in natura*. Condições: 20,00 mL de solução com pH ajustados de 2 a 12, massa de adsorvente 20,0 mg.



Fonte: Autoral

6.2 Estudo Cinético

No contexto industrial, a cinética de adsorção refere-se à relação entre o tempo e o processo de adsorção em superfícies sólidas. Quando um adsorvente sólido entra em contato com uma fase fluida (gás ou líquido) contendo uma substância a ser adsorvida (adsorvato), a concentração dessa substância diminui ao longo do tempo até atingir um valor constante, conhecido como tempo de equilíbrio (ADD ref). Assim, o estudo da cinética de adsorção teve como objetivo verificar o comportamento cinético de adsorção e determinar o tempo necessário para que os processos de adsorção dos corantes sintéticos VR - 19 e AR - 114 atinjam o equilíbrio na superfície do adsorvente CC.

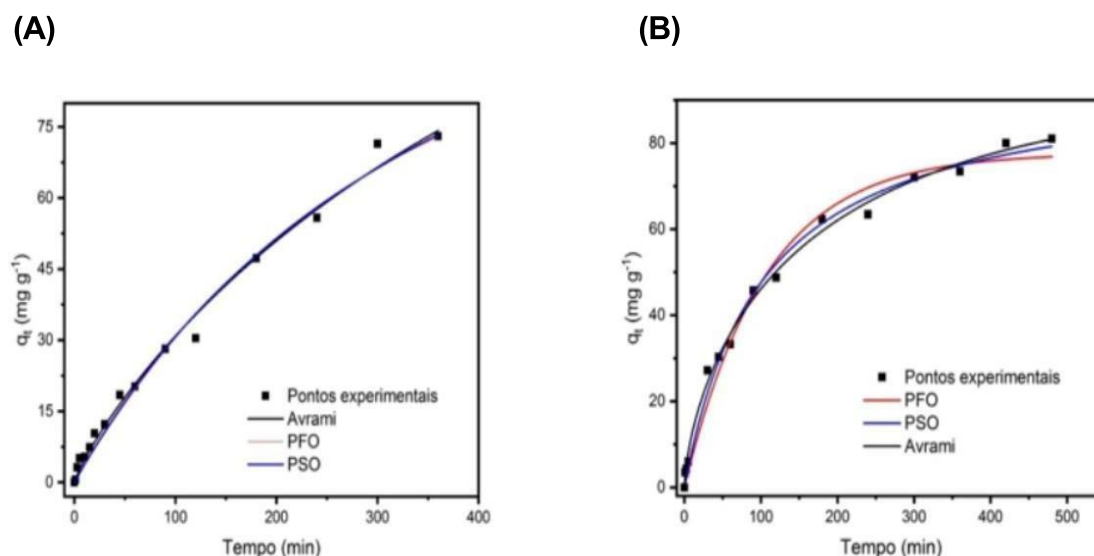
A seguir, apresentam-se a Tabela 4 e Figura 16, com os parâmetros cinéticos e curvas cinéticas obtidas para a adsorção dos corantes VR - 19 e AR - 114 utilizando CC como adsorvente.

Tabela 4. Parâmetros da Cinética de adsorção dos corantes VR - 19 e AR - 114 em CC.

	VR - 19	AR – 114
Pseudo-primeira ordem		
q_e (mg g ⁻¹)	99,72	77,61
k_1 (min ⁻¹)	0,00365	0,00948
R^2_{adj}	0,9986	0,9834
SD (mg g ⁻¹)	0,3046	2,296
BIC	-544,8	46,00
$t_{0,5}$ (min)	124,9	72,03
$t_{0,95}$ (min)	325,2	296,8
$\Delta BIC = BIC_{PPO} - BIC_{PSO}$	651,1	-23,1
$\Delta BIC = BIC_{PSO} - BIC_{OFA}$	-577,06	-16,6
Pseudo-segunda ordem		
q_e (mg g ⁻¹)	157,4	96,06
k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	0,0000154	0,000102
R^2_{adj}	0,9993	0,9923
SD (mg g ⁻¹)	0,4442	2,945
BIC	-1195,9	34,55
$t_{0,5}$ (min)	125,3	71,55
$t_{0,95}$ (min)	327,9	369,1

$\Delta BIC = BIC_{PSO} - BIC_{PPO}$	-651,1	23,1
$\Delta BIC = BIC_{PSO} - BIC_{OFA}$	-1228,16	6,5
Ordem fracionária de Avrami		
q_e (mg g ⁻¹)	145,8	94,88
k_{AV} (min ⁻¹)	0,00186	0,00546
n_{AV}	0,8559	0,6739
R^2_{adj}	0,9917	0,9955
SD (mg g ⁻¹)	0,0	7,363
BIC	32,26	28,05
$t_{0,5}$ (min)	128,3	76,59
$t_{0,95}$ (min)	330,5	388,6
$\Delta BIC = BIC_{OFA} - BIC_{PPO}$	577,06	16,6
$\Delta BIC = BIC_{OFA} - BIC_{PSO}$	1228,16	-6,5

Figura 16. Cinética de adsorção do corante (a) VR-19 e (b) AR-114 em CC. Condições: $C_0 = 100 \text{ mg L}^{-1}$, pH inicial= 2,0, massa de adsorvente = 20,0 mg, volume da solução= 20,00 mL, e temperatura= 25°C.



Fonte: Autoral

Três modelos cinéticos não lineares foram aplicados para avaliar os dados cinéticos de adsorção dos corantes VR-19 e AR-114 em CC: pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e ordem fracionária de Avrami. O modelo mais adequado para explicar a cinética de adsorção em CC foi selecionado por meio de uma análise estatística detalhada.

O poder preditivo de cada modelo foi avaliado utilizando critérios estatísticos: R^2_{adj} , SD e BIC. A Tabela 4 mostra que todos os modelos cinéticos demonstraram boa capacidade preditiva, com valores de R^2_{adj} de pelo menos 0,9917, valores de SD abaixo de 0,4442 e valores de BIC abaixo de 32,26 para o estudo envolvendo o corante VR-19; e de R^2_{adj} de pelo menos 0,9834, valores de SD abaixo de 7,363 e valores de BIC abaixo de 46,0 para a análise utilizando o corante AR-114 como adsorvato. No entanto, a utilização dessas ferramentas estatísticas permitiu determinar o modelo que melhor descreve os sistemas de adsorção envolvendo os diferentes corantes.

Ao analisar os parâmetros estimados e estatísticos, pode-se concluir que o modelo de pseudo-segunda ordem é o melhor modelo cinético não linear para descrever a adsorção de VR-19 em CC. Esse modelo apresentou valores de R^2_{adj}

mais próximos de 1, ou seja, $R^2_{adj} = 0,9993$, e valores de SD e BIC mais baixos, de 0,4442 e -1195,9, respectivamente, em comparação com os modelos de pseudo-primeira ordem e ordem fracionária de Avrami.

Dado que o modelo de ordem fracionária de Avrami apresentou valor de SD mais reduzido que o de pseudo-segunda ordem, o critério BIC foi utilizado, e a diferença $\Delta BIC = BIC_{OFA} - BIC_{PSO}$ foi de 1228,16. Para situações nas quais $\Delta BIC \geq 10,0$, pode-se prever com precisão que o modelo com menor valor de BIC, no caso, o modelo de pseudo-segunda ordem, é o melhor ajustado aos dados experimentais (Schwarz, 1978). O modelo de pseudo-segunda ordem prediz que a taxa de adsorção é proporcional ao quadrado do número de sítios de adsorção livres. Ainda, este considera que a taxa de adsorção depende da quantidade de adsorvato disponível e da quantidade já adsorvida (Wu et al., 2009).

Ao analisar os dados estimados e estatísticos para o caso em que se utilizou o corante AR-114, pode-se concluir que o modelo de ordem fracionária de Avrami é o que mais se ajusta aos dados experimentais. Esse modelo apresentou valores de $R^2_{adj} = 0,9955$, $SD = 7,363$ e $BIC = 28,05$. Como o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou menor valor de SD (2,945), o critério BIC também foi adotado, e a diferença $\Delta BIC = BIC_{PSO} - BIC_{OFA}$ foi de 6,5. Para situações nas quais $6 < \Delta BIC < 10$, há uma forte possibilidade de que o modelo com menor valor de BIC, ou seja, o de Avrami, seja o melhor modelo a ser ajustado (Schwarz, 1978). Esse modelo considera que diferentes processos cinéticos podem ocorrer durante a adsorção das moléculas do corante AR-114 sobre a superfície do adsorvente CC (De Azevedo et al., 2024).

Por meio da interpolação da curva de PSO para o caso em que foi utilizado o corante VR-19 e da curva de OFA para o caso em que se aplicou o corante AR-114, foi possível estimar os tempos esperados para o CC remover 50% (tempo de meia adsorção, $t_{0,50}$) e 95% (tempo próximo à saturação completa, $t_{0,95}$) dos corantes das soluções aquosas. Os valores de $t_{0,50}$ e $t_{0,95}$ para a adsorção de VR-19 foram estimados em 125,3 e 327,9 min, respectivamente. Já para o corante AR-114, os valores de $t_{0,50}$ e $t_{0,95}$ foram de 76,59 min e 388,6 min, respectivamente. Com base nesses resultados, é possível concluir que o adsorvente atinge a saturação em torno de 350–400 min. Tais tempos são interessantes, especialmente por se tratar de um material adsorvente preparado sem processos avançados de modificação estrutural.

Por fim, destaca-se que, para os testes seguintes do estudo isotérmico, a fim de garantir que ambos os sistemas alcançassem o equilíbrio, foram considerados tempos de contato adsorvato-adsorvente superiores a 12 h.

6.3 Estudo Isotérmico

Durante o processo de adsorção, ocorre uma distribuição do soluto entre as fases fluida e sólida, a qual pode ser medida considerando a concentração e a natureza do soluto, bem como a natureza da solução, entre outros fatores. As isotermas de adsorção representam o equilíbrio entre a concentração de um componente na fase fluida e a quantidade de partículas do adsorvente a uma temperatura específica (Bergmann; Machado, 2015). Essas isotermas indicam a quantidade (em mg) de adsorvato removida da fase líquida por unidade de massa de adsorvente (g).

Evidencia-se que o estudo do isotérmico é essencial para fornecer informações cruciais para avaliar a afinidade entre os corantes sintéticos aqui estudados e adsorvente CC, bem como a capacidade adsorção desse adsorvente.

Destaca-se que os experimentos de adsorção isotérmica foram realizados apenas a uma temperatura fixa de 25 °C, não sendo avaliada a influência da temperatura sobre o equilíbrio de adsorção.

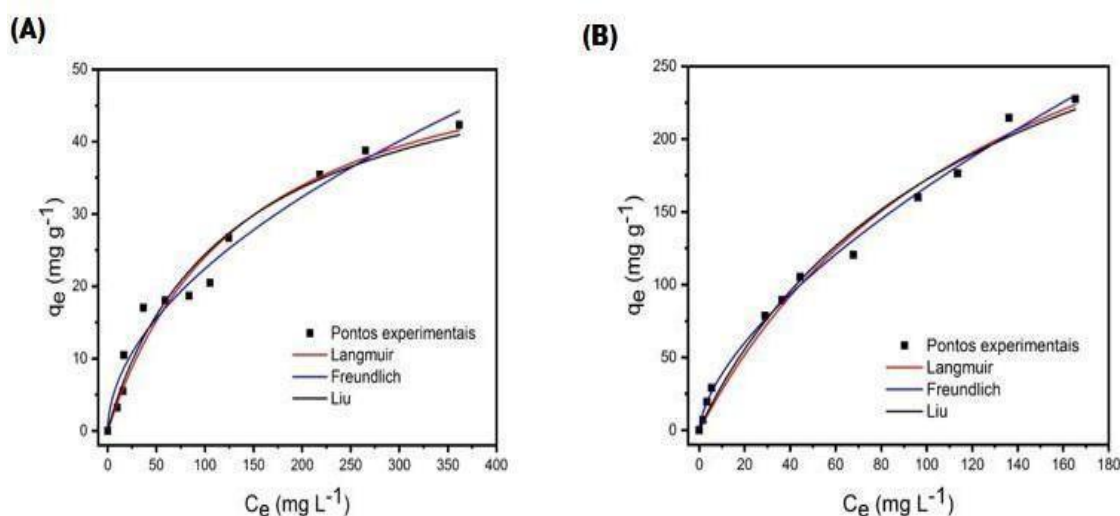
A seguir, na Tabela 5 e Figura 17, são apresentados os parâmetros isotérmicos e curvas isotérmicas obtidas para a adsorção dos corantes VR - 19 e AR - 114 utilizando CC como adsorvente.

Tabela 5 Parâmetros isotérmicos de adsorção dos corantes sintéticos VR - 19 e AR - 114 sobre o adsorvente CC.

	VR - 19	AR - 114
	Langmuir	
K_L (L mg ⁻¹)	0,00714	0,00724
Q_{max} (mg g ⁻¹)	57,69	410,2
R^2_{adj}	0,9616	0,9861

$SD\text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	5,849	47,47
BIC	29,36	59,04
$\Delta BIC = BIC_{\text{Langmuir}} -$		
$BIC_{\text{Freundlich}}$	2,88	11,55
$\Delta BIC = BIC_{\text{Langmuir}} - BIC_{\text{Liu}}$	0,67	0,78
Freundlich		
$K_F(\text{mg.g}^{-1}.\text{(mg.L}^{-1}\text{)}^{-1/n_F})$	1,963	8,946
n_F	1,891	1,573
R^2_{adj}	0,9698	0,9947
$SD\text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	2,420	5,821
BIC	26,48	47,54
$\Delta BIC = BIC_{\text{Freundlich}} -$		
BIC_{Langmuir}	-2,88	-11,55
$\Delta BIC = BIC_{\text{Freundlich}} - BIC_{\text{Liu}}$	-2,21	-10,72
Liu		
$K_g\text{ (L mg}^{-1}\text{)}$	0,00714	0,00724
n_L	0,9344	0,9521
$Q_{\text{max}}\text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	57,79	406,2
R^2_{adj}	0,9637	0,9870
$SD\text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	1,871	9,553
BIC	28,69	58,26
$\Delta BIC = BIC_{\text{Liu}} - BIC_{\text{Langmuir}}$	-0,67	-0,78
$\Delta BIC = BIC_{\text{Liu}} - BIC_{\text{Freundlich}}$	2,21	10,72

Figura 17. Isotermas de adsorção do corante (a) VR - 19 e (b) AR - 114 sobre o CC. Condições: tempo de contato = 12 h, pH inicial= 2,0, massa de adsorvente = 20,0 mg, volume da solução de corante= 20,00 mL, e temperatura= 25°C.



Fonte: Autoral

Três modelos não lineares de isotermas de adsorção – Langmuir, Freundlich e Liu – foram avaliados nos estudos isotérmicos utilizando os corantes VR-19 e AR-114. O desempenho desses modelos foi analisado por meio das métricas estatísticas R^2_{adj} , SD e BIC. A Tabela 4 mostra que todos os modelos apresentaram boa capacidade preditiva, com valores de R^2_{adj} de pelo menos 0,9616, SD inferiores a 5,849 e BIC abaixo de 29,36 no estudo com o corante VR-19. Para o corante AR-114, os valores de R^2_{adj} foram de pelo menos 0,9861, com SD abaixo de 47,47 e BIC inferior a 59,04.

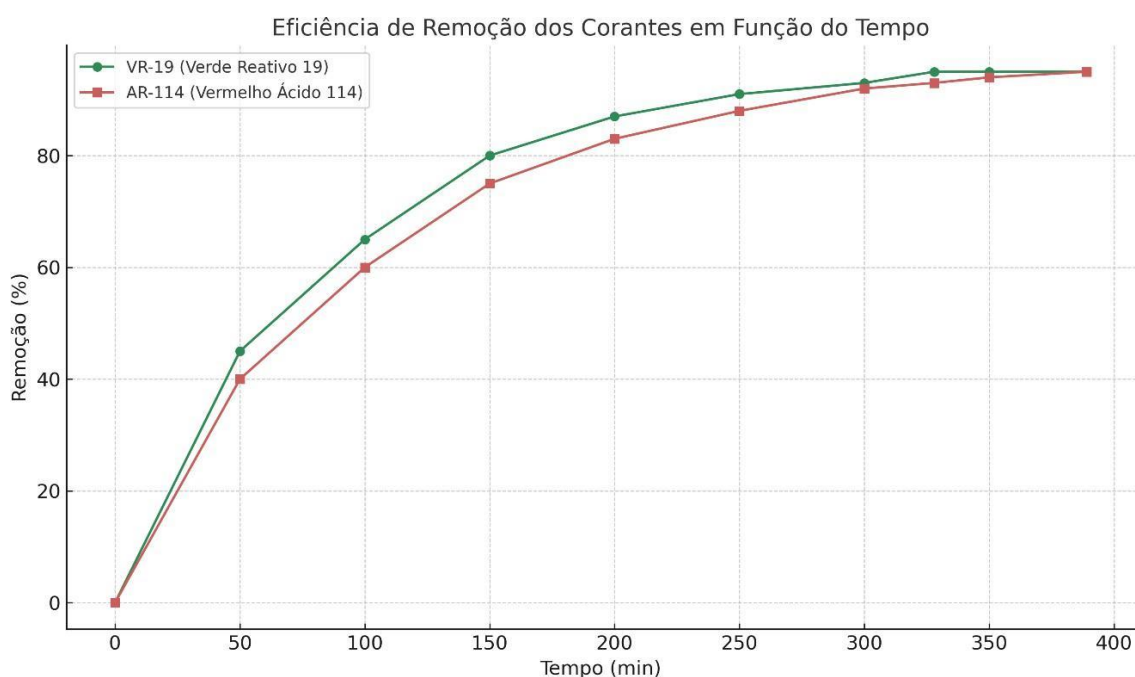
A análise dos parâmetros estimados e do desempenho estatístico dos modelos indica que os modelos de Freundlich e Liu foram os mais adequados para descrever os dados experimentais com o corante VR-19. O modelo de Freundlich apresentou R^2_{adj} de 0,9698, SD de 2,420 e BIC de 26,48, enquanto o modelo de Liu obteve R^2_{adj} de 0,9637, SD de 1,871 e BIC de 28,69. Como os modelos possuem ordens diferentes, mas apresentam desempenhos similares, foi adotado o critério de BIC. A diferença entre os valores de BIC ($\Delta BIC = BIC_{Liu} - BIC_{Freundlich}$) foi de 2,21. Segundo Schwarz (1978), quando $2 < \Delta BIC < 6$, há uma indicação positiva de que o modelo com menor BIC – nesse caso, o modelo de Freundlich – seja o mais adequado.

Todavia, ao analisar o desvio padrão dos dois modelos, é possível perceber que o modelo de Liu apresenta o menor desvio padrão, com o valor de 1,871. Isso nos leva a concluir que o modelo de Liu também pode explicar o mecanismo de adsorção do VR-19 na superfície do material CC. De fato, este modelo prevê que os sítios ativos do adsorvente não possuem a mesma energia. Portanto, o adsorvente pode apresentar sítios ativos preferenciais para a ocupação pelas moléculas de adsorvato (Liu et al., 2003). O que nos parece mais adequado do que o modelo de adsorção de capacidade infinita de Freundlich.

No estudo com o corante AR-114, o modelo de Freundlich foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, apresentando R^2_{adj} de 0,9947 e os menores valores de SD e BIC , de 5,821 e 47,54, respectivamente.

Conforme descrito anteriormente, o modelo de Freundlich assume que a concentração do adsorvato na superfície do adsorvente aumenta indefinidamente com o aumento da concentração do adsorvato na fase líquida (Freundlich, 1906). Ainda, esse modelo assume que a adsorção ocorre em multicamadas (Rathi; Kumar, 2021).

Figura 18: Eficiência de remoção dos corantes VR-19 e AR-114 ao longo do tempo de contato com o adsorvente de casca de camarão.



A Figura 18 apresenta a evolução do percentual de remoção dos corantes VR-19 e AR-114 em função do tempo de contato com o adsorvente de casca de camarão in natura. Observa-se que ambos os corantes apresentaram rápida remoção nas primeiras horas de contato, atingindo aproximadamente 95% de remoção ao final dos experimentos. Este comportamento indica uma alta afinidade inicial entre os corantes e a superfície do adsorvente, seguida por uma estabilização da capacidade de adsorção à medida que os sítios ativos disponíveis vão sendo ocupados. A alta eficiência de remoção obtida reforça o potencial do material preparado como adsorvente para tratamentos de efluentes contendo corantes sintéticos. Esses resultados embasam a discussão do mecanismo de adsorção apresentada a seguir.

6.4 Mecanismo de adsorção e comparação de eficiência

Um mecanismo de adsorção dos corantes VR-19 e AR-114 pelo adsorvente CC foi proposto. Na primeira etapa, as partículas de CC estão imersas em uma solução com $\text{pH} < \text{pH}_{\text{PZC}}$ ($\text{pH} 2,0$), hidroxila ($-\text{OH}$), carboxila ($-\text{COOH}$), amina ($-\text{NH}_2$) e grupos protonados, como $-\text{COOH}_2^+$ e $-\text{NH}_3^+$ (ver Figura 11) os principais grupos presentes no adsorvente protonado. Essa etapa é rápida.

Na segunda etapa, ocorre a separação dos aglomerados das moléculas dos corantes em solução aquosa. As moléculas de VR-19 e AR-114 estão em um estado organizado na solução aquosa, além de estarem hidratadas (Machado et al., 2011). Essa auto associação dos corantes em solução aquosa deve ser dissociada antes da adsorção. Além disso, as moléculas dos corantes sintéticos devem ser desidratadas antes de serem adsorvidas. Para ambos os corantes, essa etapa é relativamente rápida.

Na terceira etapa, ocorre, possivelmente, a atração eletrostática entre os grupos sulfônicos ($-\text{SO}_3^-$) e azo ($-\text{N}=\text{N}-$) das moléculas dos corantes VR-19 e AR-114, carregadas negativamente, e a superfície do CC, carregada positivamente em $\text{pH} 2,0$. Esse último passo deve ser a etapa de taxa controlada.

7. CONCLUSÕES

Com este estudo foi possível demonstrar o potencial promissor da biomassa de casca de camarão, especificamente da espécie *Farfantepenaeus paulensis*, como material adsorvente para a remoção eficiente de corantes sintéticos em soluções aquosas.

A metodologia ambientalmente amigável adotada, que envolveu o processamento da biomassa *in natura* através de secagem, lavagem e trituração, resultou em um material com características físicas, químicas e morfológicas adequadas para a adsorção de contaminantes.

Os resultados experimentais de adsorção evidenciaram a eficiência do adsorvente preparado com casca de camarão na remoção de corantes Verde Reativo 19 e Vermelho Ácido 114.

O modelo não linear de pseudo-segunda ordem mostrou-se o mais adequado para descrever a cinética de adsorção do corante VR-19 em CC. Já para o corante AR-114, o modelo de ordem fracionária de Avrami apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. Para ambos os casos, a cinética de adsorção se mostrou relativamente lenta, alcançando o equilíbrio até 400 min.

Nos estudos isotérmicos, os modelos de Freundlich e Liu foram os mais apropriados para descrever a adsorção do corante VR-19, enquanto, para o corante AR-114, o modelo de Freundlich mostrou o melhor ajuste.

Com base nos estudos de adsorção e nas características dos corantes e do adsorvente, foi possível propor um mecanismo de adsorção fundamentado na atração eletrostática entre os grupos sulfônicos ($-\text{SO}_3^-$) e azo ($-\text{N}=\text{N}-$) dos corantes VR-19 e AR-114, carregados negativamente, e a superfície do CC, carregada positivamente em pH 2,0.

Os resultados obtidos comprovam que a casca de camarão é uma alternativa viável e sustentável para a produção de materiais adsorventes, contribuindo não apenas para o tratamento de águas contaminadas, mas também para a valorização de um resíduo pouco explorado da indústria pesqueira.

Além disso, este trabalho está diretamente alinhado com vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 6 - Água potável e saneamento, ao contribuir para a melhoria da qualidade da água por meio da remoção de corantes sintéticos; o ODS 12 - Produção e consumo responsáveis, ao utilizar um resíduo da

indústria pesqueira para produzir materiais adsorventes de baixo custo e alto desempenho; o ODS 14 - Vida na água, ao ajudar na conservação dos ecossistemas aquáticos ao tratar águas contaminadas; e o ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima, ao promover o uso de biomassa de origem renovável, reduzindo a necessidade de materiais sintéticos e ajudando na diminuição da pegada de carbono.

Dessa forma, este estudo não só evidencia a viabilidade da utilização da biomassa de camarão como um adsorvente sustentável e eficiente, mas também oferece uma solução inovadora para a remediação de águas contaminadas, alinhando-se com as necessidades globais de sustentabilidade e redução de impactos ambientais. A pesquisa abre novas possibilidades para o aproveitamento de resíduos orgânicos em processos de descontaminação, promovendo a economia circular e o desenvolvimento de tecnologias ambientais mais eficazes e acessíveis.

8. Sugestões de trabalhos futuros

- a) Realizar estudos cinéticos utilizando diferentes concentrações de corantes;
- b) Realizar estudos isotérmicos em diferentes temperaturas;
- c) Com o objetivo de elucidar os processos de adsorção envolvidos, realizar estudos termodinâmicos;
- d) Realizar um estudo de adsorção com o CC utilizando um efluente real;
- e) Modificação superficial do adsorvente.

9. Produção Científica

9.1 Artigos completos publicados em periódicos

1. RODRIGUES, DANIEL LUCAS COSTA; FUHR, ANA CAROLINA FERREIRA PIAZZI; GUIDO, JÚLIA AMARAL; DE AZEVEDO, CRISTIANE FERRAZ; MEDRAN RANGEL, ADRIZE; DOTTO, GUILHERME LUIZ; ALOMAR, SULIMAN YOUSEF; MACHADO, FERNANDO MACHADO. Olive biomass-derived magnetic activated biochar for ciprofloxacin removal: Integrated kinetic, isotherm, thermodynamic, and spectroscopic analysis. *Separation and Purification Technology*, v. 360, p. 131014, 2025. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.131014.
2. MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; MEDRAN RANGEL, ADRIZE ; FERNANDES E SILVA, ESTELA ; KASTER GARCEZ, DAIANA . Produção de maquetes sobre biomas e poluição ambiental utilizando materiais recicláveis. *Journal of Education Science and Health*, v. 4, p. 01-09, 2024. DOI: 10.52832/jesh.v4i3.231
3. MEDRAN RANGEL, ADRIZE; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; MACHADO MACHADO, FERNANDO . Adsorvente preparado a partir da biomassa de casca de camarão para remoção de contaminantes ambientais. *REVISTA PERSPECTIVA (ONLINE)*, v. 47, p. 31-40, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31512/persp.v.47.n.180.2023.376.p.31-40>
4. MEDRAN RANGEL, ADRIZE; MEDRAN RANGEL, EDUARDA . O lúdico no ensino de matemática: o uso de jogos didáticos como método complementar do processo de ensino-aprendizagem. *Journal of Education Science and Health*, v. 3, p. 1, 2023. DOI: 10.52832/jesh.v3i1.187
5. KASTER GARCEZ, DAIANA ; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; FERNANDES E SILVA, ESTELA ; LASTE MACAGNAN, KARINE ; MEDRAN RANGEL, ADRIZE ; VARGAS RIBEIRO, LOUISE ; FIGUEIREDO CARDOSO, TAINÃ . Relato de experiência sobre a prática pedagógica em ciências: em busca de uma docência reflexiva. *Journal of Education Science and Health*, v. 3, p. 01-08, 2023. DOI: 10.52832/jesh.v3i2.193
6. PEREIRA, PATRÍCIA DE BORBA ; RANGEL, EDUARDA MEDRAN ; RANGEL, ADRIZE MEDRAN ; STARK, FERNANDA WICKBOLDT ; CORRÊA, LUCIARA BILHALVA . Destinação final de acervos de biblioteca: uma questão ambiental. *Revista Eletrônica Multidisciplinar de Investigação Científica*, v. 2, p. 1-8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56166/remici.239v2n9169>
7. MEDRAN RANGEL, ADRIZE; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; WICKBOLDT STARK, FERNANDA ; DE BORBA PEREIRA, PATRÍCIA ; MACHADO MACHADO, FERNANDO . The use of biochar for removal of emerging contaminants in contaminated water. *Journal of Interdisciplinary Debates*, v. 4, p. 62-82, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51249/jid.v4i03.1471>
8. FERNANDES E SILVA, ESTELA ; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; KASTER GARCEZ, DAIANA ; MACAGNAN, K. L. ; RANGEL, ADRIZE MEDRAN ; RIBEIRO, L. V. ; SILVA, P. F. E. ; CARDOSO, T. F. ; RICO, T. M. . Docking molecular: uma

ferramenta valiosa para determinar a toxicidade do metil mercúrio em seres humanos. Journal of Education, Science and Health - JESH, v. 3, p. 1, 2023. DOI: 10.52832/jesh.v3i2.192

9. MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; MEDRAN RANGEL, ADRISE ; MACHADO MACHADO, FERNANDO . Antidepressivos: do descarte incorreto aos danos ambientais. Journal of Research in Medicine and Health, v. 1, p. 01-12, 2023. DOI: 10.52832/jormed.v1i.223

10. RANGEL, ADRISE MEDRAN; STARK, FERNANDA WICKBOLDT ; PEREIRA, PATRÍCIA DE BORBA ; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; CASTRO, A. S. Os 3r's aplicados ao plástico: uma revisão sobre a redução, reutilização e reciclagem do plástico em tecnologias ambientais. CIÊNCIA & TROPICO, v. 47, p. 139-158, 2023. DOI: [https://doi.org/10.33148/CETROPv47n2\(2023\)art8](https://doi.org/10.33148/CETROPv47n2(2023)art8)

11. RANGEL, A. M.; STARK, FERNANDA WICKBOLDT ; P, P.B ; RANGEL, E. M ; CASTRO, A. S. . Os 3Rs aplicados ao plástico: Uma revisão sobre a Redução, Reutilização e Reciclagem do plástico em tecnologias ambientais. CIÊNCIA & TROPICO, v. 47, p. 139-158, 2023. DOI: [https://doi.org/10.33148/CETROPv47n2\(2023\)art8](https://doi.org/10.33148/CETROPv47n2(2023)art8)

12. RANGEL, EDUARDA MEDRAN ; RANGEL, ADRISE MEDRAN ; MACHADO, FERNANDO MACHADO . Use of organic waste for the production of adsorbents. Dataset Reports, v. 2, p. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.58951/dataset.2023.47>

13. MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; FERNANDES E SILVA, ESTELA ; KASTER GARCEZ, DAIANA ; LASTE MACAGNAN, KARINE ; MEDRAN RANGEL, ADRISE ; VARGAS RIBEIRO, LOUISE ; FERNANDES E SILVA, PAULA ; FIGUEIREDO CARDOSO, TAINÃ . Análise da interação do contaminante metilmercúrio com hemoglobina do peixe matrinxã Brycon cephalus (Günther, 1869). Journal of Education Science and Health, v. 2, p. 1-6, 2022. Doi: [10.52832/jesh.v2i2.132](https://doi.org/10.52832/jesh.v2i2.132)

14. MEDRAN RANGEL, ADRISE; MEDRAN RANGEL, EDUARDA. O LÚDICO NO ENSINO DE MATEMÁTICA: : O USO DE JOGOS DIDÁTICOS COMO MÉTODO COMPLEMENTAR DO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM. Journal of Education Science and Health, v. 3, p. 1, 2023. DOI: 10.52832/jesh.v3i1.187

9.2 Capítulos de livros publicados

1. RANGEL, ADRISE MEDRAN; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; MACHADO, FERNANDO MACHADO ; STARK, FERNANDA WICKBOLDT ; DE BORBA PEREIRA, PATRÍCIA. Os danos causados por contaminantes emergentes na biodiversidade aquática. Pesquisas em Ecologia e Sustentabilidade. 1ed.: , 2024, v. 1, p. 1-125. DOI:10.52832/wed.67.412

2. GUIDO, JÚLIA AMARAL ; RANGEL, EDUARDA MEDRAN ; RANGEL, ADRISE MEDRAN ; MACHADO, FERNANDO MACHADO . Presença e danos causados por microplásticos em organismos aquáticos. Sustentabilidade do futuro: livro de memórias do Sustentare & WIPIS. 2ed.: Even3 Publicações, 2024, v. , p. 2-. DOI: 10.29327/sustentare-wipis-2023-e-book-422831.788719

3. RANGEL, ADRIZE MEDRAN; RANGEL, EDUARDA MEDRAN ; MACHADO, FERNANDO MACHADO. O cerzir entre os ods e adsorventes produzidos com resíduo pesqueiro. Sustentabilidade do futuro: livro de memórias do Sustentare & WIPIS. 3ed.: Even3 Publicações, 2024, v. , p. 3-. DOI: 10.29327/sustentare-wipis-2023-e-book-422831.788673
4. Stark, Fernanda Wichbolt ; RANGEL, EDUARDA MEDRAN ; RANGEL, ADRIZE MEDRAN ; PEREIRA, PATRÍCIA DE BORBA . Construção de um tratamento do tipo wetland em uma propriedade rural utilizando a espécie *Zantedeschia aethiopica*: uma experiência profissional. Estudos em Biologia: do ensino à pesquisa. 1ed.: Wissen Editora, 2024, v. , p. 139-154. DOI: <https://doi.org/10.52832/wed.63>
5. RANGEL, EDUARDA MEDRAN ; RANGEL, ADRIZE MEDRAN ; Guido, Júlia Amaral ; Nascimento, Augusto Santos do ; Santos, Gabriel Almeida Dos ; SOUZA, NICHOLAS FERNANDES DE ; AZEVEDO, CRISTIANE FERRAZ DE ; MACHADO, FERNANDO MACHADO. Hidrochar produzido a partir de resíduo agroindustrial para remoção de corante aniônico em solução aquosa. Sustentabilidade do futuro: livro de memórias do Sustentare & WIPIS. 1ed.: ,Even3 Publicações, 2024, v. , p. 1-. DOI:10.29327/sustentare-wipis-2023-e-book-422831.788757
6. MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; RANGEL, ADRIZE MEDRAN ; DE BORBA PEREIRA, PATRÍCIA ; STARK, FERNANDA WICKBOLDT ; MACHADO, FERNANDO MACHADO . Efeitos do microplásticos no meio ambiente. Meio Ambiente: Gestão, Preservação e Desenvolvimento Sustentável. 4ed.: 2023, v. 4, p. 1-406. DOI 10.47402/ed.ep.c2311415211515
7. FERNANDES E SILVA, PAULA ; MEDRAN RANGEL, EDUARDA ; FERNANDES E SILVA, ESTELA ; RANGEL, A. M. ; KASTER GARCEZ, DAIANA ; LASTE MACAGNAN, KARINE ; VARGAS RIBEIRO, LOUISE ; FIGUEIREDO CARDOSO, TAINÃ . Insetos polinizadores: uma questão de sobrevivência das espécies. In: Junielson Soares da Silva. (Org.). Pesquisas em entomologia: aspectos gerais. 1ed.: , 2022, v. 1, p. 11-18. DOI: 10.52832/wed.24

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEGUNDE, Segun Michael; IDOWU, Kayode Solomon; ADEJUWON, Olorunsola Morayo; ADEYEMI-ADEJOLU, Tinuade. A review on the influence of chemical modification on the performance of adsorbents. **Resources, Environment And Sustainability**, v. 1, p. 100001, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100001>.

ABDEL-FADEEL, Mohamed A.; ALJOHANI, Naif S.; AL-MHYAWI, Saedah R.; HALAWANI, Riyadh F.; ALJUHAN, Enas H.; SALAM, Mohamed Abdel. A simple method for removal of toxic dyes such as Brilliant Green and Acid Red from the aquatic environment using Halloysite nanoclay. **Journal Of Saudi Chemical Society**, v. 26, n. 3, p. 101475, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101475>.

ABUELNOOR, Nada; ALHAJAJ, Ahmed; KHALEEL, Maryam; VEGA, Lourdes F.; ABU-ZAHRA, Mohammad R.M.. Activated carbons from biomass-based sources for CO₂ capture applications. **Chemosphere**, v. 282, p. 131111, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131111>.

AHMAD, Azhan; PRIYADARSHINI, Monali; YADAV, Shraddha; GHANGREKAR, Makarand M.; SURAMPALLI, Rao Y. The potential of biochar-based catalysts in advanced treatment technologies for efficacious removal of persistent organic pollutants from wastewater: a review. **Chemical Engineering Research And Design**, v. 187, p. 470-496, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2023.05.024>.

ALAKA SAMAL; DAS, P. An Effective Strategy for the Photocatalytic Elimination of Industrial Wastewaters Via MgFe-LDH/TiO₂ Heterojunctions. **International Journal For Multidisciplinary Research**, v. 6, n. 1, 20 jan. 2024. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i01.12289>

ALI, Eeman; AMJAD, Ifrah; REHMAN, Abdul. Evaluation of azo dyes degradation potential of fungal strains and their role in wastewater treatment. **Saudi Journal Of Biological Sciences**, v. 30, n. 8, p. 103734, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103734>.

ALMOISHEER, Noha; ALSEROURY, F. A.; KUMAR, Rajeev; ASLAM, M.; BARAKAT, M. A.. Adsorption and anion exchange insight of indigo carmine onto CuAl- LDH/SWCNTs nanocomposite: kinetic, thermodynamic and isotherm analysis. **Rsc Advances**, v. 9, n. 1, p. 560-568, 2019. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c8ra09562k>.

AL-TOHAMY, Rania; ALI, Sameh S.; LI, Fanghua; OKASHA, Kamal M.; MAHMOUD, Yehia A.-G.; ELSAMAHY, Tamer; JIAO, Haixin; FU, Yinyi; SUN, Jianzhong. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, v. 231, p. 113160, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>.

ALQARNI, Sara A.. The Performance of Different AgTiO₂ Loading into Poly(3-Nitrothiophene) for Efficient Adsorption of Hazardous Brilliant Green and Crystal Violet Dyes. **International Journal Of Polymer Science**, v. 2022, p. 1-17, 5 jan. 2022. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/4691347>.

AMARASINGHE, B. M. W. P. K.; WILLIAMS, R. A. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 132, n. 1-3, p. 299–309, ago. 2007.

ANGIN, D.; ALTINTIG, E.; KÖSE, T. E. Influence of process parameters on the surface and chemical properties of activated carbon obtained from biochar by chemical activation. **Bioresource Technology**, v. 148, p. 542–549, nov. 2013.

ARABANI, Mahyar; FARKHONDEH, Janat. Evaluation of rheological and microstructural behavior of modified asphalt binder with chitosan derived from shrimp shell powder. **Results In Engineering**, v. 23, p. 102758, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102758>.

APPEL, Chip et al. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. **Geoderma**, v. 113, n. 1- 2, p. 77–93, 2003.

AQUINO, José M.; ROCHA-FILHO, Romeu C.; RUOTOLO, Luís A.M.; BOCCHI, Nerilso; BIAGGIO, Sonia R.. Electrochemical degradation of a real textile wastewater using β -PbO₂ and DSA® anodes. **Chemical Engineering Journal**, v. 251, p. 138- 145, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.032>.

ARTIFON, Wagner; CESCO, Karina; ANDRADE, Cristiano José de; SOUZA, Antônio Augusto Ulson de; OLIVEIRA, Débora de. Dyestuffs from textile industry wastewaters: trends and gaps in the use of bioflocculants. **Process Biochemistry**, v. 111, p. 181- 190, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2021.10.030>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE CAMARÃO. O Piauí é um dos três estados que mais produzem camarão atualmente. Parnaíba: **ABCC Online**, 2016. Disponível em: < <http://abccam.com.br/site/author/abcc/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BANJERDTEERAKUL, Kornkamol; PENG, Hao; LI, Kang. COF-based nanofiltration membrane for effective treatment of wastewater containing pharmaceutical residues. **Journal Of Membrane Science**, v. 681, p. 121780, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121780>.

BARRETT, E. P.; JOYNER, L. G.; HALENDA, P. P. The Determination of Pore Volume and

Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. **Journal of the American Chemical Society**, v. 73, n. 1, p. 373–380, 1951. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01145a126>.

BARSOTTI, Elizabeth; TAN, Sugata P.; PIRI, Mohammad; CHEN, Jin-Hong. Capillary-condensation hysteresis in naturally-occurring nanoporous media. **Fuel**, v. 263, p. 116441, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116441>.

BEANEY, Paul; LIZARDI-MENDOZA, Jaime; HEALY, Michael. Comparison of chitins produced by chemical and bioprocessing methods. **Journal Of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 80, n. 2, p. 145-150, 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.1164>.

BERHANE, Tedros M.; LEVY, Jonathan; KREKELER, Mark P.s.; DANIELSON, Neil D. Adsorption of bisphenol A and ciprofloxacin by palygorskite-montmorillonite: effect of granule size, solution chemistry and temperature. **Applied Clay Science**, v. 132- 133, p. 518-527, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.023>.

BERGMANN, C. P.; MACHADO, F. M. Carbon Nanomaterials as Adsorbents for Environmental and Biological Applications. Cham: **Springer International Publishing**, 2015.

BOUDOUAIA, N.; BENGHAREZ, Z.; JELLALI, S. Preparation and characterization of chitosan extracted from shrimp shells waste and chitosan film: application for Eriochrome black T removal from aqueous solutions. *Applied Water Science*, v. 9, n. 4, 13 maio 2019.

BESSLER, Karl E.; RODRIGUES, Laécio C. Os polimorfos de carbonato de cálcio: uma síntese fácil de aragonita. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 178-180, 2008.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938.
Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01269a023>.

CALVETE, T., Lima, E. C., Cardoso, N. F., Dias, S. L. P., Pavan, F. A. (2009). Application of carbon adsorbents prepared from the Brazilian-pine fruit shell for removal of Procion Red MX 3B from aqueous solution - kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. **Chem. Eng. J.**, 155, 627-636.

CARNEIRO, Patricia A.; UMBUZEIRO, Gisela A.; OLIVEIRA, Danielle P.; ZANONI, Maria Valnice B.. Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1-3, p. 694-699, fev. 2010. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.106>.

CASTILLO-ZACARÍAS, Carlos; BAROCIO, Mario E.; HIDALGO-VÁZQUEZ, Enrique; SOSA-HERNÁNDEZ, Juan Eduardo; PARRA-ARROYO, Lizeth; LÓPEZ-PACHECO, Itzel Y.; BARCELÓ, Damià; IQBAL, Hafiz N.M.; PARRA-SALDÍVAR, Roberto. Antidepressant drugs as emerging contaminants: occurrence in urban and non-urban waters and analytical methods for their detection. **Science Of The Total Environment**, v. 757, p. 143722, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143722>.

CHEN, Siyuan; CAI, Haiming; DU, Xiaodong; WU, Peiwen; TAO, Xueqin; ZHOU, Jiangmin; DANG, Zhi; LU, Guining. Adsorption behavior of hierarchical porous biochar from shrimp shell for tris(2-chloroethyl) phosphate (TCEP): sorption experiments and dft calculations. **Environmental Research**, v. 219, p. 115128, fev. 2023. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2022.115128>.

CHOY, Keith K.H.; PORTER, John F.; MCKAY, Gordon. Intraparticle diffusion in single and multicomponent acid dye adsorption from wastewater onto carbon. **Chemical**

Engineering Journal, v. 103, n. 1-3, p. 133-145, out. 2004. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2004.05.012>.

CHUNG, King-Thom. Azo dyes and human health: a review. **Journal Of Environmental Science And Health, Part C**, v. 34, n. 4, p. 233-261, 16 set. 2016. Informa UK Limited.

<http://dx.doi.org/10.1080/10590501.2016.1236602>.

DAI, Lichun; TAN, Furong; LI, Hong; ZHU, Nengmin; HE, Mingxiong; ZHU, Qili; HU, Guoquan; WANG, Li; ZHAO, Jie. Calcium-rich biochar from the pyrolysis of crab shell for phosphorus removal. **Journal Of Environmental Management**, v. 198, p. 70-74, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.057>.

DAI, Lichun; ZHU, Wenkun; HE, Li; TAN, Furong; ZHU, Nengmin; ZHOU, Qin; HE, Mingxiong; HU, Guoquan. Calcium-rich biochar from crab shell: an unexpected super adsorbent for dye removal. **Bioresource Technology**, v. 267, p. 510-516, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.090>.

DAI, Lichun; TAN, Furong; LI, Hong; ZHU, Nengmin; HE, Mingxiong; ZHU, Qili; HU, Guoquan; WANG, Li; ZHAO, Jie. Calcium-rich biochar from the pyrolysis of crab shell for phosphorus removal. **Journal Of Environmental Management**, v. 198, p. 70-74, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.057>.

DAI, Lichun; ZHU, Wenkun; HE, Li; TAN, Furong; ZHU, Nengmin; ZHOU, Qin; HE, Mingxiong; HU, Guoquan. Calcium-rich biochar from crab shell: an unexpected super adsorbent for dye removal. **Bioresource Technology**, v. 267, p. 510-516, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.090>.

DAI, Lichun; LU, Qian; ZHOU, Haiqin; SHEN, Fei; LIU, Zhengang; ZHU, Wenkun; HUANG, Huagang. Tuning oxygenated functional groups on biochar for water pollution

control: a critical review. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 420, p. 126547, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126547>.

DAS, M., GHOSH, S., B.; Trace, G.; Maheswarudu, M.V. Hanumanth Rao, O.C.H. Venkatheswarlu. Multifaceted Utilization of Shrimp Waste in Visakhapatnam Marine Fisheries Information **Service T&E Ser** (2013) No. 216

DEY, Subhashish; NAGABABU, Bommu Hema. Applications of food color and bio-preservatives in the food and its effect on the human health. **Food Chemistry Advances**, v. 1, p. 100019, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.focha.2022.100019>.

DIÓGENES, A. R. Shrimp traps, fisherwomen and harness: artisanal shrimp fishing and environmental conservation in floodplain communities in the municipality of Paritins-AM. 2014. 139p. Dissertation (**Master in Environmental Sciences and gest. scare ambient., Florianópolis**, v. 8, no. 3, p. 499-520, Jul/Sept. 2019. Sustainability in the Amazon) – Federal University of Amazonas, Parintins-AM, 2014.

DJILANI, Chahrazed; ZAGHDOUDI, Rachida; DJAZI, Fayçal; BOUCHEKIMA, Bachir; LALLAM, Abdelaziz; MODARRESSI, Ali; ROGALSKI, Marek. Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, v. 53, p. 112-121, ago. 2015. Elsevier BV.

DOLTADE, Sarjerao Bapu; YADAV, Yogesh Jawaharlal; JADHAV, Nilesh Lakshaman. Industrial wastewater treatment using oxidative integrated approach. **South African Journal Of Chemical Engineering**, v. 40, p. 100-106, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.004>.

DONOHUE, M.D.; ARANOVICH, G.L.. Adsorption Hysteresis in Porous Solids. **Journal Of Colloid And Interface Science**, v. 205, n. 1, p. 121-130, set. 1998. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.1998.5639>.

DUTTA, Subhasish; BHATTACHARJEE, Joyani. A comparative study between physicochemical and biological methods for effective removal of textile dye from wastewater. **Development In Wastewater Treatment Research And Processes**, p. 1-21, 2022. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-85657-7.00003-1>.

EBELEGI, A. N.; AYAWEL, N.; WANKASI, D. Interpretation of Adsorption Thermodynamics and Kinetics. **Open Journal of Physical Chemistry**, v. 10, n. 03, p. 166–182, 2020.

ELGARAHY, A.M.; ELWAKEEL, K.Z.; MOHAMMAD, S.H.; ELSHOUBAKY, G.A.. A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. **Cleaner Engineering And Technology**, v. 4, p. 100209, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2021.100209>.

EVERS, D.J; CARROLL, D.J. Ensiling salt-preserved shrimp waste with grass straw and molasses. **Animal Feed Science And Technology**, v. 71, n. 3-4, p. 241-249, abr. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-8401\(97\)00145-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-8401(97)00145-4).

FANFAN, Liang; YUNGEN, Liu; YAN, Wang; SILIN, Yang; RONG, Ma. Preparation of structured biochar, its adsorption capacity of N and P and its characterization. **Water Science And Technology**, v. 85, n. 9, p. 2443-2462, 28 abr. 2022. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2022.143>.

FENG, Wei; XIE, Lei; ZHANG, Jin; ZHANG, Yujun; ZHANG, Yanning. Self-validated Story Segmentation of Chinese Broadcast News. **Advances In Brain Inspired Cognitive Systems**, p. 568-578, 2018. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-00563-4_55.

FENG, Tao; YI, Tan; WANG, Qiaobing; LI, Pengwei. Shrimp shells-derived biochar for efficient adsorption of Pb²⁺ in aqueous solutions. **Desalination And Water**

Treatment, v. 233, p. 106-117, set. 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2021.27558>.

FISCHER, Helen Caroline Valter; LIMA, Lilliane Schier de; FELSNER, Maria Lurdes; QUINAIA, Sueli Percio. Estudo da capacidade de adsorção de carvões ativados comerciais versus tempo de armazenamento. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1090- 1099, 30 set. 2019. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509838092>.

FREUNDLICH, Herbert. Über die Adsorption in Lösungen. **Zeitschrift Für Physikalische Chemie**, v. 57, n. 1, p. 385-470, 1 out. 1907. Walter de Gruyter GmbH.
<http://dx.doi.org/10.1515/zpch-1907-5723>.

GBENEBOR, O.P.; ADEOSUN, S.O.; LAWAL, G.I.; JUN, S.; OLALEYE, S.A.. Acetylation, crystalline and morphological properties of structural polysaccharide from shrimp exoskeleton. **Engineering Science And Technology, An International Journal**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 1155-1165, jun. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2017.05.002>.

GEISSEN, Violette; MOL, Hans; KLUMPP, Erwin; UMLAUF, Günter; NADAL, Marti; PLOEG, Martine van Der; ZEE, Sjoerd E.A.T.M. van de; RITSEMA, Coen J.. Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. **International Soil And Water Conservation Research**, v. 3, n. 1, p. 57-65, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>.

GHANBARI, Farshid; MORADI, Mahsa. Application of peroxymonosulfate and its activation methods for degradation of environmental organic pollutants: review. **Chemical Engineering Journal**, v. 310, p. 41-62, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.064>.

Global Commission on Adaptation, 2019: Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience, accessed 25 November 2023,
<https://reliefweb.int/report/world/adapt-now-global-call-leadership-climate-resilience>

GUIJARRO, A; HERNANDEZ, M. V.; BONILLA, P. A., MONTES, M. M., MENDOZA, C., D. Improving the Adsorption of Heavy Metals from Water Using Commercial Carbons Modified with Egg Shell Waste. *Industrial Engineering Chemistry. Research*. v.50, n.15, p.9354-9362, jun. 2011.

GUO, Jian; SONG, Yaqin; JI, Xiaoyang; JI, Lili; CAI, Lu; WANG, Yaning; ZHANG, Hailong; SONG, Wendong. Preparation and Characterization of Nanoporous Activated Carbon Derived from Prawn Shell and Its Application for Removal of Heavy Metal Ions. *Materials*, v. 12, n. 2, p. 241, 12 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12020241>.

HAMED, Imen; ÖZOGUL, Fatih; REGENSTEIN, Joe M.. Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): a review. *Trends In Food Science & Technology*, v. 48, p. 40-50, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.007>.

HAMID, Yasir; LIU, Lei; USMAN, Muhammad; NAIDU, Ravi; HARIS, Muhammad; LIN, Qiang; ULHASSAN, Zaid; HUSSAIN, M. Iftikhar; YANG, Xiaoe. Functionalized biochars: synthesis, characterization, and applications for removing trace elements from water. *Journal Of Hazardous Materials*, v. 437, p. 129337, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129337>.

HAN, Li-Juan; GE, Fa-Yuan; SUN, Guo-Hao; GAO, Xiang-Jing; ZHENG, He-Gen. Effective adsorption of Congo red by a MOF-based magnetic material. *Dalton Transactions*, v. 48, n. 14, p. 4650-4656, 2019. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c9dt00813f>.

HANBING, W.; HAASE, H.; MAHLTIG, B. Cationic Pretreatment for Reactive Dyeing of Cotton and its Simultaneous Antibacterial Functionalisation. *TEKSTILEC*, v. 63, n. 1, p. 27–37, 5 mar. 2020. <https://doi.org/10.14502/tekstilec2020.63.27-37>

HASSAN, Mohammad M.; CARR, Christopher M.. A critical review on recent advancements

of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion- exchange adsorbents. **Chemosphere**, v. 209, p. 201-219, out. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043>.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, v. 34, n. 5, p. 451–465, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção de Camarão. IBGE, 2014.
Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2014_v4_2_br.pdf>.

JACKSON, C. Arcabouços de quitosana/agente antineoplásico: síntese, caracterização e aplicação. Ufcg.edu.br, 2017.

Ji, C., Yang, S., Cheng, Y., Liu, L., Wang, D., Zhu, S., E, T., & Li, Y. (2023). In situ formed CaSO₄ on waste dander biochar to inhibit the mineralization of soil organic carbon. **Science of the Total Environment**, 854, 158776.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158776>

KANAKARAJU, Devagi; GLASS, Beverley D.; OELGEMÖLLER, Michael. Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: a review. **Journal Of Environmental Management**, v. 219, p. 189-207, ago. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.103>.

KARNIB, Mona; KABBANI, Ahmad; HOLAIL, Hanafy; OLAMA, Zakia. Heavy Metals Removal Using Activated Carbon, Silica and Silica Activated Carbon Composite. **Energy Procedia**, v. 50, p. 113-120, 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.014>.

KAYA, S. Irem; CETINKAYA, Ahmet; OZKAN, Sibel A.. Latest advances on the nanomaterials-based electrochemical analysis of azo toxic dyes Sunset Yellow and Tartrazine in food samples. **Food And Chemical Toxicology**, v. 156, p. 112524, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2021.112524>.

KHAJAVIAN, Mohammad; SHAHSAVARIFAR, Samaneh; SALEHI, Ehsan; VATANPOUR, Vahid; MASTERI-FARAHANI, Majid; GHAFFARI, Fahimeh; TABATABAEI, Seyed Ali. Ethylenediamine-functionalized ZIF-8 for modification of chitosan-based membrane adsorbents: batch adsorption and molecular dynamic simulation. **Chemical Engineering Research And Design**, v. 175, p. 131-145, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2021.08.033>.

KHATRI, Jayraj; NIDHEESH, P.V.; SINGH, T.s. Anantha; KUMAR, M. Suresh. Advanced oxidation processes based on zero-valent aluminium for treating textile wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 348, p. 67-73, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.074>.

KREAG, R.; SMITH, F., 1975. Seafood Solid Waste in Oregon: Disposal or Recovery?, Oregon State University, **Extension Marine Advisory Program Report**, vol. 395. Universidade Estadual de Oregon, Corvallis, OR.

LAKSHMIKANDAN, M.; MURUGESAN, A.G.; WANG, Shuang; ABOMOHR, Abd El-Fatah; JOVITA, P. Anjelin; KIRUTHIGA, S.. Sustainable biomass production under CO₂ conditions and effective wet microalgae lipid extraction for biodiesel production. **Journal Of Cleaner Production**, v. 247, p. 119398, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119398>.

LANGMUIR, Irving. THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM. **Journal Of The American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, set. 1918. American Chemical Society (ACS).

<http://dx.doi.org/10.1021/ja02242a004>.

LEE, Wei Jie; GOH, Pei Sean; LAU, Woei Jye; WONG, Kar Chun; SUZAIMI, Nur Diyana; ISMAIL, Ahmad Fauzi. Tailoring the permeability and flux stability of forward osmosis membrane with tert-butylamine functionalized carbon nanotubes for paracetamol removal. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 107977, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.107977>.

LEI, Yongxin; GUO, Xiao; JIANG, Mingjie; SUN, Wen; HE, Huan; CHEN, Yu; THUMMAVICHAI, Kunyapat; OLA, Oluwafunmilola; ZHU, Yanqiu; WANG, Nannan. Co-ZIF reinforced cow manure biochar (CMB) as an effective peroxymonosulfate activator for degradation of carbamazepine. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 319, p. 121932, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121932>.

LEI, Lei; HUANG, Xiaoming; ZHANG, Shuai; YANG, Jinrong; YANG, Lin; XU, Min. Comparison of Prevalence and Associated Factors of Anxiety and Depression Among People Affected by versus People Unaffected by Quarantine During the COVID-19 Epidemic in Southwestern China. **Medical Science Monitor**, v. 26, 20 abr. 2020. <http://dx.doi.org/10.12659/msm.924609>

LEWOYEHU, Mekuanint. Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, v. 159, p. 105279, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105279>.

LI, Ning; HE, Mengting; LU, Xukai; YAN, Beibei; DUAN, Xiaoguang; CHEN, Guanyi; WANG, Shaobin; HOU, Li'An. Municipal solid waste derived biochars for wastewater treatment: production, properties and applications. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 177, p. 106003, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106003>.

LICONA, K.P.M.; GEAQUINTO, L.R. de O.; NICOLINI, J.V.; FIGUEIREDO, N.G.; CHIAPETTA, S.C.; HABERT, A.C.; YOKOYAMA, L.. Assessing potential of nanofiltration and reverse osmosis for removal of toxic pharmaceuticals from water. **Journal Of Water Process Engineering**, v. 25, p. 195-204, out. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.002>.

LIMA, Éder Cláudio; ADEBAYO, Matthew Ayorinde; MACHADO, Fernando Machado. Experimental Adsorption. Carbon Nanostructures, p. 71-84, 2015. **Springer International Publishing**. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-18875-1_4.

LIMA, Eder C.; HOSSEINI-BANDEGHARAEI, Ahmad; MORENO-PIRAJÁN, Juan Carlos; ANASTOPOULOS, Ioannis. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoof equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. **Journal Of Molecular Liquids**, v. 273, p. 425-434, jan. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>.

LIU, Zhiyuan; SUN, Yong; XU, Xinrui; MENG, Xianghui; QU, Jingbo; WANG, Zhi; LIU, Changyu; QU, Bin. Preparation, characterization and application of activated carbon from corn cob by KOH activation for removal of Hg (II) from aqueous solution. **Bioresource Technology**, v. 306, p. 123154, jun. 2020. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123154>

LIU, Y. A general model for biosorption of Cd²⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ by aerobic granules. **Journal Of Biotechnology**, v. 102, n. 3, p. 233-239, 8 maio 2003. Elsevier BV.
[http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1656\(03\)00030-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1656(03)00030-0).

LOGANATHAN, Paripurnanda; VIGNESWARAN, Saravanamuthu; KANDASAMY, Jaya. Enhanced removal of nitrate from water using surface modification of adsorbents – A review.

Journal Of Environmental Management, v. 131, p. 363-374, dez. 2013. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.034>.

LONG, Li; XUE, Yingwen; ZENG, Yifan; YANG, Kai; LIN, Chuanjing. Synthesis, characterization and mechanism analysis of modified crayfish shell biochar possessed ZnO nanoparticles to remove trichloroacetic acid. **Journal Of Cleaner Production**, v. 166, p. 1244-1252, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.122>.

LOPES, Elaine C.N.; ANJOS, Fernanda S.C. dos; VIEIRA, Eunice F.s.; CESTARI, Antonio R.. An alternative Avrami equation to evaluate kinetic parameters of the interaction of Hg(II) with thin chitosan membranes. **Journal Of Colloid And Interface Science**, v. 263, n. 2, p. 542-547, jul. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00326-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00326-6).

MAGDY, Y.H.; ALTAHER, H.. Kinetic analysis of the adsorption of dyes from high strength wastewater on cement kiln dust. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 834-841, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.009>.

MAGED, Ali; IQBAL, Jibran; KHARBISH, Sherif; ISMAEL, Ismael Sayed; BHATNAGAR, Amit. Tuning tetracycline removal from aqueous solution onto activated 2: 1 layered clay mineral. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 384, p. 121320, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121320>.

MACHADO, Fernando M.; BERGMANN, Carlos P.; LIMA, Eder C.; ROYER, Betina; SOUZA, Felipe E. de; JAURIS, Iuri M.; CALVETE, Tatiana; FAGAN, Solange B. Adsorption of Reactive Blue 4 dye from water solutions by carbon nanotubes: experiment and theory. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 14, n. 31, p. 11139, 2012. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c2cp41475a>.

MACHADO, Fernando M.; BERGMANN, Carlos P.; FERNANDES, Thais H.M.; LIMA,

Eder C.; ROYER, Betina; CALVETE, Tatiana; FAGAN, Solange B. Adsorption of Reactive Red M-2BE dye from water solutions by multi-walled carbon nanotubes and activated carbon. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 192, n. 3, p. 1122-1131, set. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.020>.

MACHADO, Fernando M.; CARMALIN, Sophia A.; LIMA, Eder C.; DIAS, Silvio L. P.; PROLA, Lizie D. T.; SAUCIER, Caroline; JAURIS, Iuri M.; ZANELLA, Ivana; FAGAN, Solange B.. Adsorption of Alizarin Red S Dye by Carbon Nanotubes: an experimental and theoretical investigation. **The Journal Of Physical Chemistry C**, v. 120, n. 32, p. 18296-18306, 8 ago. 2016. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b03884>.

MACHADO, Fernando M.; BERGMANN, C. P. Carbon Nanomaterials as Adsorbents for Environmental and Biological Applications. 1. ed. New York City: **Springer International Publishing**, 2015. v. 1. 122p.

MADNI, Ahmed; KOUSAR, Rozina; NAEEM, Naveera; WAHID, Fazli. Recent advancements in applications of chitosan-based biomaterials for skin tissue engineering. **Journal Of Bioresources And Bioproducts**, v. 6, n. 1, p. 11-25, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.002>.

MAKKI, M., Hassali, M. A., Awaisu, A. & Hashmi, F. (2019). The prevalence of unused medications in homes. **Journal of Pharmacy Practice and Education**, 7(2):61.

MATHEW, Gincy Marina; MATHEW, Dony Chacko; SUKUMARAN, Rajeev Kumar; SINDHU, Raveendran; HUANG, Chieh- Chen; BINOD, Parameswaran; SIROHI, Ranjna; KIM, Sang-Hyoun; PANDEY, Ashok. Sustainable and eco-friendly strategies for shrimp shell valorization. **Environmental Pollution**, v. 267, p. 115656, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115656>.

MOHAPI, Maleshoane; SEFADI, Jeremia Shale; MOCHANE, Mokgaotsa Jonas; MAGAGULA, Sifiso Innocent; LEBELO, Kgomotso. Effect of LDHs and Other Clays on Polymer Composite in Adsorptive Removal of Contaminants: a review. **Crystals**, v. 10, n. 11, p. 957, 22 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/cryst10110957>.

MONDAL, Anjon Kumar; KRETSCHMER, Katja; ZHAO, Yufei; LIU, Hao; FAN, Hongbo; WANG, Guoxiu. Naturally nitrogen doped porous carbon derived from waste shrimp shells for high-performance lithium ion batteries and supercapacitors. **Microporous And Mesoporous Materials**, v. 246, p. 72-80, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.03.019>.

Moosa, Ahmed & Ridha, Ali & Kadhim, Noor. (2016). Use of Biocomposite Adsorbents for the Removal of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution. **American Journal of Materials Science**. 2016. 135-146. [10.5923/j.materials.20160605.03](https://doi.org/10.5923/j.materials.20160605.03).

MOREIRA, Maisa A.; CIUFFI, Katia J.; RIVES, Vicente; VICENTE, Miguel A.; TRUJILLANO, Raquel; GIL, Antonio; KORILI, Sophia A.; FARIA, Emerson H. de. Effect of chemical modification of palygorskite and sepiolite by 3- aminopropyltriethoxisilane on adsorption of cationic and anionic dyes. **Applied Clay Science**, v. 135, p. 394-404, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.022>.

NACHIYAR, C. Valli; RAKSHI, A.D.; SANDHYA, S.; JEBASTA, N. Britlin Deva; NELLORE, Jayshree. Developments in treatment technologies of dye-containing effluent: a review. **Case Studies In Chemical And Environmental Engineering**, v. 7, p. 100339, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100339>.

NASCIMENTO, Victoria X.; PINTO, Diana; LÜTKE, Sabrina F.; SILVA, Maria C. F. da; MACHADO, Fernando. M.; LIMA, Éder. C.; SILVA, Luis F. O.; DOTTO, Guilherme L.. Brilliant blue FCF dye adsorption using magnetic activated carbon from Sapelli wood sawdust. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 30, n. 20, p. 58684- 58696,

30 mar. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-26646-6>.

NEVES, Andressa Caroline; ZANETTE, Cristina; GRADE, Schaiana Tamara; SCHAFFER, Jéssica Vanessa; ALVES, Helton José; ARANTES, Mabel Karina. Optimization of lactic fermentation for extraction of chitin from freshwater shrimp waste. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 39, n. 2, p. 125, 15 maio 2017. Universidade Estadual de Maringa. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i2.29370>.

NIAZI, Leila; LASHANIZADEGAN, Asghar; SHARIFIFARD, Hakimeh. Chestnut oak shells activated carbon: preparation, characterization and application for cr (vi) removal from dilute aqueous solutions. **Journal Of Cleaner Production**, v. 185, p. 554-561, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.026>.

NOUJ, Nisrine; HAFID, Naima; ALEM, Nouredine El; CRETESCU, Igor. Novel Liquid Chitosan-Based Biocoagulant for Treatment Optimization of Fish Processing Wastewater from a Moroccan Plant. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7133, 23 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14237133>.

NUNES, Cristian Santos; CASTILLO, Andreza de Souza; RAMOS, Jaqueline Pinheiro; GOMES, Laércio Gouvêa; CARDOSO, Fábio José Bonfim; VILHENA, Karyme do Socorro de Souza. Potencial de resíduo não processado proveniente da obtenção do silício metálico como adsorvente do corante vermelho de metila. **Materia- rio De Janeiro**, v. 28, n. 1, 1 jan. 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0018>

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Wastewater: The Untapped Resource. Paris: UNESCO WWAP. 2017. 180 p. Disponível em: < <https://www.unep.org/resources/publication/2017-un-world-water-developmentreport-wastewater-untapped-resource> >. Acesso em 19 abril de 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Water reuse — a permanent source?. 2018a. Disponível em: < [https://www.unwater.org/water-reuse-a-permanent- source//>.](https://www.unwater.org/water-reuse-a-permanent-source/) Acesso em 19 mai. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. World Water Development Report 2018 - Nature-based Solutions for Water. 2018b. Disponível em: <<https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/> Acesso em 20 mai. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Convenção de Estocolmo. 2021. Disponível em: <http://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/tabid/673/Default.aspx>>. Acesso em 14 jun. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. World Water Development Report 2018 - Nature-based Solutions for Water. 2018b. Disponível em: < <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/> Acesso em 20 mai. 2023.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. The United Nations World Water Development Report - Valuing Water. Paris: UNESCO WWAP. 2021b. 206 p. Disponível em: < [https://www.unwater.org/un-world-water-development-report-2021- valuing-water/](https://www.unwater.org/un-world-water-development-report-2021-valuing-water/)>. Acesso em 19 jun. 2023.

OUGOUGDAL, Houssam Ayt; KHEBIZA, Mohamed Yacoubi; MESSOULI, Mohammed; LACHIR, Asia. Assessment of Future Water Demand and Supply under IPCC Climate Change and Socio-Economic Scenarios, Using a Combination of Models in Ourika Watershed, High Atlas, Morocco. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1751, 19 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12061751>.

PANG, Yang; ZENG, Guangming; TANG, Lin; ZHANG, Yi; LIU, Yuanyuan; LEI, Xiaoxia; LI, Zhen; ZHANG, Jiachao. PEI-grafted magnetic porous powder for highly effective adsorption of heavy metal ions. **Desalination**. v.281, n.1, p.278-284, out. 2011.

PETRUCCI, Elisabetta; PALMA, Luca di; LAVECCHIA, Roberto; ZUORRO, Antonio. Treatment of diazo dye Reactive Green 19 by anodic oxidation on a boron-doped diamond electrode. **Journal Of Industrial And Engineering Chemistry**, v. 26, p. 116- 121, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2014.11.022>.

PIETROBELLI, Juliana Martins Teixeira de Abreu. Avaliação do potencial de bioadsorção dos íons Cd (II), Cu (II) e Zn (II) pela macrófita Egeria densa. Toledo: PR- 2007. 97 f.

PINTO, Patricio X.; AL-ABED, Souhail R.; MCKERNAN, John. Comparison of the efficiency of chitinous and ligneous substrates in metal and sulfate removal from mining-influenced water. **Journal Of Environmental Management**, v. 227, p. 321- 328, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.113>.

PIOTROWSKA-KIRSCHLING, Agnieszka; SZELĄGOWSKA-RUDZKA, Katarzyna; KARCZEWSKI, Jakub; BRZESKA, Joanna. Application of Shrimp Waste for the Synthesis of Polyurethane–Chitosan Materials with Potential Use in Sorption of Oil Micro-Spills in Water Treatment. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 5098, 1 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13095098>.

PRÜSS-USTÜN, A.; WOLF, J.; CORVALÁN, C.; NEVILLE, T.; BOS, R.; NEIRA, M.. Diseases due to unhealthy environments: an updated estimate of the global burden of disease attributable to environmental determinants of health. **Journal Of Public Health**, v. 39, n. 3, p. 464-475, 12 set. 2016. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/pubmed/fdw085>

QIU, Bingbing; SHAO, Qianni; SHI, Jicheng; YANG, Chenhao; CHU, Huaqiang. Application of biochar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: modification strategies, mechanisms and challenges. **Separation And Purification Technology**, v. 300, p. 121925, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121925>.

QUEIROZ, Leandro S.; SOUZA, Luiz K.C. de; THOMAZ, Kelly Taise C.; LIMA, Erika Tallyta Leite; ROCHA FILHO, Geraldo N. da; NASCIMENTO, Luis Adriano S. do; PIRES, Luiza H. de Oliveira; FAIAL, Kelson do Carmo Freitas; COSTA, Carlos E.F. da. Activated carbon obtained from amazonian biomass tailings (acai seed): modification, characterization, and use for removal of metal ions from water. **Journal Of Environmental Management**, v. 270, p. 110868, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110868>.

QU, Jiangying; LV, Siyuan; PENG, Xiyue; TIAN, Shuo; WANG, Jia; GAO, Feng. Nitrogen-doped porous “green carbon” derived from shrimp shell: combined effects of pore sizes and nitrogen doping on the performance of lithium sulfur battery. **Journal Of Alloys And Compounds**, v. 671, p. 17-23, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.064>.

RÁPÓ, Eszter; TONK, Szende. Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: a review of results from the last five years (2017::2021). **Molecules**, [S.L.], v. 26, n. 17, p. 5419, 6 set. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26175419>

RATHI, B. S.; KUMAR, P. S. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. **Environmental Pollution**, v. 280, p. 116995, 2021.

RATHI, B. Senthil; KUMAR, P. Senthil. Sustainable approach on the biodegradation of azo dyes: a short review. **Current Opinion In Green And Sustainable Chemistry**, v. 33, p. 100578, fev. 2022. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100578>.

RAVI, Jeganes; OTHMAN, Mohd Hafiz Dzarfan; MATSUURA, Takeshi; BILAD, Muhammad Ro'li; EL-BADAWY, T.H.; AZIZ, Farhana; ISMAIL, A.F.; RAHMAN, Mukhlis A.; JAAFAR, Juhana. Polymeric membranes for desalination using membrane distillation: a review. **Desalination**, v. 490, p. 114530, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2020.114530>.

REZAKAZEMI, Mashallah; SHIRAZIAN, Saeed. Lignin-chitosan blend for methylene blue removal: adsorption modeling. **Journal Of Molecular Liquids**, v. 274, p. 778- 791, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2018.11.043>.

RIMAR, K. K. P. P. Avaliação da capacidade da concha do marisco Anomalocardia brasiliana em adsorver ferro em amostras de águas subterrâneas. 2013. 96f. Tese (Doutorado em Química) - Programa de Pós-Graduação em Química - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

ROCHA, Otidene Rossiter Sá da; NASCIMENTO, Grazielle Elisandra do; CAMPOS, Natália Ferreira; SILVA, Valdinete Lins da; DUARTE, Marta Maria Menezes Bezerra. Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química Nova**, v. 35, n. 7, p. 1369-1374, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422012000700016>.

RODDE, R; A EINBU; VARUM, K. A seasonal study of the chemical composition and chitin quality of shrimp shells obtained from northern shrimp (*Pandalus borealis*). **Carbohydrate Polymers**, v. 71, n. 3, p. 388-393, 8 fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.06.006>.

RODRIGUES, Daniel Lucas Costa; MACHADO, Fernando Machado; OSÓRIO, Alice

Gonçalves; AZEVEDO, Cristiane Ferraz de; LIMA, Eder Claudio; SILVA, Raphaele S. da; LIMA, Diana Ramos; GONÇALVES, Fernanda Medeiros. Adsorption of amoxicillin onto high surface area–activated carbons based on olive biomass: kinetic and equilibrium studies. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 27, n. 33, p. 41394-41404, 18 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-09583-6>.

RODRIGUES, R. F.; TREVENZOLI, R. L.; SANTOS, L. R. G.; LEÃO, V. A.; BOTARIO, V. R. Adsorção de metais pesados em serragem de madeira tratada com ácido cítrico. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.11, n.1, p.21-26, mar. 2006.

SACHINDRA, N.M.; BHASKAR, N., 2008. Atividade antioxidante in vitro de licor de bioresíduos fermentados de camarão. **Biorecurso**. Tecnol. 99, 9013e9016.

SALAWU, Omobayo A.; HAN, Ziwei; ADELEYE, Adeyemi S.. Shrimp waste-derived porous carbon adsorbent: performance, mechanism, and application of machine learning. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 437, p. 129266, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129266>.

SARKAR, Shrabana; ECHEVERRÍA-VEGA, Alex; BANERJEE, Aparna; BANDOPADHYAY, Rajib. Decolourisation and Biodegradation of Textile Di-azo Dye Congo Red by *Chryseobacterium geocarposphaerae* DD3. **Sustainability**, v. 13, n. 19, p. 10850, 29 set. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su131910850>.

SARVAJITH, M.; REDDY, G. Kiran Kumar; NANCHARAI, Y.V.. Textile dye biodecolourization and ammonium removal over nitrite in aerobic granular sludge sequencing batch reactors. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 342, p. 536-543, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.064>.

SHEN, Ying; ZHAO, Shichao; LV, Yanfei; CHEN, Fei; FU, Li. Acid red dyes and the role of electrochemical sensors in their determination. *Microchemical Journal*, v. 207,

p. 111705, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2024.111705>.

SASHIKESH, Ganeshalingm; ANUSHKKARAN, Periyasamy; PRAVEENA, Yadhavan; ARUMUKHAM, Manjceevan; KUGAMOORTHY, Velauthamurty; KANDASAMY, Vignarooban. A comparison study of the efficacy of different activated charcoals derived from Palmyra kernel shell in removing phenolic compounds. **Current Research In Green And Sustainable Chemistry**, v. 6, p. 100355, 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100355>.

SCHWAZ, Gideon. "Estimating the Dimension of a Model." Ann. **Statist.** 6 (2) 461 - 464, March, 1978. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>

SELVI, M. Thamarai; HUSSAIN, A. Zahir. An empirical analysis on the impact of metal contents on water quality. **Materials Today: Proceedings**, v. 59, p. 1349-1356, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.005>.

SHOJAEI, S.; SHOJAEI, S.. Optimization of process variables by the application of response surface methodology for dye removal using nanoscale zero-valent iron. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, v. 16, n. 8, p. 4601-4610, 21 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-018-1866-9>.

SILVA, Enzo Zini Moreira; SEHR, Andrea; GRUMMT, Tamara; OLIVEIRA, Danielle Palma de; LEME, Daniela Morais. The Evaluation of Reactive Textile Dyes Regarding their Potential to Cause Organ-Specific Cyto- and Geno-Toxicity. **Ecotoxicology And Environmental Contamination**, v. 17, n. 1, p. 60-66, 10 ago. 2022. Ecotoxicology and Environmental Contamination. <http://dx.doi.org/10.5132/eec.2022.01.05>.

SINGHA, Kunal; PANDIT, Pintu; MAITY, Subhankar; SHARMA, Sweta Rajan. Harmful

environmental effects for textile chemical dyeing practice. **Green Chemistry For Sustainable Textiles**, p. 153-164, 2021. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-85204-3.00005-1>.

SOPHIA A., C.; LIMA, E. C. Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 150, n. December 2017, p. 1–17, 2018.

SOUSA, A. A. O. de; OLIVEIRA, T. S. .; AZEVEDO, L. E. C. de .; NOBRE, J. R. C. .; STEFANELLI, W. F. R. .; COSTA, T. A. P. de S. .; SILVA, J. P. S. da .; BARRAL , A. V. S. Adsorption of the basic Malachite Green dye via activated carbon from the açai seed. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e49110212871, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12871.

SOUZA, Kelli Cristina de; ANTUNES, Maria Lúcia Pereira; CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini da. Adsorção do corante Reativo Azul 19 em solução aquosa por lama vermelha tratada quimicamente com peróxido de hidrogênio. **Química Nova**, v. 36, n. 5, p. 651-656, 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422013000500007>.

SU, Wenjing; XU, Wenhao; POLYAKOV, Nikolay E.; DUSHKIN, Alexandr V.; QIAO, Pei; SU, Weike. Zero-waste utilization and conversion of shrimp shell by mechanochemical method. **Journal Of Cleaner Production**, v. 425, p. 139028, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139028>.

SU, Rongkui; XUE, Ruiqi; MA, Xiancheng; ZENG, Zheng; LI, Liqing; WANG, Shaobin. Targeted improvement of narrow micropores in porous carbon for enhancing trace benzene vapor removal: revealing the adsorption mechanism via experimental and molecular simulation. **Journal Of Colloid And Interface Science**, v. 671, p. 770-778, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2024.05.165>.

TANG, Shu Hui; ZAINI, Muhammad Abbas Ahmad. Development of activated carbon pellets using a facile low-cost binder for effective malachite green dye removal. **Journal Of Cleaner Production**, v. 253, p. 119970, abr. 2020. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119970>.

TAO, Hu-Chun; ZHANG, He-Ran; LI, Jin-Bo; DING, Wen-Yi. Biomass based activated carbon obtained from sludge and sugarcane bagasse for removing lead ion from wastewater. **Bioresource Technology**, v. 192, p. 611-617, set. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.006>.

TEIXEIRA, Roberta A.; LIMA, Eder C.; BENETTI, Antônio D.; NAUSHAD, Mu.; THUE, Pascal S.; MELLO, Beatris L.; REIS, Glaydson S. dos; RABIEE, Navid; FRANCO, Dison; SELIEM, Moaaz K.. Employ a Clay@TMSPEDETA hybrid material as an adsorbent to remove textile dyes from wastewater effluents. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 30, n. 36, p. 86010-86024, 3 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-28568-9>.

THOMMES, Matthias; KANEKO, Katsumi; NEIMARK, Alexander V.; OLIVIER, James P.; RODRIGUEZ-REINOSO, Francisco; ROUQUEROL, Jean; SING, Kenneth S.W.. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure And Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2 jul. 2015. Walter de Gruyter GmbH.
<http://dx.doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.

THUE, Pascal S.; SOPHIA, A. Carmalin; LIMA, Eder C.; WAMBA, Alfred G.N.; ALENCAR, Wagner S. de; REIS, Glaydson S. dos; RODEMBUSCH, Fabiano S.; DIAS, Silvio L.P.. Synthesis and characterization of a novel organic-inorganic hybrid clay adsorbent for the removal of acid red 1 and acid green 25 from aqueous solutions. **Journal Of Cleaner Production**, v. 171, p. 30-44, jan. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.278>.

TKACZYK, Angelika; MITROWSKA, Kamila; POSYNIK, Andrzej. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: a review. **Science Of The Total Environment**, v. 717, p. 137222, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>.

TOHAMY, Gomaa Saeed. The application of the knowledge triangle in universities as an approach to achieve global competitiveness. **Bsu-Journal Of Pedagogy And Curriculum**, v. 1, n. 2, p. 1-9, 1 jun. 2022. Egypt's Presidential Specialized Council for Education and Scientific Research. <http://dx.doi.org/10.21608/bsujpc.2022.240639>.

TOLE, Ilda; HABERMEHL-CWIRZEN, Karin; CWIRZEN, Andrzej. Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders : review. **Mineralogy And Petrology**, v. 113, n. 4, p. 449-462, 8 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00710-019-00666-y>.

TRAN, Hai Nguyen; YOU, Sheng-Jie; HOSSEINI-BANDEGHARAEI, Ahmad; CHAO, Huan-Ping. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. **Water Research**, v. 120, p. 88-116, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014>.

TRUNG, Trang Si; PHUONG, Pham Thi Dan; MINH, Nguyen Cong; THUONG, Nguyen Thi Nhu; PRINYAWIWATKUL, Witoon; BAO, Huynh Nguyen Duy; VAN HOA, Nguyen. Swollen-state preparation of chitosan lactate from moulted shrimp shells and its application for harvesting marine microalgae *Nannochloropsis* sp. **International Journal Of Biological Macromolecules**, v. 244, p. 125337, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125337>.

VALENTINI, H.; D'INCÃO, F.; RODRIGUES, L. F.; DUMONT, L. F. Evolution of the industrial fishery for pink shrimp (*Farfantepenaeus brasiliensis* and *F. paulensis*) on the

Southeast and South coast of Brazil, 1968-1989. **Atlântica, Rio Grande**, v.34, n.2, p.157-171, 2012.

VARJANI, Sunita J.; UPASANI, Vivek N.. Critical review on biosurfactant analysis, purification and characterization using rhamnolipid as a model biosurfactant. **Bioresource Technology**, v. 232, p. 389-397, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.047>.

WAMBA, Alfred G.N.; KOFA, Guillaume P.; KOUNGOU, Sylvere N.; THUE, Pascal S.; LIMA, Eder C.; REIS, Glaydson S. dos; KAYEM, Joseph G. Grafting of Amine functional group on silicate based material as adsorbent for water purification: a short review. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, v. 6, n. 2, p. 3192-3203, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.062>.

WANG, Ming; YAN, Jinlong; XU, Yumeng; ZHOU, Xiangqian; DIAO, Yusen; WANG, Hui; BIAN, Jiahao; LIU, Cheng; QUAN, Guixiang. Mechanochemical modified nitrogen-rich biochar derived from shrimp shell: dominant mechanism in pyridinic-n for aquatic methylene blue removal. **Journal Of Environmental Management**, v. 329, p. 117049, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117049>.

WU, Feng-Chin; TSENG, Ru-Ling; HUANG, Shang-Chieh; JUANG, Ruey-Shin. Characteristics of pseudo-second-order kinetic model for liquid-phase adsorption: a mini-review. **Chemical Engineering Journal**, v. 151, n. 1-3, p. 1-9, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.024>.

WU, W.; CHEN, Z.; HUANG, Y.; LI, J.; CHEN, D.; CHEN, N.; SU, M. Red mud for the efficient adsorption of U(VI) from aqueous solution: Influence of calcination on performance and mechanism. **Journal of Hazardous Materials**, v. 409, p. 124925, maio 2021. DOI: 10.1016 /j.jhazmat.2020.124925

XIAO, Yunlong; XUE, Yingwen; GAO, Fei; MOSA, Ahmed. Sorption of heavy metal ions onto crayfish shell biochar: effect of pyrolysis temperature, ph and ionic strength. **Journal**

Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers, v. 80, p. 114- 121, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2017.08.035>.

XU, Y.; BAJAJ, M.; SCHNEIDER, R.; GRAGE, S.; ULRICH, A.; WINTER, J.; GALLERT, C. Transformation of the matrix structure of shrimp shells during bacterial deproteinization and demineralization. **Microbial Cell Factories**, v. 12, n. 1, 5 out. 2013. DOI 10.1186/1475-2859-12-90

YAASHIKAA, P.R.; KUMAR, P. Senthil; SARAVANAN, A.; VO, Dai-Viet N.. Advances in biosorbents for removal of environmental pollutants: a review on pretreatment, removal mechanism and future outlook. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 420, p. 126596, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126596>.

YU, Jiangfang; TANG, Lin; PANG, Ya; ZENG, Guangming; FENG, Haopeng; ZOU, Jiajing; WANG, Jingjing; FENG, Chengyang; ZHU, Xu; OUYANG, Xilian. Hierarchical porous biochar from shrimp shell for persulfate activation: a two-electron transfer path and key impact factors. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 260, p. 118160, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118160>.

YUAN, Xiangzhou; DISSANAYAKE, Pavani Dulanja; GAO, Bin; LIU, Wu-Jun; LEE, Ki Bong; OK, Yong Sik. Review on upgrading organic waste to value-added carbon materials for energy and environmental applications. **Journal Of Environmental Management**, v. 296, p. 113128, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113128>.

ZHAO, Ying; CHAI, Yin- Hang; DING, Ling; WANG, Shuang; WANG, Yi-Ni; MA, Lu- Fang; ZHAO, Bang-Tun. A stable N-containing heterocyclic carboxylic acid ligand Co- MOF for photoelectric performance and anionic dyes adsorption. **Arabian Journal Of Chemistry**, v. 16, n. 8, p. 104878, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104878>.
ZHOU, Yan; GUO, Na; WANG, Zhenmeng; ZHAO, Tianyu; SUN, Jianan; MAO, Xiangzhao. Evaluation of a clean fermentation-organic acid method for processing shrimp waste from

six major cultivated shrimp species in China. **Journal Of Cleaner Production**, v. 294, p. 126135, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126135>.

ZUORRO, Antonio; FIDALEO, Marcello; LAVECCHIA, Roberto. Response surface methodology (RSM) analysis of photodegradation of sulfonated diazo dye Reactive Green 19 by UV/H₂O₂ process. **Journal Of Environmental Management**, v. 127, p. 28-35, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.023>.

ZUORRO, Antonio; LAVECCHIA, Roberto. Evaluation of UV/H₂O₂ advanced oxidation process (AOP) for the degradation of diazo dye Reactive Green 19 in aqueous solution. **Desalination And Water Treatment**, v. 52, n. 7-9, p. 1571-1577, fev. 2014. Elsevier BV