

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

ENGENHARIA QUÍMICA

THALYTA MORGANA DA COSTA SILVA

ESTUDO ADSORTIVO DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*) NO TRATAMENTO DE ÁGUA CONTAMINADA COM CORANTE

MACEIÓ

2024

THALYTA MORGANA DA COSTA SILVA

ESTUDO ADSORTIVO DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*) NO TRATAMENTO DE ÁGUA CONTAMINADA COM CORANTE

Plano de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Química
da Universidade Federal de Alagoas como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Meili.

Coorientador: Dra. Pollyanna Vanessa dos
Santos Lins.

MACEIÓ

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

S586e Silva, Thalyta Morgana da Costa.
Estudo adsorptivo da casca da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*)
no tratamento de água contaminada com corante / Thalyta Morgana da Costa
Silva. – 2024.
58 f. : il. color.

Orientador: Lucas Meili.
Coorientador: Pollyanna Vanessa dos Santos Lins.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química)
– Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 54-58.

1. Corantes. 2. Tratamento de água. 3. Casca da Castanha-do-Brasil –
Bioadsorvente. 4. Adsorção. I. Título.

CDU: 544.723 : 628.515



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA QUÍMICA



THALYTA MORGANA DA COSTA SILVA

ESTUDO ADSORTIVO DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa*) NO TRATAMENTO DE ÁGUA CONTAMINADA COM CORANTES

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 LUCAS MEILI
Data: 23/02/2024 10:00:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Meili

Documento assinado digitalmente
 JOAO BATISTA MAIA ROCHA NETO
Data: 23/02/2024 13:29:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Batista Maia Neto

Documento assinado digitalmente
 JOAO INACIO SOLETTI
Data: 23/02/2024 12:09:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Inácio Soletti

AGRADECIMENTOS

Agradeço primordialmente à Deus, por me acompanhar em todos os momentos da minha vida, me guiar e me ensinar sobre o tempo certo de cada coisa.

Aos meus pais, Bárbara Angélica e José Arnaldo que prestaram todo o apoio necessário para que os meus sonhos fossem possíveis de serem realizados me dando coragem para continuar e fazendo tudo acontecer, por nunca desistirem e me guiarem a ser a pessoa que sou hoje.

Ao meu namorado, Michael Wycton, que foi uma peça-chave dentro da minha graduação, que acompanhou toda construção das minhas versões de estudante e profissional, me apoiou em todos os momentos e que foi meu incentivo para enfrentar inúmeros desafios. Obrigada por ter sido paciente, acolhedor e tão amoroso em todo esse período.

À minha madrinha Edja Betânia, que sempre foi fonte de incentivo em decisões difíceis.

Aos meus irmãos, Thulyo Luís e Alice, por todo acolhimento e alegria em meio à períodos complicados e de incertezas.

À toda minha família, que contribuíram e me motivaram durante a graduação.

Às minhas avós, Maria de Lourdes e Maria Aparecida, em memória, que mesmo sem a presença física, foram minha força durante a graduação. Sem dúvida, sou apenas um pouco do que elas foram.

Ao meu orientador Lucas Meili e a minha coorientadora Pollyanna, por toda confiança, apoio, ensinamentos e por acreditarem muito em fazer tudo dar certo. Aos meus professores, que contribuíram grandemente para minha formação, sou grata pelos ensinamentos e conselhos dados em sala de aula.

Aos meus amigos que cultivei ao longo da graduação Morgana, Erick, Iury, Leon, Monalisa, Rabech, que foram essenciais para que a jornada pudesse ser mais leve e que me acompanharam em momentos de tristeza, desafios e alegrias. E a todos os meus amigos de vida por todo apoio e companhia durante esse tempo.

Aos colegas que fiz no Laboratório de Processos (LAPRO), por todos os momentos de alegria divididos e ensinamentos trocados durante o período em que participei das atividades do laboratório.

Aos colegas que fiz na PROTEQ (Empresa Júnior), no Instituto de Física durante o período de monitoria e aos integrantes da Gestão do Centro Acadêmico de 2022.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha caminhada!

“Pois para Deus nada é impossível”.

Lucas 1:37

RESUMO

O setor industrial é responsável por uma variedade de impactos ambientais, destacando-se a contaminação de corpos d'água devido ao descarte inadequado de resíduos. Entre os poluentes mais significativos originados na indústria têxtil estão os corantes, utilizados para conferir cores aos produtos fabricados, ampliando assim a gama de tonalidades disponíveis. O tratamento convencional de água não é adequado para remover corantes, exigindo métodos específicos de tratamento terciário. Sem esse tratamento adequado, a água contaminada retorna aos corpos d'água com altas concentrações de corantes. Uma opção viável para remoção é a adsorção, um processo de transferência de massa que utiliza um material adsorvente para remover substâncias presentes nos fluidos. Os bioadsorventes, como a casca da Castanha-do-Brasil, surgem como alternativas promissoras, reduzindo a geração de resíduos, custos com adsorventes sintéticos e possibilitando o reuso de materiais descartados. No presente estudo, realizou-se a caracterização do bioadsorvente proveniente da casca da Castanha-do-Brasil e investigou-se o seu potencial na remoção do corante Safranina de água contaminada. A análise por Espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) identificou características como estiramentos OH, ligações de C-H, e grupamentos C=O e C-O, típicos de holocelulose e lignina, enquanto a Difração de Raios-X (DRX) confirmou a não cristalinidade do material e características da casca da Castanha-do-Brasil. De acordo com os estudos do teste de afinidade apresentou resultados satisfatórios para remoção do corante safranina. Foram avaliados modelos cinéticos para compreender o mecanismo de adsorção, sendo o modelo de pseudo-segunda ordem o que melhor se ajustou aos dados, corroborado pelos valores de coeficiente de determinação (R^2) próximos de 1 e erro médio relativo (ARE) baixo. Além disso, o tempo de equilíbrio foi determinado em 300 minutos. As isotermas de adsorção foram estudadas para entender a influência da concentração do adsorvato na fase líquida, sendo o modelo de Sips o que melhor representou o processo adsortivo. Os estudos termodinâmicos evidenciaram que o processo adsortivo é endotérmico devido ao valor positivo da variação de entalpia, pelo valor negativo da variação da energia livre de Gibbs verifica-se que o processo ocorre de forma espontânea e a variação de entropia apresentou um valor positivo proveniente da desordem das moléculas após o processo de adsorção. Logo, o respectivo caracterizou e apresentou uma alternativa sustentável para o tratamento de água contaminadas com o corante Safranina através da reutilização dos resíduos da Castanha-do-Brasil.

Palavras-Chave: Adsorção; Castanha-do-Brasil; Resíduo; Tratamento de Água.

ABSTRACT

The industrial sector is responsible for a variety of environmental impacts, notably the contamination of water bodies due to inadequate waste disposal. Among the most significant pollutants originating in the textile industry are dyes, used to impart colors to manufactured products, thus expanding the range of shades available. Conventional water treatment is not suitable for removing dyes, requiring specific tertiary treatment methods. Without this adequate treatment, contaminated water returns to water bodies with high concentrations of dyes. A viable option for removal is adsorption, a mass transfer process that uses an adsorbent material to remove substances present in fluids. Bioadsorbents, such as Brazil nut shell, appear as promising alternatives, reducing waste generation, costs with synthetic adsorbents and enabling the reuse of discarded materials. In the present study, the characterization of the bioadsorbent from the Brazil nut shell was carried out and its potential in removing the dye Safranin from contaminated water was investigated. Spectroscopy analysis in the Fourier Transform Infrared (FTIR) region identified characteristics such as OH stretches, C-H bonds, and C=O and C-O groups, typical of holocellulose and lignin, while X-ray Diffraction (XRD) confirmed the non-crystallinity of the material and characteristics of the Brazil nut shell. According to the affinity test studies, it presented satisfactory results for removing the safranin dye. Kinetic models were evaluated to understand the adsorption mechanism, with the pseudo-second order model being the one that best fitted the data, corroborated by the coefficient of determination (R^2) values close to 1 and low mean relative error (ARE). Furthermore, the equilibration time was determined to be 300 minutes. The adsorption isotherms were studied to understand the influence of the adsorbate concentration in the liquid phase, with the Sips model being the one that best represented the adsorptive process. Thermodynamic studies showed that the adsorptive process is endothermic due to the positive value of the enthalpy change, due to the negative value of the Gibbs free energy change, it can be seen that the process occurs spontaneously and the entropy change presented a positive value resulting from the disorder of molecules after the adsorption process. Therefore, the respective characterized and presented a sustainable alternative for treating water contaminated with the dye Safranin through the reuse of Brazil nut waste.

Keywords: Adsorption; Brazil Nut; Waste; Water Treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Castanha-do-Brasil. | 14 |
| Figura 2 - Ouriços (a) e Sementes (b) da Castanha-do-Brasil..... | 15 |
| Figura 3 - Produção da Castanha-do-Brasil no Brasil entre 2009 e 2021. | 17 |
| Figura 4 - Ilustração do mecanismo de adsorção. | 21 |
| Figura 5 - Etapas que compõem o mecanismo de adsorção. | 22 |
| Figura 6 - Comparação entre o processo de quimiosorção e fisiosorção. | 23 |
| Figura 7 - Tipos de isotermas. | 25 |
| Figura 8 - Castanha-do-Brasil obtida para o respectivo estudo..... | 30 |
| Figura 9 - Casca da Castanha-do-Brasil após a separação manual. | 31 |
| Figura 10 - Moinho Analítico..... | 31 |
| Figura 11 - Casca da Castanha-do-Brasil após a moagem. | 32 |
| Figura 12 - Fluxograma da metodologia do teste de afinidade. | 34 |
| Figura 13 - Fluxograma da metodologia da curva de calibração. | 35 |
| Figura 14 - Montagem experimental para curva de calibração. | 35 |
| Figura 15 - Fluxograma da metodologia da cinética de adsorção. | 36 |
| Figura 16 - Fluxograma da metodologia da isoterma de adsorção..... | 37 |
| Figura 17 - Gráfico das variações de pH no teste do Ponto de Carga Zero (PCZ). | 40 |
| Figura 18 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). | 41 |
| Figura 19 - Difração Raio-X..... | 42 |
| Figura 20 - Curva de calibração do corante Safranina. | 43 |
| Figura 21 – Ajustes cinéticos de adsorção dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem. | 45 |
| Figura 22 - Ajustes isotérmicos..... | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição fitoquímica da amêndoa e da casca da Castanha-do-Brasil..... | 15 |
| Tabela 2 - Fórmula molecular do corante Safranina. | 33 |
| Tabela 3 – Concentração inicial, final e quantidade adsorvida do teste de afinidade.. | 44 |
| Tabela 4 - Resultados das variáveis dos ajustes cinéticos de adsorção. | 46 |
| Tabela 5 - Resultados das variáveis dos ajustes isotérmicos de adsorção..... | 48 |
| Tabela 6 - Parâmetros termodinâmicos. | 49 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. OBJETIVOS | 13 |
| 2.1 Geral | 13 |
| 2.2 Específicos..... | 13 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 14 |
| 3.1 Castanha-do-Brasil..... | 14 |
| 3.1.1 Castanheira-do-Brasil (<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.) | 14 |
| 3.1.2 Usos e aplicações | 16 |
| 3.1.3 Geração de resíduos | 17 |
| 3.2 Setor industrial e o uso de corantes | 18 |
| 3.3 Corante Safranina..... | 19 |
| 3.5 Adsorção | 20 |
| 3.6 Cinética de adsorção | 23 |
| 3.6.1 Modelo de pseudo-primeira ordem | 24 |
| 3.4.2 Modelo de pseudo-segunda ordem..... | 24 |
| 3.7 Isotermas de adsorção | 25 |
| 3.8 Termodinâmica..... | 28 |
| 4. METODOLOGIA..... | 30 |
| 4.1 Obtenção do material adsorvente..... | 30 |
| 4.2 Caracterização do material adsorvente | 32 |
| 4.3 Estudos de adsorção..... | 33 |
| 4.3.1 Preparo do adsorvato..... | 33 |
| 4.3.2 Teste de Afinidade | 34 |
| 4.3.3 Curva de Calibração | 34 |
| 4.3.4 Cinética de adsorção..... | 36 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.5 | Isoterma de adsorção | 37 |
| 4.3.6 | Termodinâmica de adsorção | 38 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 39 |
| 5.1 | Caracterização do material adsorvente | 39 |
| 5.1.1 | pH no Ponto de Carga Zero (PCZ)..... | 39 |
| 5.1.2 | Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)..... | 40 |
| 5.1.3 | Difração Raios-X (DRX) | 42 |
| 5.2 | Estudos de adsorção | 42 |
| 5.2.1 | Determinação da curva de calibração..... | 42 |
| 5.2.2 | Teste de afinidade | 44 |
| 5.2.3 | Cinética de adsorção..... | 45 |
| 5.2.4 | Isoterma de adsorção | 47 |
| 5.2.5 | Termodinâmica de adsorção | 49 |
| 6. | CONCLUSÃO..... | 51 |
| | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 53 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 54 |

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil global ainda enfrenta significativos desafios para o alcance da sustentabilidade apesar dos esforços realizados para incorporação de práticas socioambientais em seu sistema de produção. Com relação ao mercado têxtil, o Brasil foi o 10º maior produtor mundial, com produção de quase US\$ 13 bilhões em 2018, segundo o Caderno Setorial 2021 do Banco do Nordeste (MENDES, 2021).

Dentre as etapas de produção da indústria têxtil, o maior consumo ocorre nas etapas de tinturaria e acabamento, gerando em torno de 50 a 100 L de efluente por quilo de tecido produzido. Do ponto de vista ambiental, a etapa de tingimento é a mais preocupante devido à variedade e complexidade dos produtos químicos empregados no processo (ALMEIDA *et al.*, 2016). Os efluentes oriundos das indústrias têxteis possuem as características citadas devido à sua alta coloração, em função dos corantes que não são incorporados nas fibras no tingimento. Em torno de 90% dos produtos químicos empregados no processo têxtil são descartados após o uso (TOMASSONI *et al.*, 2019).

Os corantes sintéticos são utilizados nas indústrias têxteis e se enquadram na categoria de poluentes emergentes, que são definidos como qualquer substância química que não foi incluída em programas de monitoramento, nem em legislação pertinente a qualidade ambiental, mas estão constantemente sendo introduzidas no ambiente devido às atividades antrópicas (HORVAT *et al.*, 2012). O uso dos corantes nestes processos e o não tratamento correto da água descartada ocasiona uma problemática ambiental e de saúde pública. Os resíduos de indústrias têxteis possuem como característica uma intensa coloração, a qual, em ambientes aquáticos, pode causar uma interferência nos processos de fotossíntese (KUNZ *et. al.*, 2002).

Da perspectiva ambiental e social, faz-se necessário o estudo de alternativas para mediar ou diminuir o impacto gerado, sendo estas, economicamente e ambientalmente viáveis para o tratamento destes. Dentre as possibilidades de tratamento convencionais para remoção de corantes a partir de águas residuais incluem muitos processos, tais como precipitação química, tecnologia de membrana, adsorção, troca iônica e processo eletroquímico (SILVA *et al.*, 2020).

Um dos métodos mais usados para retirar contaminantes de soluções aquosas é a adsorção em materiais adsorventes, ou seja, o uso de um material que tenha habilidade de reter íons ou moléculas dos contaminantes em sua superfície. A adsorção se destaca em função do seu baixo custo associado, além de ser altamente eficaz, sendo cada vez mais pesquisada (CARABINEIRO *et al.*, 2011; PATIÑO *et al.*, 2015).

A adsorção é uma operação de transferência de massa que estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, permitindo assim a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO, 2014). Dentre suas vantagens de utilização quando se trata de seu uso para remoção de corantes em água, destacam-se o baixo custo de operação, devido a simplicidade experimental e de tratamento de dados da operação unitária, fácil compreensão e considerável eficácia (ALMEIDA *et al.*, 2016).

Dentre os materiais que podem ser utilizados como adsorvente, existem os bioadsorventes, uma alternativa sustentável, proveniente de biomassa agroindustrial e que vêm se destacando por serem abundantes, renováveis e com custo acessível (SILVA *et al.*, 2019). A biomassa é uma fonte vantajosa para ser convertida em adsorventes alternativos por ser limpa e renovável, além de auxiliar na mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto destes resíduos e evitando a geração de acúmulos posteriores (PIQUET, 2022).

No Brasil, de acordo com uma pesquisa do Centro de Sensoriamento Remoto da UFMG de 2017, o potencial anual de produção de Castanha-do-Brasil apenas na Amazônia é da ordem de 3,7 milhões de toneladas ao ano. Em 2018, o Governo Federal, apresentou que a produção foi de 34,2 mil toneladas de castanha (GERAQUE, 2022).

Dessa forma, compreendendo a alta geração de resíduos da casca da Castanha-do-Brasil e a busca por alternativas sustentáveis para o tratamento de água contaminada pela ação de corantes, o trabalho apresentará um estudo sobre o comportamento do corante Safranina pela ação do material adsorvente, sendo ele o pó da Casca da Castanha-do-Brasil. Sendo, uma opção de material a ser utilizado no tratamento de água apresentando um baixo custo, reuso de resíduos da biomassa e com um potencial favorável à preservação do meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo desta pesquisa é investigar, de modo experimental, o processo de adsorção do corante Safranina utilizando o material adsorvente obtido a partir do pó da casca da Castanha-do-Brasil.

2.2 Específicos

- Obter o pó da casca da Castanha-do-Brasil;
- Estudar o material obtido em sua estrutura cristalina, composição química e a influência do pH em contato com o material adsorvente;
- Avaliar o processo de adsorção do corante Safranina e o material adsorvente;
- Compreender o mecanismo de adsorção e avaliar os parâmetros termodinâmicos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Castanha-do-Brasil

3.1.1 Castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.)

A castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*), também conhecida como castanheira-do-Pará, é uma árvore alta e nativa da Amazônia. De acordo com sua região de inserção pode ser conhecida por diversas denominações, como: castanha-do-brasil, castanha-da-amazônia, castanha-do-pará é uma planta muito comum no norte do Brasil e se distribui por toda a floresta amazônica, sendo uma árvore de grande porte (PRANCE; MORI, 1979). A Castanha-do-Brasil caracteriza-se sobretudo pela divisão em duas principais partes, sendo elas a amêndoa e a casca que a envolve. Na Figura 1, segue uma ilustração da amêndoa.

Figura 1 - Castanha-do-Brasil.



Fonte: Sou Agro, 2023.

O fruto da castanheira é chamado de ouriço, que apresenta formato esférico e uma casca dura e lenhosa, pode contar de 15 a 24 sementes e possui de 3 a 5 cm, tem coloração branca à amarelada coberta por uma película marrom (LOCATELLI *et al.*, 2005). Na Figura 2, estão representados os ouriços e as sementes da Castanha-do-Brasil respectivamente.

As etapas de coleta e armazenamento da castanha-do-brasil são relativamente simples, consistindo na coleta dos frutos no chão (debaixo da copa das árvores) para a amontoar e posterior quebra destes para retirada das sementes, armazenadas na floresta ou em locais intermediários para depois serem transportadas para um armazém central, geralmente sob gestão de cooperativas ou associações de extrativistas.

Desse armazém central, as castanhas podem ou não seguir para uma unidade de beneficiamento, localizada na área urbana (WADT, 2015).

Figura 2 - Ouriços (a) e Sementes (b) da Castanha-do-Brasil.



Fonte: (a) Globo Rural, 2020; (b) Diário do Acre, 2023.

Na Tabela 1, encontra-se a porcentagem e a composição da casca e da amêndoa da Castanha-do-Brasil. É válido destacar a alta porcentagem em relação as fibras, que representou mais de 50% da composição da casca. Logo, a casca, é caracterizada pela acentuada presença de fibras e carboidratos.

Tabela 1 - Composição fitoquímica da amêndoa e da casca da Castanha-do-Brasil.

| Composição Fitoquímica | Amêndoa | Composição Fitoquímica | Casca |
|------------------------|-----------|------------------------|---------------|
| Lipídios | 67,3 % | Fibras | 55,2 % |
| Proteínas | 14,26 % | Carboidratos | 31,8 % |
| Carboidratos | 3,42 % | Umidade | 15,7 % |
| Fibras totais | 8,02 % | Proteínas | 2,7 % |
| Umidade | 3,13 % | Minerais | 1,63 % |
| Cinzas | 3,84 % | Cinzas | 1,5 % |
| Selênio | 204 mg/kg | Valor calórico | 415 Kcal/100g |

Fonte: Modificado de BONELLI, 2018 adup GEORGIN, 2019.

3.1.2 Usos e aplicações

Os usos da Castanha-do-Brasil são diversos devido à alta gama de possibilidades de aplicações do seu fruto, casca e madeira. Em relação a sua produção, o produto mais comercializado é a amêndoa, parte interna da Castanha. Esta, possui uma valorização culinária e também por ser fonte de subprodutos como óleos, tortas, farelos e o leite proveniente da amêndoa. Além disso, a madeira é utilizada para o reflorestamento e na construção civil e naval (SALGADO; SOUZA, 2022). Com isso, um dos impactos da produção e comércio da Castanha-do-Brasil é no ramo alimentício, principalmente devido aos benefícios gerados pelas fibras e proteínas existentes na mesma.

De acordo com Abreu *et al.* (2018), a prática do extrativismo na castanheira ocorre em virtude da utilização da sua semente para indústria culinária, estética e farmacêutica. Além disso, a madeira é utilizada para confecção de móveis no ramo industrial. Outro produto obtido da Castanha-do-Brasil é o óleo, este possui características emolientes, nutritivas e lubrificantes, sendo utilizado com assiduidade nas indústrias de cosméticos, dermacêutica e lubrificantes. O ouriço, é aproveitado na produção de artigos domésticos, saboneteiras, copos e vasos, além de ser utilizado como combustível a partir da queima dos mesmos (ALMEIDA, 2015). Diante do uso do óleo, evidencia-se a diversidade de aplicações das partes da Castanha-do-Brasil, o que ocasiona uma maior valorização da matéria-prima de origem.

A maioria dos frutos de castanheira-do-brasil comercializados ainda são oriundos do extrativismo, atividade praticada na Amazônia desde a Era pré-colombiana, onde até a chegada dos colonizadores tinha função de alimentação e de atender as necessidades das comunidades de povos nativos. Após a colonização europeia os produtos do extrativismo passaram a ter valor para a comercialização mundial, sendo levados para outros países. Dentre eles, havia a castanheira-do-brasil como um importante produto comercializado para a Europa (SALGADO; SOUZA, 2022).

Além das aplicações do uso da Castanha-do-Brasil nos mais diversos segmentos e produtos, um dos resíduos gerados na produção desta é a sua casca. Da casca extrai-se estopa de qualidade superior, empregada na calafetação de embarcações, vestuários indígenas e esteiras.

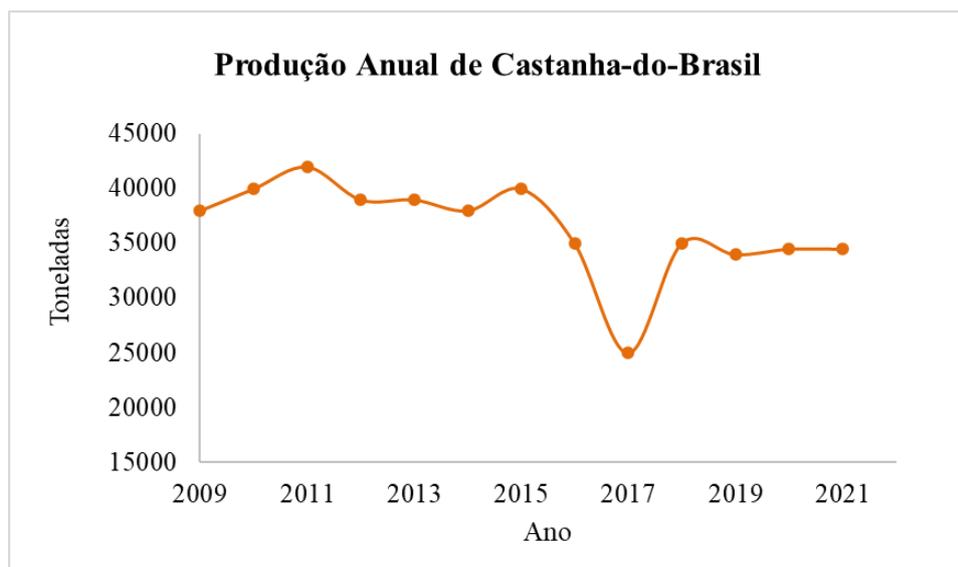
Uma das alternativas estudadas para o reaproveitamento da casca é a utilização da mesma no design de embalagens sustentáveis, a ideia originou-se em um Desafio de Sustentabilidade promovido pela Coca-Cola (PASSARINI, 2020).

Ademais, tem-se que a casca é uma fonte de biomassa acessível e de baixo custo que pode ser usada como fonte de estudo em busca de possíveis alternativas que ampliem o seu uso, tanto em processos existentes e também para seu uso em criação de novas vertentes e meios sustentáveis que estejam alinhadas com a proposta de preservação do meio ambiente e conservação dos corpos hídricos.

3.1.3 Geração de resíduos

Os países Brasil, Peru e Bolívia são os líderes na produção e exportação mundial da Castanha-do-Brasil (WADT et al., 2018). No Brasil, a castanha é comercializada no atacado e no varejo, por saca e no quilograma com ou sem casca. Em relação à exportação, no ano de 2015 o Brasil exportou o equivalente a US\$ 41,56 milhões em castanha-do-brasil. Entretanto, no ano de 2017, a receita com a exportação foi de apenas US\$ 11,96 milhões, o valor mais baixo desde 2009 (FORMIGONI, 2018). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil produziu aproximadamente 35 mil toneladas de Castanha-do-Brasil em 2021, como exemplificado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Produção da Castanha-do-Brasil no Brasil entre 2009 e 2021.



Fonte: Adaptado do IBGE, 2021.

Ainda de acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgados em 2020, a Castanha-do-Brasil ocupa o terceiro lugar no valor de produção dos produtos da extração vegetal não madeireiros no grupo de alimentícios, com produção dos produtos de 33,1 mil toneladas de Castanha-do-Brasil (PINHEIRO *et al.*, 2022). Embora a produção seja alta, apenas a amêndoa da castanha é comercializada diretamente após a separação da amêndoa e da casca. Uma das aplicações atualmente estudadas para as cascas de Castanha-do-Brasil é a fabricação de tijolos, todavia grande parte desse resíduo é descartada após a etapa de processamento (THENÓRIO, 2009).

Com isso, a geração de resíduo é amplificada com o passar do tempo, pois o seu fruto e a casca não são utilizados para comercialização, o que implica na criação de alternativas que visem o uso destes resíduos e que contribuam para a minimização destes no impacto ambiental e gere novas tecnologias. Dessa maneira, cerca de 90% do fruto é classificado como resíduos. Além disso, o fruto da Castanha-do-Brasil possui cerca de 2,4 kg e 1/3 é composto pelas sementes, resultando em uma geração de resíduos de 1,9 kg (SOUZA; SILVA, 2021).

3.2 Setor industrial e o uso de corantes

A indústria têxtil, em todo o mundo, ainda tem muito a evoluir para se tornar plenamente sustentável, apesar dos esforços que vêm realizando para implementar condutas socioambientais em seu sistema de produção (MARIANO, 2023). O investimento do Brasil no setor em 2021 foi de R\$ 4,9 milhões, com a produção em vestuário, meias e acessórios de aproximadamente 8,1 milhões de peças, alcançando um volume de 2,16 milhões de toneladas. Além disso, o setor empregou em 2021 cerca de 1,34 milhões de empregados formais e 8 milhões de forma indireta (ABIT, 2023).

O uso e a produção de corantes no setor têxtil promovem uma versatilidade de produtos, porém, em contrapartida, de acordo com a Moody's Investors Service a indústria da moda utiliza 10% do abastecimento industrial de água e os têxteis de acabamento são responsáveis por 20% da poluição global da água industrial (FEBRATEX GROUP, 2021). Com isso, evidencia-se a elevada contribuição do setor têxtil quando se trata de poluição em global, sendo um dos principais fatores a poluição da água através dos corantes utilizados no processo.

Como exposto, sabe-se que o maior consumo de corantes na produção têxtil é nas etapas de tinturaria e acabamento o que gera uma alta quantidade de resíduos contaminados. Os resíduos das indústrias do setor têxtil têm baixos níveis de degradação, apresentando assim

grande potencial de poluição, principalmente dos mananciais, devido às características químicas que lhe conferem maior estabilidade (NUNES, 2019).

Essa estabilidade promove uma maior dificuldade para o tratamento destes efluentes, o que necessita de um alto investimento em tecnologias e métodos de tratamento que sejam eficazes.

Segundo o artigo 1º do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), um impacto ambiental é “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais” (CONAMA, 1986).

Dessa forma, tem-se que os estudos que avaliam a complexidade e o comportamento destes corantes é crucial para o aumento dos meios de tratamento da água, principalmente pela não fixação do corante nas fibras na etapa de tingimento, que a torna a etapa mais preocupante pelo elevado descarte de corantes após uso.

3.3 Corante Safranina

O corante Safranina ou Vermelho Básico (cloreto de 3,7-dimetil-10-fenilfenazina-10-io-2,8-diamina) é um corante ácido, catiônico, pertencente ao grupo das triarilpirazinas, possui cerca de 350,84 g/mol de peso molecular e é característico por ser solúvel em água. É utilizado na forma de um pó vermelho amarronzado. Foi um dos primeiros corantes sintetizados a ser utilizado e continua amplamente requerido para o uso em coloração de alimentos, algodão, lã, seda, couro e papel (KAUR *et al.*, 2015 apud QUITINO, 2021). Sua fórmula química é $C_{20}H_{19}N_4Cl$.

Muito utilizado em indústrias têxteis, o corante Safranina possui características resistentes à quebra por tratamentos químicos, físicos e biológicos. Com isso, deve-se estudá-lo para o conhecimento de possibilidades que permitam a retirada destes corantes da água, como no presente trabalho.

Em questão de problemas de saúde, este pode causar irritações na pele, danos ao sistema respiratório, por isso o tratamento da água eficaz para retirada destes materiais das águas residuais é essencial para que estas não sejam descartadas inadequadamente e tenham chances de afetar a saúde humana, principalmente em comunidades ribeirinhas que tendem a utilizar a água dos corpos hídricos para realização das atividades domésticas e preparação dos alimentos a serem consumidos.

Com isso, uma forma de remediação da contaminação destes corpos hídricos é o tratamento dessa água. A eficiência no processo de separação de material particulado e a água dependerá diretamente do tratamento utilizado. Os processos mais comuns para essa separação são de coagulação, separação por floculação, sedimentação ou adsorção em carvão ativado (QUITINO, 2021). Estes, possuem um princípio de separação relacionados à ação da gravidade ou pela ação de produtos químicos, no caso da coagulação, que desestabiliza as partículas existentes, o que gera uma atração entre as cargas das partículas e as cargas do coagulante. Nesse contexto, destaca-se a adsorção por ser um processo de acessível compreensão, baixo custo de execução e com altas possibilidades de uso de matérias-primas.

Diante da necessidade de purificar a água tem-se inúmeros procedimentos adotados, dentre eles, separação por membrana, troca iônica, filtração por sedimentação e osmose reversa. Entretanto, todos os métodos citados possuem alto custo e reduzida efetividade industrial. Em contrapartida, há a adsorção, eficiente e viável economicamente (GE; LIU, 2022),

3.5 Adsorção

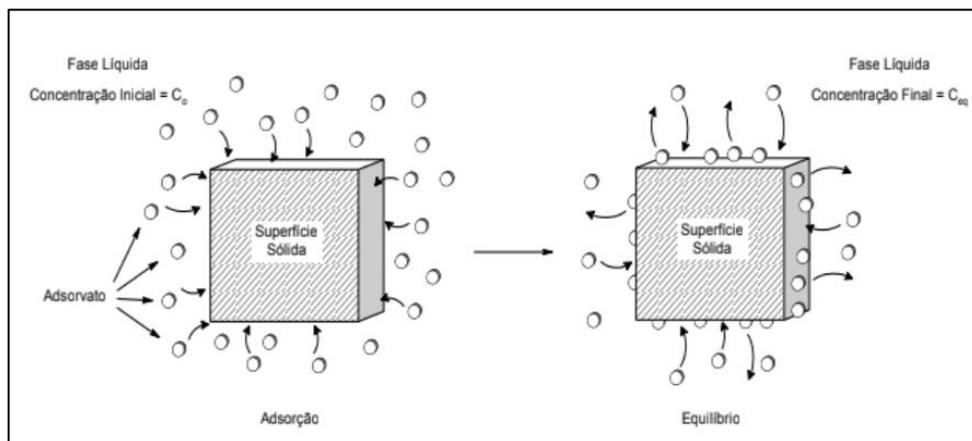
A adsorção, enquanto operação de transferência de massa, investiga minuciosamente a aptidão de determinados sólidos para concentrar em sua superfície substâncias específicas presentes em fluidos líquidos ou gasosos. Tal fenômeno possibilita a eficiente separação dos componentes desses fluidos, contribuindo assim para a compreensão dos processos envolvidos nessa complexa interação entre sólidos e substâncias fluidas.

Uma vez que os componentes adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a adsorção. Por isso, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (RUTHVEN, 1984). Na adsorção, a espécie que se acumula na interface do material é

comumente conhecida como adsorvato ou adsorbato e a superfície sólida que acumula o adsorvato é denominada como adsorvente (RUTHVEN, 1984).

Na Figura 4, encontra-se uma ilustração do mecanismo de adsorção que evidencia o adsorvato em maior quantidade em fase líquida e a superfície sólida (adsorvente) e após o processo de adsorção a concentração final de adsorvato diminui enquanto uma determinada quantidade de adsorvato se fixa no adsorvente.

Figura 4 - Ilustração do mecanismo de adsorção.

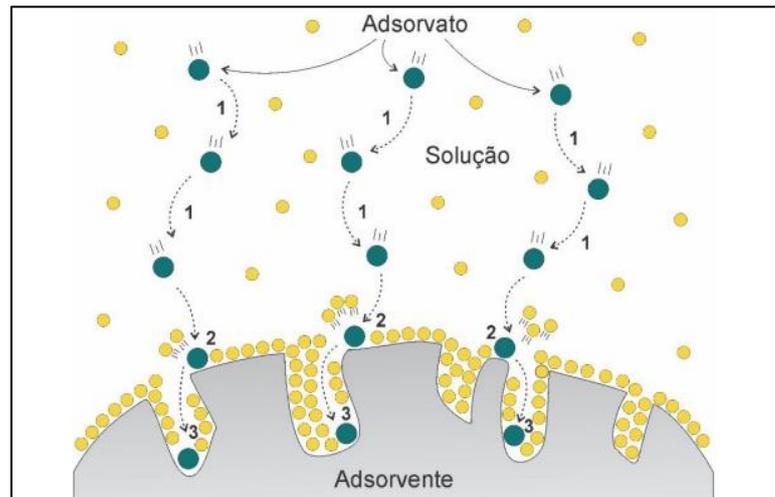


Fonte: Miranda, 2010.

A bioadsorção pode ser definida como uma ligação do soluto à biomassa através de um processo que não envolve transporte de energia metabólica, embora cada processo possa ocorrer simultaneamente quando a biomassa viva é utilizada. A literatura (NAJA, MURPHY e VOLESKY, 2010) cita muitas vantagens do processo de bioadsorção, como rapidez e reversibilidade, pouca ou nenhuma adição de produtos químicos, aplicada para amplas faixas de condições como pH e temperatura e economicamente atrativo devido ao baixo custo com bioadsorventes.

De acordo com Ruthven (1984), na adsorção, existe o adsorvente, superfície sólida na qual o adsorvato irá se acumular durante o processo adsorvativo, como ilustrado na Figura 5, por meio das três etapas contidas no mecanismo de adsorção, sendo elas: (1) difusão das moléculas de adsorvato através da solução, (2) adsorção do adsorvato na superfície do adsorvente e (3) difusão das moléculas do adsorvato no interior do poro.

Figura 5 - Etapas que compõem o mecanismo de adsorção.



Fonte: Quintela, 2020.

Além disso, a adsorção pode ser dividida em dois tipos: a adsorção física ou fisiosorção e a adsorção química ou quimiosorção. Ambas possuem características específicas que caracterizam o processo que advém na adsorção. A fisiosorção é predominada pelas forças de Van der Waals, nesta ocorre uma transferência de elétrons que forma uma ligação entre o adsorbato e o adsorvente, gerando assim a atração do poluente com o material adsorvente e o acontece em monocamada. Em contrapartida, a quimiosorção é predominada pelas forças comparáveis a ligações químicas, não ocorre a transferência de elétrons e é caracterizada por ocorrer em multicamadas (RUTHVEN, 1984).

Na Figura 6, encontra-se uma comparação rápida dos dois tipos de adsorção. Através dela, tem-se que ambos os tipos apresentam características específicas que sugerem o comportamento do processo adsorptivo. Sendo a fisiosorção caracterizada pela existência das forças de Van Der Waals, adsorção que pode ocorrer em multicamadas e baixa energia de ativada. Em contrapartida, a quimiosorção é caracterizada pela adsorção somente em monocamada, alta energia de ativado e existência de ligações químicas formadas após o processo adsorptivo.

Figura 6 - Comparação entre o processo de quimiosorção e fisiosorção.

| Fisiosorção | Quimiosorção |
|--|--|
| Forças de Van der Waals | Forças comparáveis a ligações químicas |
| Calor de adsorção inferior a 20 kJ/mol | Calor de adsorção superior a 20 kJ/mol |
| A espécie adsorvida conserva sua natureza | A espécie adsorvida sofre uma transformação e origina-se uma espécie diferente |
| A quantidade adsorvida depende mais do adsorvato do que o adsorvente | A quantidade adsorvida depende tanto do adsorvato como do adsorvente |
| Especificidade baixa | Especificidade elevada |
| Adsorção apreciável somente abaixo do ponto de ebulição do adsorvato | Adsorção pode acontecer a temperaturas elevadas |
| Energia de ativação baixa | Energia de ativação elevada |
| Adsorção pode acontecer em multicamadas | Adsorção somente em monocamadas |

Fonte: Israelachvili, 1991; Masel, 1996; Bruch 1997.

3.6 Cinética de adsorção

Cinética de adsorção é expressa como a taxa de remoção do adsorvato na fase fluida em relação ao tempo, envolvendo a transferência de massa de um ou mais componentes contidos em uma massa líquida externa para o interior da partícula do adsorvente, de onde deverão migrar através dos macroporos até as regiões mais interiores dessa partícula (VIDAL *et al.*, 2014; DOS SANTOS, 2019). Em princípio, a cinética de adsorção pode ser conduzida pela transferência de massa externa, difusão no poro e difusão na superfície (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Para o estudo da cinética de adsorção, são utilizados modelos que examinam o mecanismo controlador do processo de adsorção, como a reação química, controle da difusão e transferência de massa. Contudo, os modelos empregados com maior frequência são os de pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda ordem (ROCHA *et al.*, 2012; DOS SANTOS, 2019).

3.6.1 Modelo de pseudo-primeira ordem

No modelo de pseudo-primeira ordem, assume-se que uma única etapa é determinante para a velocidade de adsorção, ou seja, que a taxa de variação do soluto adsorvido em função do tempo é diretamente proporcional à diferença entre a quantidade de soluto adsorvida no equilíbrio e a quantidade adsorvida em um tempo t qualquer (QIU *et al.*, 2009). A expressão que descreve o modelo está disposta na Equação (1) (LAGERGREN, 1898).

$$q_t = q_e [1 - e^{(-k_1*t)}] \quad (1)$$

Onde q_t é a quantidade adsorvida no tempo t (mg/g), k_1 é a constante de velocidade de adsorção de pseudo-primeira ordem (1/min), t é o tempo (min) e q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g).

3.4.2 Modelo de pseudo-segunda ordem

No modelo de pseudo-segunda ordem, assume-se que a velocidade de adsorção é diretamente proporcional ao quadrado de sítios disponíveis, sendo a natureza do processo química e incluindo a participação de forças de valência ou troca de elétrons entre o adsorvente e adsorvato (ANDIA, 2009; HO; MCKAY, 1998). Normalmente, é utilizado para sistema cujo modelo de força motriz não seja linear, considerando K_s a constante cinética de pseudo-segunda ordem (g·mg-1 /min) (CANTELLI, 2018). A equação que descreve o modelo encontra-se na Equação (2):

$$q_e = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2)$$

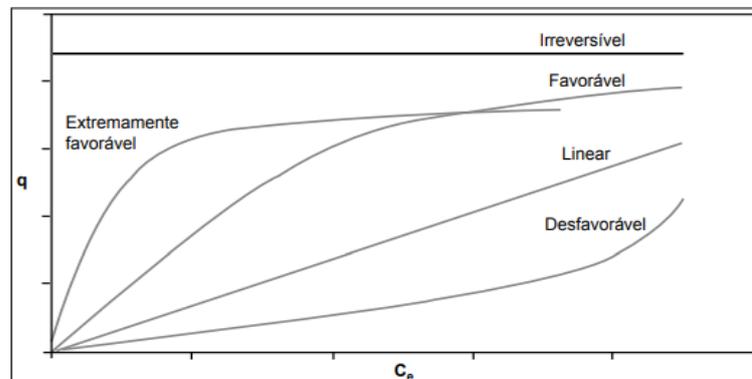
Onde q_t a quantidade adsorvida no tempo t (mg/g), k_2 a constante de velocidade de adsorção de pseudo-segunda ordem [g/(min*mg)], t o tempo (min) e q_e a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g).

3.7 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção explicam a relação de equilíbrio na adsorção por meio de equações matemáticas. Estas, descrevem a relação da concentração do adsorvato e o acúmulo na interface do adsorvente a uma temperatura constante (SHER, 2021). Com base em Nascimento *et al.* (2014), a obtenção de uma isoterma de adsorção é um processo simples em que uma massa de adsorvente é adicionada em um determinado volume de uma série de soluções com concentrações iniciais diferentes e conhecidas. Quando o equilíbrio da adsorção é atingido, tem-se a concentração final de soluto na solução em equilíbrio e a capacidade de adsorção do adsorvente. Desse modo, por meio dos ajustes matemáticos e dos modelos teóricos, as isotermas de adsorção podem ser compreendidas caracterizando assim o equilíbrio do processo adsorptivo (BULCA *et al.*, 2020; SUZUKI, 1990).

De acordo com a Figura 7 existem quatro tipos de isotermas caracterizadas graficamente. Na isoterma linear, a massa de adsorvato retirada por unidade de massa do adsorvente é proporcional à concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. A isoterma favorável ou extremamente favorável, é caracterizada pela alta quantidade de massa de adsorvato retirada por unidade de massa do adsorvente para uma baixa concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. Em relação à isoterma desfavorável, esta ocorre uma grande zona de transferência de massa no leito de adsorção e a massa de adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é baixa mesmo para uma alta concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. A isoterma irreversível é um caso muito favorável, na qual a quantidade adsorvida é independente da concentração do componente na fase fluida (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Figura 7 - Tipos de isotermas.



Fonte: Adaptado de Moreira 2008.

Mediante a isso, existem alguns tipos de isotermas, como apresentado na Figura 7 e muitas equações foram propostas com a finalidade de descrever a relação entre o adsorvato e o adsorvente com base em ajustes de dados experimentais sobre os valores de q (capacidade de adsorção) e C_e (concentração do adsorvato no equilíbrio), dentre elas as isotermas de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson e Sips (MCKAY, 1996; ALI; HULYA, 2010; SOUSA NETO *et al.*, 2011).

A isoterma de Langmuir é uma das equações mais utilizadas para os processos de adsorção com o pressuposto de que existe um número definido de sítios, os sítios têm energia equivalente, as moléculas adsorvidas não interagem entre si, cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida e a adsorção ocorre em monocamada (LANGMUIR, 1916). Neste modelo deve-se considerar que existe um número definido de sítios no adsorvente, que os sítios possuem energia equivalente e as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras. Esta, é representada pela Equação (3):

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x}K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

Onde $q_{m\acute{a}x}$ é a quantidade máxima de cobertura em monocamada (mg/g), C_e é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L), K_L é a constante da isoterma de Langmuir (L/mg) e q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g).

O modelo proposto por Freundlich pode ser aplicado a sistemas não ideais, em superfícies heterogêneas e adsorção em multicamada (MCKAY, 1996; CIOLA, 1981). O modelo considera o sólido heterogêneo, ao passo que aplica uma distribuição exponencial para caracterizar os vários tipos de sítios de adsorção, os quais possuem diferentes energias adsorptivas (FREUNDLICH, 1906). Os valores de $1/n$ indica a capacidade e intensidade de adsorção, ou seja, para valores de $1/n \neq 1$, a constante de Freundlich, K_F , dependem das unidades nos quais q_e e C_e são expressos.

De maneira geral, valores de n entre 1 e 10 indicam que a adsorção é favorável. Para valores de n igual a 1 a adsorção é linear, ou seja, a energia de adsorção é a mesma para todos os sítios. Enquanto para valores de n maiores que 10 ocorre uma interação mais forte entre o

agente adsorvente e o adsorvato (FEBRIANTO *et al.*, 2009). A Equação (4) descreve o modelo proposto:

$$q_e = K_F C_e^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad (4)$$

Onde q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g), C_e é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L), K_F é a constante da isoterma de Freundlich (mg/L)(L/g)^{1/n} e 1/n é o fator de heterogeneidade.

E a Equação (5) descrita por Redlich-Peterson pode ser aplicada para processos adsorptivos em amplas faixas de concentração. Em relação a essa variável, o modelo apresenta uma função exponencial no denominador e dependência linear no numerador, podendo ser aplicado a sistemas homogêneos e heterogêneos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A equação empírica de Redlich-Peterson reúne características dos modelos de Langmuir e de Freundlich, aproximando-se do primeiro em baixas concentrações, quando β tende a 1, e assumindo a forma do segundo em sistemas sob concentrações elevadas, quando β tende a zero (FEBRIANTO *et al.*, 2009).

O modelo de Redlich-Peterson é comumente utilizado para prever os equilíbrios envolvidos na biossorção de metais pesados, e, na maioria desses casos, o valor de β é próximo de 1, indicando que modelo de isoterma de Langmuir se ajustou bem aos dados experimentais (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

$$q_e = \frac{K_R C_e}{1 + a_R C_e^\beta} \quad (5)$$

Onde K_R é a constante do modelo da isoterma de Redlich-Peterson (L/g), a_R é a constante da isoterma de Redlich-Peterson (L/mg) ^{β} , sendo β o adimensional, expoente do modelo da isoterma de Redlich-Peterson que varia entre zero e um, C_e é a concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L) e q_e é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g).

Com o avanço dos estudos, a isoterma de Sips caracteriza uma combinação entre as equações propostas por Freundlich e Langmuir. Por esse modelo, assume-se que a adsorção é heterogênea e monocamada (VILARDI *et al.*, 2018). O modelo de Sips demonstra que se tem

a formação de uma monocamada, mas que as energias dos sítios de adsorção são distintas (GAMOUDI; SRASRA, 2019). A equação proposta incorpora o parâmetro m_s , constante exponencial de Sips, situada no intervalo de zero a um. O modelo é representado pela Equação (6):

$$q_e = \frac{q_{ms} K_S C_e^{m_s}}{1 + K_S C_e^{m_s}} \quad (6)$$

Onde q_e é a quantidade de adsorvato retida no adsorvente no equilíbrio (mg/g), C_e é a concentração atingida no equilíbrio (mg/L), q_{ms} é a capacidade máxima teórica de adsorção de Sips (mg/g), K_S é a constante de equilíbrio de Sips (L/mg) e m_s é a constante exponencial de Sips.

3.8 Termodinâmica

A análise de mecanismos envolvidos como também a influência da temperatura no processo adsorptivo são estudadas de acordo com os parâmetros termodinâmicos. A variação da energia livre de Gibbs (ΔG°) está associada à espontaneidade do processo, o que indica se o mesmo é desfavorável e não espontâneo ou favorável e espontâneo, a depender do valor positivo ou negativo, respectivamente. A energia livre de Gibbs pode ser calculada através da Equação (7).

$$\Delta G^\circ = -R T \ln(K_e) \quad (7)$$

Onde R é a constante de gás universal (8.314 J/mol*K), T é a temperatura (K) e K_e é a constante de equilíbrio termodinâmico.

A variação de entalpia (ΔH°) informa se o processo é endotérmico ou exotérmico, de acordo com o seu valor. Ademais, também revela se a adsorção é química ou física (NASCIMENTO *et al.*, 2014). A variação de entropia (ΔS°) está relacionada a ordem do sistema após o processo adsorptivo e evidencia as mudanças na organização estrutural e energética do sistema.

Com isso, todos estes parâmetros podem ser estimados a partir dos dados de equilíbrio ou isotermas, desde que as medidas sejam efetuadas em temperaturas distintas, com o mínimo de três pontos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A isoterma de adsorção, base dos cálculos termodinâmicos, é um gráfico que fornece a quantidade adsorvida do componente por massa do adsorvente, em função da concentração de equilíbrio desse componente (MCQUARRIE; SIMON, 1997).

Através dos valores de temperatura e das constantes de equilíbrio, os parâmetros de entalpia e entropia podem ser calculados através da equação de Van't Hoff (Equação 8).

$$\ln(Ke) = -\frac{\Delta H^\circ}{R} \frac{1}{T} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (8)$$

Realizando a substituição das Equações (7) e (8), temos a Equação (9):

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T * \Delta S^\circ \quad (9)$$

Onde R é a constante de gás universal (8.314 J/mol*K), T é a temperatura (K), ΔS° é a variação de entropia e ΔH° é a variação de entalpia.

4. METODOLOGIA

O material adsorvente utilizado como objeto de estudo foi obtido através da casca da Castanha-do-Brasil. Para obtenção do pó da mesma, a casca da Castanha-do-Brasil foi submetida a operações unitárias com o objetivo de moer, peneirar, lavar e secar o material a ser estudado.

A caracterização do pó foi realizada por três métodos com a finalidade de analisar o comportamento do pH em contato com o material adsorvente, sua composição química e sua estrutura cristalina. Com o material adsorvente obtido e caracterizado, foram realizados os testes de adsorção para determinação e estudo do processo adsortivo entre a casca da Castanha-do-Brasil e o corante Safranina.

4.1 Obtenção do material adsorvente

A Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) foi obtida no comércio local da cidade de União dos Palmares, Alagoas. Após a sua obtenção, foi preparada no Laboratório de Processos (LAPRO), localizado na Universidade Federal de Alagoas, em Maceió, onde os estudos foram realizados. A castanha obtida encontra-se na Figura 8.

Figura 8 - Castanha-do-Brasil obtida para o respectivo estudo.



Fonte: Autora, 2023.

Inicialmente, as impurezas maiores, como palhas e galhos, foram retiradas. O procedimento de separação da amêndoa e a casca foi realizado de forma manual com auxílio de um martelo para obtenção apenas das cascas, como ilustrado na Figura 9. Em seguida, as cascas foram trituradas em um liquidificador para diminuição das mesmas.

Figura 9 - Casca da Castanha-do-Brasil após a separação manual.



Fonte: Autora, 2023.

Objetivando um aumento da área superficial da casca da Castanha-do-Brasil foi realizada uma moagem do material no moinho de facas, modelo A11 Basic da marca IKA do Laboratório de Tecnologia de Bebidas e Alimentos (LTBA), localizado no Centro de Tecnologia na Universidade Federal de Alagoas. Na Figura 10, encontra-se o moinho utilizado para moagem das cascas.

Figura 10 - Moinho Analítico.



Fonte: Autora, 2023.

Para tornar a amostra mais homogênea, foi selecionada uma granulometria e para isso foi realizado o peneiramento da amostra com a peneira de análise granulométrica da Bertel Indústria Metalúrgica com caixilho e malha fabricados em aço inox, diâmetro interno do aro correspondente a 8x2 polegadas, abertura de 0,6 mm, ASTM 30 e 28 Tyler. Sequencialmente, o material adsorvente foi lavado, duas vezes, e posteriormente foi colocado na centrífuga com água destilada por cerca de 10 min a 2000 rpm, para separação das partículas menores e mais finas. Após a lavagem, foi realizada uma secagem do material a 60 °C por 24 horas para eliminação da água existente. Na Figura 11, encontra-se o pó da casca da Castanha-do-Brasil após o processo de obtenção, lavagem e secagem.

Figura 11 - Casca da Castanha-do-Brasil após a moagem.



Fonte: Autora, 2023.

4.2 Caracterização do material adsorvente

O material adsorvente obtido a partir do pó da casca da Castanha-do-Brasil foi caracterizado por três análises com o objetivo de estudar a estrutura e composição química da mesma, sendo elas: Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), para determinação das ligações químicas existentes e verificação da presença de grupos funcionais na superfície do material; Difração de Raios-X (DRX), para análise da estrutura cristalina do material e o pH no Ponto de Carga Zero (PCZ) para estudar o efeito do pH no material adsorvente com o objetivo de identificar o valor de pH em que as cargas na superfície do material são neutras.

A análise FTIR foi realizada em um espectrofotômetro Shimadzu IRPrestige-21 em acessório de Reflectância Total Atenuada (ATR), onde a faixa espectral foi de $4000-400^{-1}$ com resolução de -4 cm^{-1} . A análise de DRX foi realizada em um Difratorômetro de Raios-X XRD 6000 Shimadzu, onde a tensão foi de 30 kV e a corrente elétrica foi de 40 mA. Os padrões de difração foram efetuados variando de 5 a 90° , com um passo de $0,02^\circ$ e velocidade angular de 2 graus/min. A radiação utilizada foi CuK α . Ambas as análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Nanosistemas Carreadores de Substâncias Ativas (TecNano), localizado no Instituto de Física na Universidade Federal de Alagoas.

O teste de PCZ foi realizado, inicialmente, pela preparação da solução de Cloreto de Sódio (NaCl) 0,1 mg/L. Após, também foram preparadas soluções de Ácido Clorídrico (HCl) e Hidróxido de Sódio (NaOH) 0,1 mg/L. Foram separados 11 Erlenmeyers e estes foram preenchidos com 50 mL de NaCl e seus respectivos valores de pH foram ajustados com as soluções de HCl e NaOH para 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 (MIYAH *et al.*, 2018 apud LINS, 2022). Após o ajuste, colocou-se 0,04 g de material adsorvente em cada Erlenmeyer e estes mantiveram-se em agitação no Shaker por aproximadamente 48 horas. Após o período de agitação, os valores de pH foram medidos.

A partir dos valores de pH medidos antes e após o período estimado de contato, foi plotado um gráfico entre a variação do pH final e inicial em função do pH inicial. Sendo o valor do pH_{PCZ} o valor em que o gráfico intercepta o eixo x.

4.3 Estudos de adsorção

4.3.1 Preparo do adsorvato

O adsorvato utilizado foi obtido no Laboratório de Processos (LAPRO) a partir de uma solução de 1000 mg/L preparada do corante Safranina. Os valores de massa de material adsorvente de 0,04 g e volume de 20 mL foram fixados para execução dos experimentos de adsorção (LINS, 2022). O valor utilizado para leitura da absorbância da Safranina no espectrofotômetro foi de 518 nm, valor este utilizado na literatura (QUITINO, 2021). Abaixo encontra-se a fórmula molecular do corante utilizado.

Tabela 2 - Fórmula molecular do corante Safranina.

| Reagente | Fórmula Molecular |
|-----------|---|
| Safranina | $\text{C}_{20}\text{H}_{19}\text{N}_4^+, \text{Cl}^-$ |

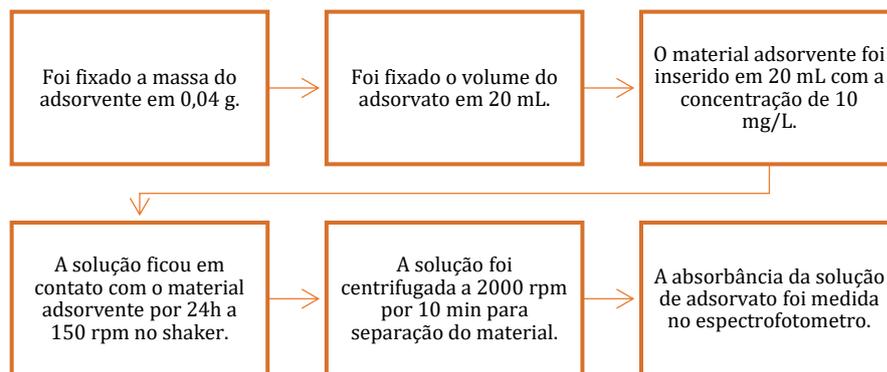
Fonte: Autora, 2023.

4.3.2 Teste de Afinidade

O teste de afinidade foi realizado para avaliar o comportamento do material adsorvente obtido na remoção do corante Safranina, com o intuito de analisar a capacidade de remoção. Inicialmente, foi pesada uma massa de 0,04 g do material adsorvente, a qual foi colocada em contato com 20 mL da solução do corante a 10 mg/L. Este procedimento foi realizado em duplicata para minimização de erros e confiabilidade dos resultados. Em seguida, a solução foi colocada em agitação por 24 horas em 150 rpm.

Após, as amostras foram colocadas para centrifugar por 10 minutos em 2000 rpm para que ocorresse a separação do material adsorvente, fase sólida, e a solução a ser analisada, fase líquida. Com isso, fez-se a leitura da absorvância da fase líquida no espectro no comprimento de onda correspondente a Safranina. O procedimento encontra-se descrito sequencialmente na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia do teste de afinidade.



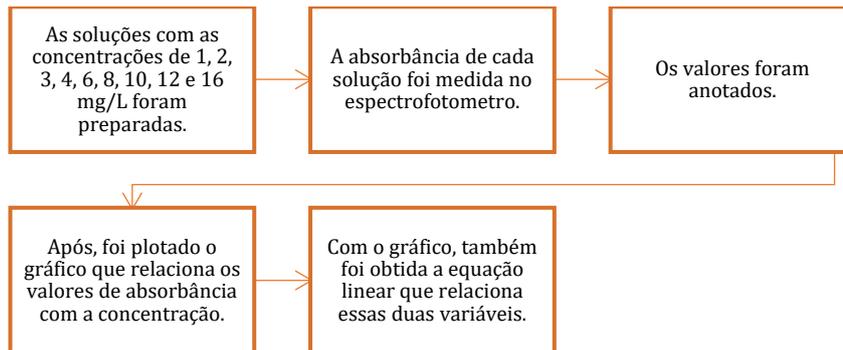
Fonte: Autora, 2023.

4.3.3 Curva de Calibração

A curva de calibração do corante utilizado foi feita a partir da diluição de uma solução de 1000 mg/L em soluções cujas concentrações foram 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12 e 16 mg/L. Em seguida, foi feita a leitura da absorvância de cada solução no espectro no comprimento de onda correspondente à Safranina. Os valores de absorvância foram medidos para as soluções de Safranina com concentrações conhecidas e utilizado o comprimento de onda com base na literatura para o respectivo adsorvato.

A partir desse experimento, foi possível o encontro da relação entre a variação das concentrações com os respectivos valores de absorbância. Com os resultados obtidos, foi plotado um gráfico entre as duas variáveis e encontrada a equação da curva de calibração. O procedimento encontra-se descrito sequencialmente na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma da metodologia da curva de calibração.



Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 14, encontra-se um registro da montagem experimental para o encontro dos parâmetros para construção da curva de calibração do corante Safranina.

Figura 14 - Montagem experimental para curva de calibração.



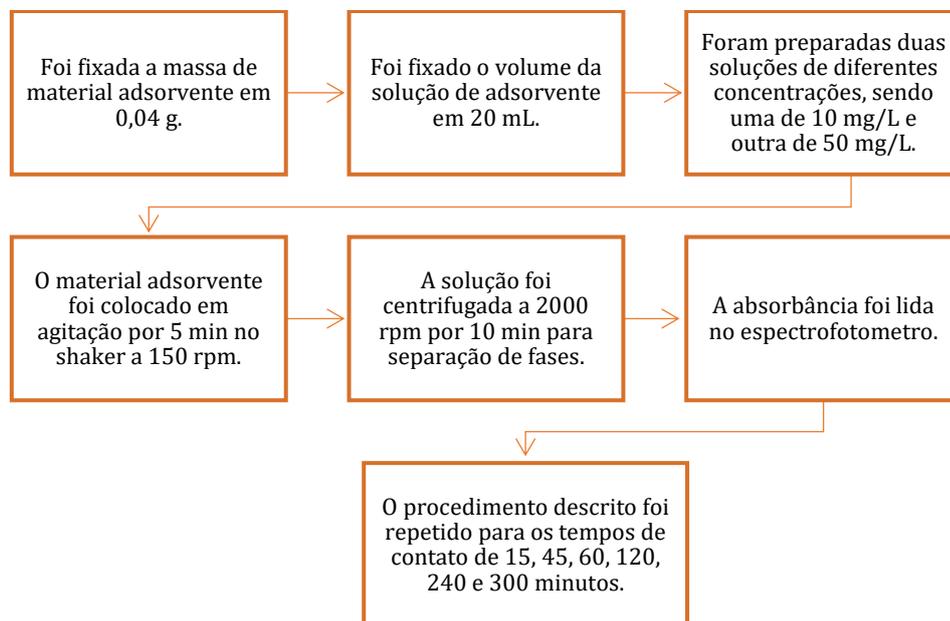
Fonte: Autora, 2023.

4.3.4 Cinética de adsorção

A cinética de adsorção foi realizada para avaliação do comportamento de acordo com a variação do tempo. Inicialmente, foi pesado 0,04 g de material adsorvente e este foi colocado em contato com 20 mL da solução de adsorvato, ou seja, em uma solução de água destilada com corante, nas concentrações de 10 e 50 mg/L. Em seguida, estas soluções foram colocadas sob agitação no shaker por 5 minutos a 150 rpm em temperatura ambiente. Após o período, a amostra foi centrifugada por 10 minutos a 2000 rpm e posteriormente sua absorbância foi lida no espectro. Realizou-se o mesmo procedimento para os tempos de 15, 30, 45, 60, 120, 240 e 300 minutos.

Os dados obtidos foram ajustados através dos modelos matemáticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem apresentados nas Equações (1) e (2), respectivamente, para descrever e estudar o comportamento da curva cinética de adsorção. O procedimento encontra-se descrito sequencialmente na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma da metodologia da cinética de adsorção.



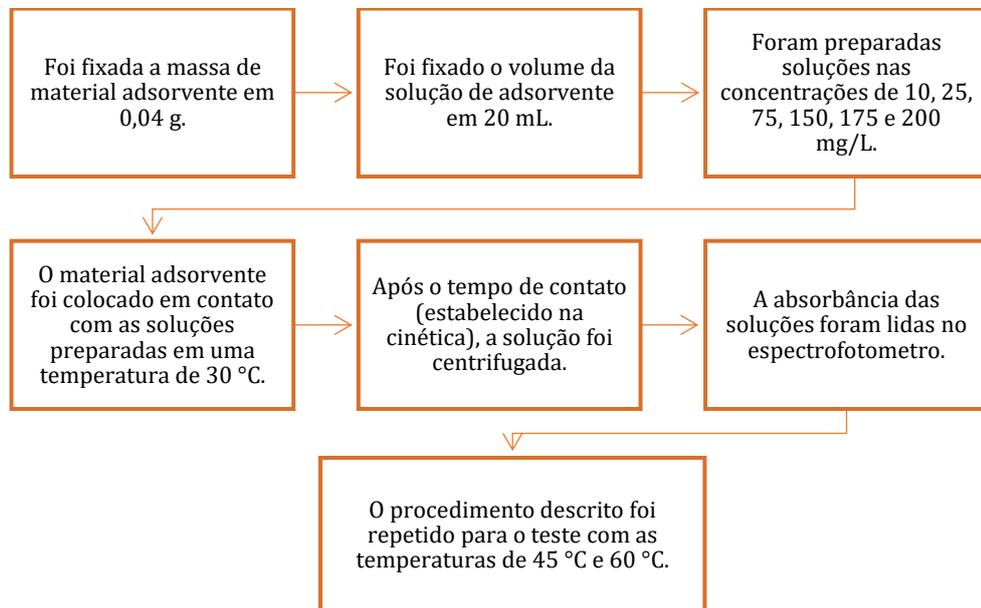
Fonte: Autora, 2023.

4.3.5 Isoterma de adsorção

A isoterma de adsorção foi conduzida de modo a avaliar o comportamento da adsorção em diferentes concentrações e temperaturas. Para esta, foi pesado 0,04 g do material adsorvente e este foi colocado em contato com 20 mL de soluções de adsorvato com diferentes concentrações, sendo elas 10, 25, 50, 75, 100, 150, 175 e 200 mg/L. As amostras foram submetidas a agitação em um shaker com controle de temperatura durante o tempo de equilíbrio determinado através do experimento da cinética de adsorção a 150 rpm. Esse procedimento foi realizado para as temperaturas de 30°C, 45°C e 60 °C. Após o período definido, realizou-se as diluições adequadas para cada solução de modo a possibilitar a leitura da absorbância no espectrofotômetro.

Todos os testes foram feitos em duplicatas para maior confiabilidade dos dados. Os dados obtidos foram ajustados através dos modelos matemáticos de Langmuir (Equação 4), Freundlich (Equação 5), Redlich-Peterson (Equação 5) e Sips (Equação 6).

Figura 16 - Fluxograma da metodologia da isoterma de adsorção.



Fonte: Autora, 2023.

4.3.6 Termodinâmica de adsorção

Para os cálculos termodinâmicos de entalpia (ΔH°), entropia (ΔS°) e energia livre de Gibbs (ΔG°) foram utilizadas as Equação 7 e 8. A energia livre de Gibbs foi calculada pela Equação (7), de acordo com os valores de temperatura utilizados na isoterma e constante de equilíbrio usada foi proveniente do melhor ajuste isotérmico.

Ademais, no equilíbrio através da substituição da Equação (7) na Equação (8) resultando na Equação (9) foi plotado o gráfico da temperatura (K) versus ΔG° (kJ/mol), em que o coeficiente angular e o coeficiente linear deste fornece os valores de ΔS° e ΔH° , respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do material adsorvente

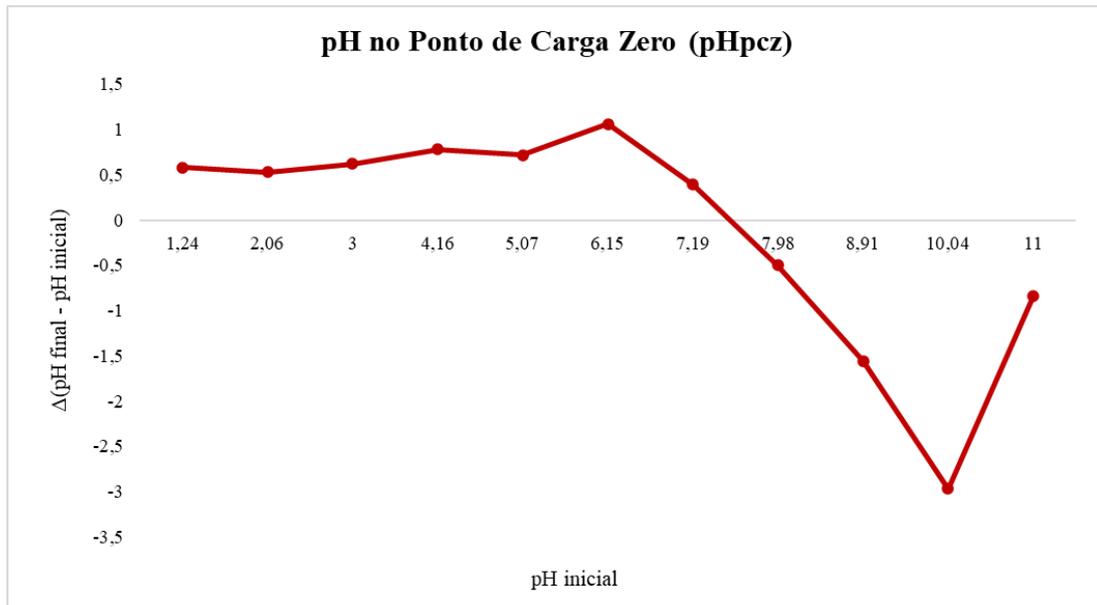
As caracterizações foram realizadas no pó casca da Castanha-do-Brasil com o desígnio de estudar as propriedades físicas e químicas do material adsorvente com base em análises já utilizadas para o estudo desse tipo de material. Com isso, foram feitas as seguintes caracterizações: pH no Ponto de Carga Zero (PCZ), Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

5.1.1 pH no Ponto de Carga Zero (PCZ)

O ponto de carga zero é um parâmetro crítico para determinação quantitativa da carga elétrica existente no material e possui valor de pH da solução no qual a carga de superfície do adsorvente é nula. A superfície do adsorvente torna-se carregada positivamente quando o pH da solução é menor que o pH_{PCZ} e a superfície é carregada negativamente quando o pH está acima do pH_{PCZ} . O valor do pH_{PCZ} é dependente dos diferentes grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente (YANG, 2003 apud MAEBARA, 2022).

Conforme citado, em valores de pH maiores que o pH_{PCZ} , a superfície do material estará carregada negativamente apresentando uma maior afinidade em superfícies carregadas com cargas positivas, possibilitando a atração entre as cargas. O inverso ocorre para valores de pH menores que o pH_{PCZ} , sendo assim a superfície do material adsorvente estará carregada positivamente possuindo afinidade em superfície com cargas negativas. Após a plotagem do gráfico ΔpH ($\text{pH}_f - \text{pH}_0$) em função de pH_0 , a interseção do gráfico com o eixo x representou o valor do pH em que a superfície do material adsorvente é nula. Sendo assim, o valor foi de 7,53, como disposto na Figura 17.

Figura 17 - Gráfico das variações de pH no teste do Ponto de Carga Zero (PCZ).



Fonte: Autora, 2023.

Com isso, o valor do pH em que a superfície do material adsorvente se encontra nula é de 7,53. Logo, para valores de pH maiores que 7,53, a superfície do material se encontra carregada negativamente possuindo atração com superfícies negativas e para valores de pH maiores que 7,53, a superfície se encontra carregada positivamente possuindo atração com superfícies positivas, possibilitando a atração entre as cargas.

5.1.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

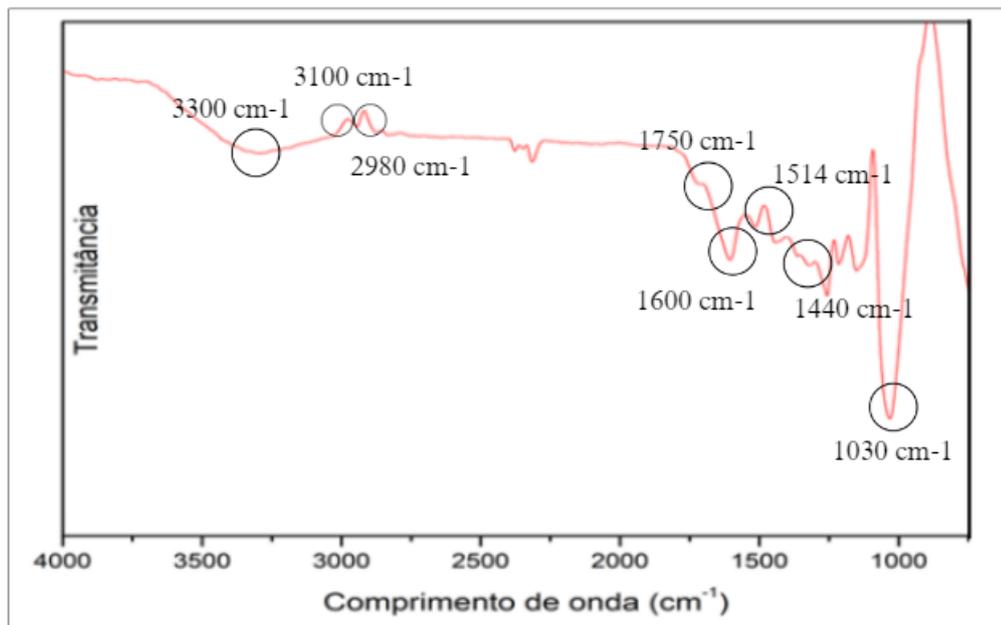
Os principais constituintes da casca da Castanha-do-Brasil são a lignina e a celulose (BONELLI et al., 2001 apud GUERRA *et al.*, 2014). O espectro no infravermelho obtido para a casca da Castanha-do-Brasil (Figura 18) apresentou uma banda intensa em 3300 cm^{-1} correspondente a estiramentos de grupos OH. Em comparação com o FTIR realizado por Guerra, em 2014, percebe-se uma banda característica do estiramento vibracional dos grupos hidroxila presente em carboidratos, ácidos graxos, proteínas, unidades de lignina, celulose e água absorvida (STUART, 2004 e GONÇALVES Jr. *et al.*, 2010 apud GUERRA *et al.*, 2014).

O sinal em 3100 cm^{-1} e 2980 cm^{-1} é referente ao alongamento vibracional de ligações C-H dos grupos de alcanos e ácidos alifáticos, estes grupos estão presentes na estrutura da lignina.

Em 1750 cm^{-1} há presença de grupamentos C=O de aldeídos que para a holocelulose são atribuídos a ácidos carboxílicos e ésteres (STUART, 2004 apud CASARIN, 2014). Em 1600 cm^{-1} pode ser atribuído o alongamento vibracional de ligações C=O de amidas e dos grupos carboxílicos (BARBOSA, 2007 apud CASARIN, 2014). A banda observada em 1514 cm^{-1} corresponde ao alongamento vibracional de ligações C-O de amidas e dos grupos carboxílicos.

A banda 1440 cm^{-1} está relacionada com a deformação da ligação C-H e em 1030 cm^{-1} ocorre os estiramentos C-O, que sugere a presença da lignina por possuir compostos como grupos carboxílicos (PAWLAK Z, 1997 apud AMBRÓSIO, 2013). Com isso, diante da análise realizada, constata-se a presença de diversos grupos funcionais que podem propiciar uma adsorção eficiente, tais como as hidroxilas, amidas, carbonilas e carboxilas.

Figura 18 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

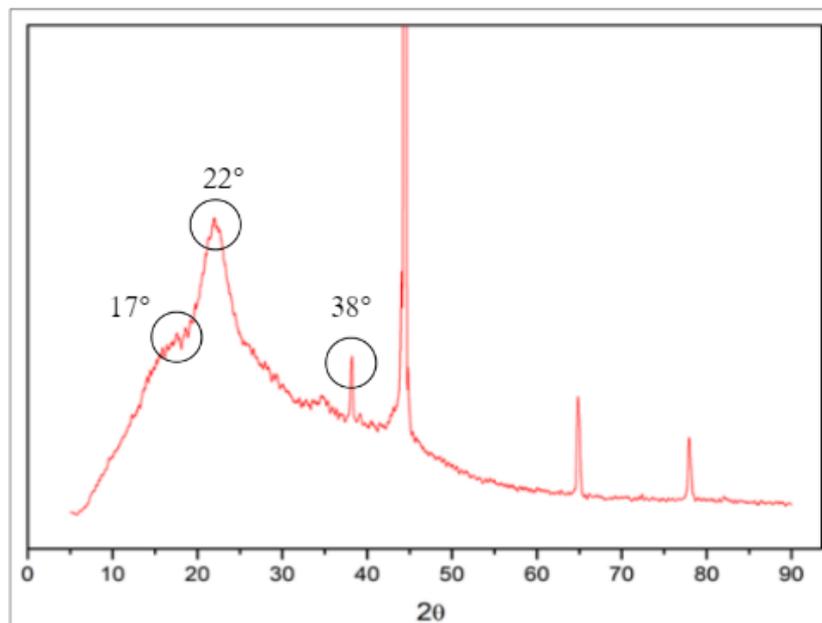


Fonte: Autora, 2023.

5.1.3 Difração Raios-X (DRX)

Na Figura 19, no gráfico da caracterização DRX, existe um pico mais intenso em 22° e maior parte dos padrões caracterizam uma região amorfa do material devido aos domínios amorfos da hemicelulose e lignina presentes na casca da Castanha-do-Brasil. Em comparação ao DRX de (UEDA, 2018), o pico em 2θ igual a 17° corresponde ao plano cristalográfico (101) e os picos em 2θ igual a 22° e 38° correspondem aos planos (002), (023) ou (004), respectivamente (SPINACE *et al.*, 2009 apud UEDA, 2018).

Figura 19 - Difração Raio-X.



Fonte: Autora, 2023.

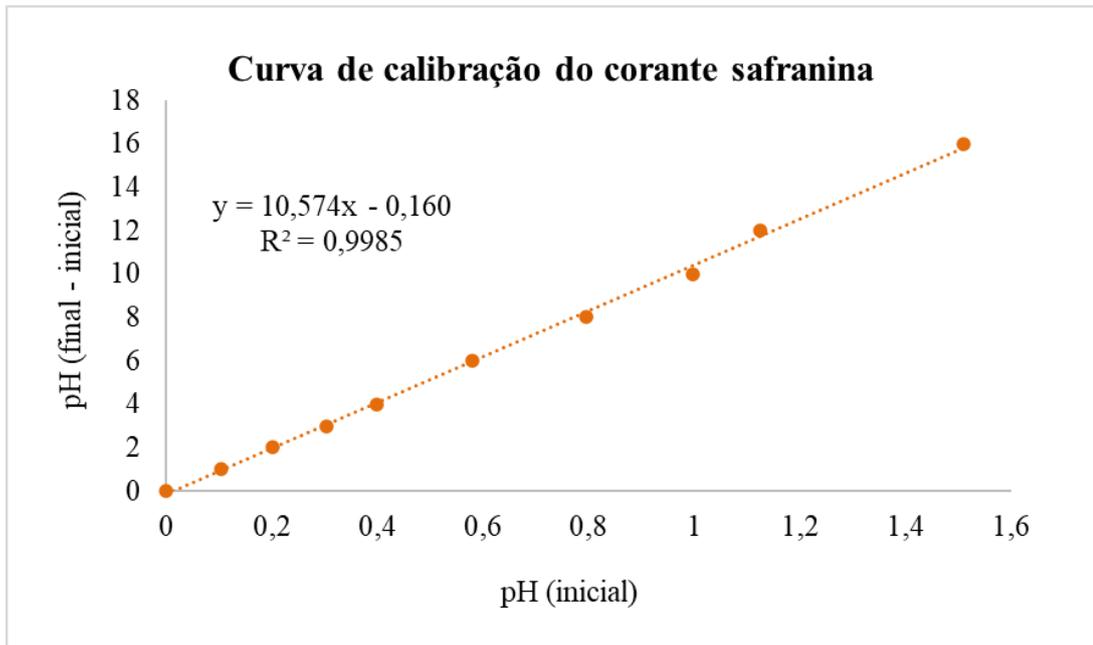
Logo, conforme a literatura, os padrões de difração encontrados indicam sobre as fases cristalinas e amorfas da casca da Castanha-do-Brasil.

5.2 Estudos de adsorção

5.2.1 Determinação da curva de calibração

De acordo com a descrição metodológica, os valores de absorvância encontrados através da sua leitura do espectrofotômetro e as respectivas concentrações conhecidas foram organizados para plotagem do gráfico linear que se encontra na Figura 20. O gráfico, gerou a equação da curva de calibração que relaciona a concentração e a absorvância.

Figura 20 - Curva de calibração do corante Safranina.



Fonte: Autora, 2023.

Logo, de acordo com o gráfico, a equação da curva de calibração do corante Safranina é descrita pela Equação (10), onde y é a concentração em (mg/L) e x é a medida de absorbância lida do espectômetro.:

$$y = 10,574 x - 0,160 \quad (10)$$

De acordo com o pressuposto da Lei de Lambert Beer que relaciona a relação entre a absorbância de uma solução e sua concentração quando atravessada por uma radiação luminosa monocromática colimada, apresenta uma proporção entre o valor da concentração e da absorbância (FERREIRA, 2019). Logo, quanto maior a concentração da solução em questão, maior o valor de absorbância a ser lido, comprovando-se na plotagem da curva de calibração.

5.2.2 Teste de afinidade

O teste de afinidade foi realizado para experimentar a possível ocorrência de adsorção da solução de adsorvato pelo material adsorvente utilizado. A solução inicial tinha aproximadamente a concentração de 10 mg/L e após o período de 24 horas as absorbâncias foram lidas. A partir da equação de calibração obtida na etapa de determinação da curva de calibração e os valores de absorbância lidos, pode-se ter o valor referente à concentração final após período de contato de 24 horas, como exposto na Tabela 3.

Assim, através da média das absorbâncias das duas soluções, o valor final de concentração de equilíbrio foi de aproximadamente 0,05 mg/L.

Tabela 3 – Concentração inicial, final e quantidade adsorvida do teste de afinidade.

| Solução | C _e (mg/L) | C _o (mg/L) | qt (mg/g) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| 1 | 0,03 | 11,54 | 5,755 |
| 2 | 0,07 | 11,54 | 5,735 |
| Média | 0,05 | 11,54 | 5,745 |

Fonte: Autora, 2023.

Dessa forma, para o teste de afinidade realizado, em duplicata por isso a solução (1) e (2), verificou-se que houve a adsorção da solução do corante Safranina pela ação do pó da casca da Castanha-do-Brasil. De acordo com a Equação (10) foram calculados os valores de concentração inicial e concentração final e estes estão dispostos na Tabela 3.

Com esses parâmetros, foi calculada a quantidade adsorvida (qt) através da Equação (12) descrita abaixo, onde C_o e C_e são as concentrações em (mg/L) da solução no início e no equilíbrio, respectivamente, W é a massa em gramas de material adsorvente usado e V é o volume da solução em litros.

$$qt = \frac{(C_o - C_e)V}{w} \quad (12)$$

A quantidade adsorvida calculada foi de 5,74 mg/g para a quantidade de corante adsorvido pelo material adsorvente. Além disso, chegou a remover cerca de 99% para uma concentração de aproximadamente 10 mg/L. De acordo com os resultados, os valores foram satisfatórios para o início dos testes em adsorção.

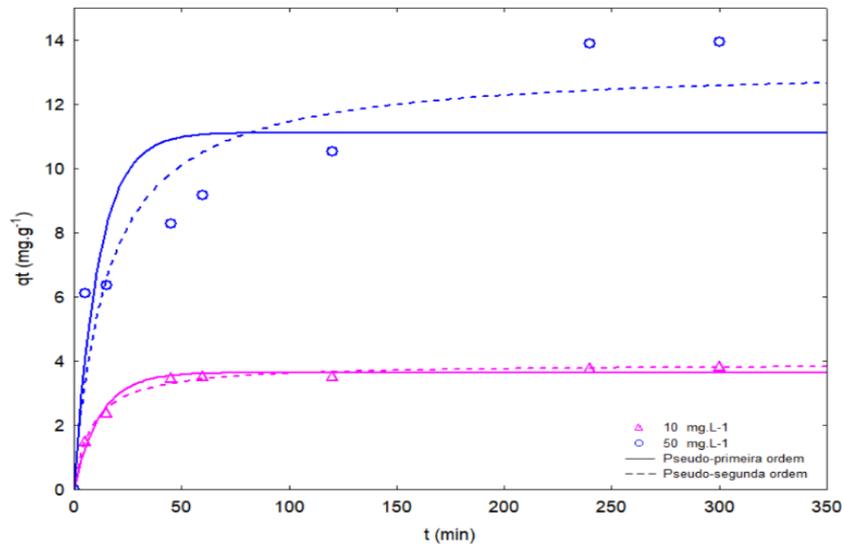
5.2.3 Cinética de adsorção

Um dos métodos para avaliação de um material adsorvente é por meio da cinética de adsorção. Esta, tem como objetivo a mensuração da taxa de adsorção de um determinado adsorbato pela ação de um material adsorvente. No presente trabalho, foi analisada a taxa de adsorção do corante Safranina pela ação do pó obtido da casca da Castanha-do-Brasil para determinação do tempo necessário para que o corante seja adsorvido pela superfície do material, ou seja, o tempo de equilíbrio.

Os dados experimentais foram ajustados pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem e encontram-se dispostos na Figura 21. Nesta, pode ser observado o efeito do tempo de contato entre o material adsorvente e o corante Safranina.

De acordo com a plotagem do gráfico e após os ajustes, verificou-se que o tempo de equilíbrio para concentração de 10 mg/L e para 50 mg/L foi de 5 horas (300 minutos) para o adsorvente proveniente da casca da Castanha-do-Brasil.

Figura 21 – Ajustes cinéticos de adsorção dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.



Fonte: Autora, 2023.

Através dos ajustes realizados, a Tabela 4 foi gerada. Nesta, encontram-se os valores dos ajustes dos modelos cinéticos e suas respectivas constantes. Em concordância com os resultados obtidos, o modelo que mais se ajustou aos valores experimentais foi o de pseudo-segunda ordem para as duas concentrações utilizadas como fonte de estudo, 10 mg/L e 50 mg/L.

Os valores do Erro Médio Relativo (ARE) para as duas concentrações foram menores no modelo de pseudo-segunda ordem em relação aos valores do modelo de pseudo-primeira ordem, sendo assim o modelo mais representativo dos ensaios realizados, por apresentarem erros mais baixos conclui-se que o ajuste foi melhor.

Sob outra perspectiva, a quantidade adsorvida no equilíbrio experimental e a obtida através dos ajustes foram comparadas e através dos resultados obtidos verificou-se que os valores de quantidade adsorvida no equilíbrio do modelo de pseudo-segunda ordem se aproximaram mais dos valores experimentais, sendo para concentração de 10 mg/L, a quantidade adsorvida em equilíbrio de 3,82 mg/g e a do ajuste 3,92 mg/g e para concentração de 50 mg/L, a quantidade adsorvida em equilíbrio de 13,96 mg/g e a do ajuste 13,23 mg/g.

Além disso, os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram mais próximos de 1, apresentando assim resultados mais satisfatórios no modelo de pseudo-segunda ordem. Com os dados de ajustes da regressão linear mais próximos de 1, verifica-se então que os valores experimentais apresentaram menos variações, ou seja, maior compatibilidade, em comparação com os dados preditos pelo modelo de pseudo-segunda ordem.

Tabela 4 - Resultados das variáveis dos ajustes cinéticos de adsorção.

| Modelo | 10 mg L⁻¹ | 50 mg L⁻¹ |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| qe_{experimental} | 3,82 | 13,96 |
| PPO | | |
| q1 (mg g ⁻¹) | 3,64 | 11,12 |
| k ₁ (min ⁻¹) | 0,082 | 0,088 |
| R ² | 0,985 | 0,764 |
| ARE (%) | 5,39 | 20,19 |
| PSO | | |
| q2 (mg g ⁻¹) | 3,92 | 13,23 |
| k ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹) | 0,0309 | 0,0048 |
| R ² | 0,995 | 0,936 |
| ARE (%) | 2,37 | 14,38 |

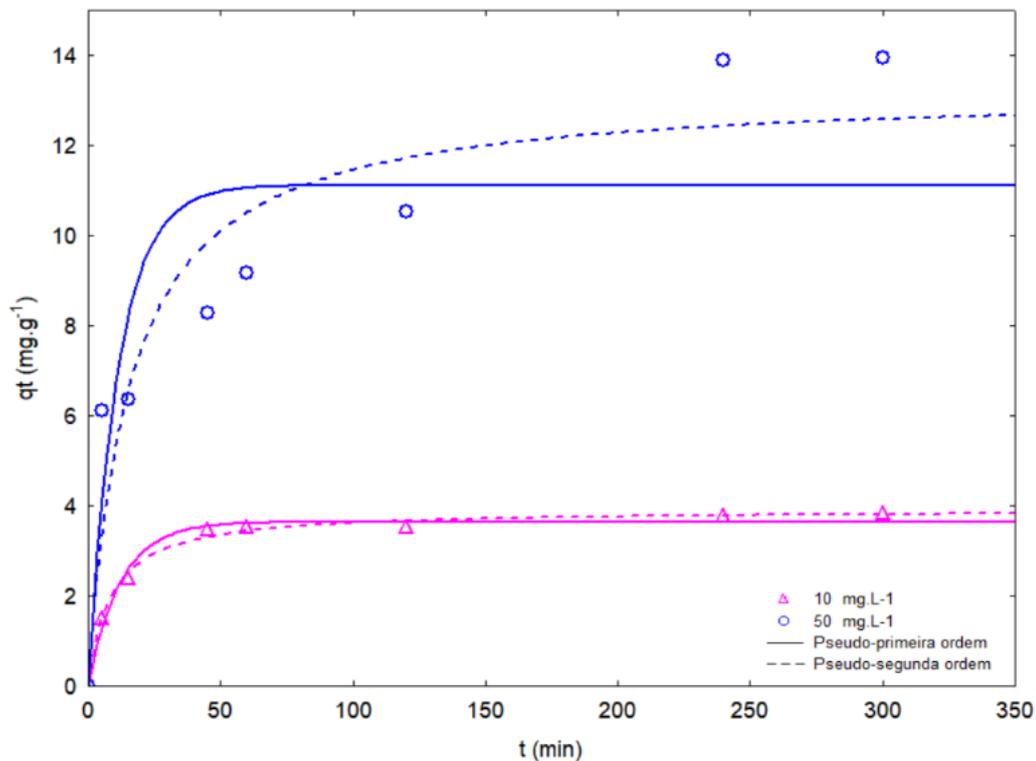
Fonte: Autora, 2023.

Mediante os modelos matemáticos da cinética de adsorção e com a interpretação do gráfico, sugere-se que o modelo de pseudo-segunda ordem foi o mais adequado para interpretação do mecanismo da adsorção entre o corante Safranina e o pó da casca da Castanha-do-Brasil nas condições estudadas. Com isso, de acordo com o exposto na fundamentação teórica, assume-se que a velocidade de adsorção é diretamente proporcional ao quadro de sítios disponíveis, sendo a natureza do processo química a partir da troca ou compartilhamento de elétrons.

5.2.4 Isoterma de adsorção

As isotermas de adsorção do corante Safranina foram ajustadas de acordo com os modelos de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson e Sips. Na Figura 22, encontra-se a representação gráfica desses modelos para as temperaturas de 30°C, 45°C e 60°C. Com isso, pode-se verificar que os modelos Langmuir e Sips representaram bem a isoterma de adsorção do corante Safranina através do material adsorvente obtido pela casca da Castanha-do-Brasil.

Figura 22 - Ajustes isotérmicos.



Fonte: Autora, 2024.

A isoterma de adsorção tem como principal objetivo estimar o mecanismo de adsorção que ocorre, além de identificar a natureza da interação entre o adsorvato e o adsorvente. Ademais, através da Figura 22, observa-se que o aumento da temperatura favorece o aumento da quantidade adsorvida e através disso o processo é caracterizado endotérmico. Com isso, o aumento da temperatura beneficia o aumento do deslocamento da concentração de equilíbrio, favorecendo assim o processo de adsorção.

Tabela 5 - Resultados das variáveis dos ajustes isotérmicos de adsorção.

| Modelos | | 30°C | 45°C | 60°C |
|------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Langmuir | K_L | 0,076 | 0,181 | 0,257 |
| | Q_{MÁX} | 19,22 | 27,94 | 27,64 |
| | R² | 0,968 | 0,871 | 0,982 |
| | ARE | 6,75 | 28,37 | 8,51 |
| | AIC | 8,24 | 29,14 | 11,06 |
| Freundlich | n | 3,763 | 5,0476 | 5,4574 |
| | K_F | 4,732 | 10,331 | 11,252 |
| | R² | 0,929 | 0,827 | 0,901 |
| | ARE | 16,85 | 34,93 | 20,41 |
| | AIC | 15,45 | 31,78 | 26,67 |
| Redlich-Peterson | K_{rd} | 0,3316 | 0,5668 | 1,1003 |
| | A_{rd} | 0,000258 | 0,00016 | 0,00051 |
| | B_{rd} | 1,7523 | 1,8878 | 1,8504 |
| | R² | 0,712 | 0,413 | 0,738 |
| | ARE | 27,25 | 38,36 | 30,33 |
| | AIC | 32,98 | 47,61 | 40,15 |
| Sips | K_s | 0,0466 | 0,2395 | 0,3127 |
| | Q_{MÁX} | 18,2518 | 29,3496 | 28,709 |
| | m_s | 1,2429 | 0,7965 | 0,8187 |
| | R² | 0,967 | 0,875 | 0,986 |
| | ARE | 6,46 | 30,13 | 6,01 |
| | AIC | 13,83 | 33,68 | 13,97 |

Fonte: Autora, 2024.

Com base no coeficiente de determinação (R^2), no Erro Médio Relativo (ARE) e no Critério de Informação de Akaike (AIC) foram analisados os resultados dos ajustes realizados. Pelo resultado obtido através do Erro Médio Relativo (ARE), o modelo de Sips apresentou o melhor comportamento devido aos valores serem menores comparados ao modelo de Langmuir.

Os modelos de Freundlich e de Redlich apresentaram altos valores de ARE e AIC, logo, não representam o mecanismo de adsorção do sistema estudado, além disso o fator de heterogeneidade “n” do modelo de Freundlich apresentou resultados maiores que 1, o que não condiz com as pressuposições favoráveis do modelo. De acordo com os valores de R^2 é notado que o modelo de Langmuir apresentou resultados mais satisfatório.

Com isso, mediante os resultados encontrados, a isoterma que tende a descrever de forma mais adequada processo adsorptivo estudado é a isoterma de Sips. Logo, de acordo com Vilardi (2018), sugere-se que a adsorção é heterogênea e monocamada. A adsorção heterogênea é caracterizada pela não uniformidade em termos de propriedades adsorventes, ou seja, existem diversos sítios ativos de adsorção e estes possuem características diferentes.

5.2.5 Termodinâmica de adsorção

Na termodinâmica de adsorção foram analisadas algumas variáveis conforme a mudança de temperatura em que a adsorção ocorreu. Com isso, os parâmetros termodinâmicos como variação de entalpia (ΔH°), variação da energia livre de Gibbs (ΔG°) e variação de entropia (ΔS°) foram encontrados e estão dispostos na Tabela 6 utilizando a Equação (9) e o gráfico de temperatura versus energia livre de Gibbs.

Tabela 6 - Parâmetros termodinâmicos.

| Adsorvato | ΔG° (kJ/mol) | | | ΔH° (kJ/mol) | ΔS° (kJ/mol) |
|-----------|---------------------------|---------|---------|------------------------------|------------------------------|
| | Temperatura | | | | |
| Safranina | 303 K | 318 K | 353 K | 65,187 | 0,2983 |
| | -24,463 | -31,261 | -33,412 | | |

Fonte: Autora, 2024.

Os dados utilizados para os cálculos termodinâmicos foram provenientes dos resultados encontrados na isoterma de adsorção do corante Safranina pelo pó da casca da Castanha-do-Brasil. Ademais, os parâmetros dispostos na Tabela 6 representam características importantes sobre o mecanismo e comportamento do processo adsortivo estudado. Como destacado por Nascimento (2014), a energia livre de Gibbs caracteriza se o processo ocorre espontaneamente ou não de acordo com o seu respectivo valor. Por conseguinte, no caso estudado, esta apresentou um resultado negativo e devido à isso o processo é considerado espontâneo.

Com relação ao valor encontrado para entalpia, este apresentou um valor positivo, o que indica que a troca iônica que ocorre durante o processo adsortivo é endotérmico. O valor da variação da entropia determina se a entropia aumenta ou diminui no processo de adsorção, pois existe uma relação entre a ordem-desordem da interface corante-adsorvente (MARTINS FILHO, 2012). Logo, o valor positivo da variação de entropia indica que as moléculas ou partículas em um sistema estão distribuídas de maneira mais aleatória ou desordenada.

6. CONCLUSÃO

A casca da Castanha-do-Brasil apresentou resultados satisfatórios para o seu uso como material adsorvente para adsorção do corante Safranina da água contaminada. Como discutido, a poluição ambiental e o gasto excessivo de água que é descartada das indústrias têxteis é alta, o que gera impactos negativos ao meio ambiente e a sociedade que está inserida dentro desse contexto.

Quanto à caracterização do material adsorvente, através da plotagem do gráfico para o este de pH no Ponto de Carga Zero (PCZ) tem-se que o valor foi de 7,53. Com isso, a superfície do adsorvente é carregada positivamente em valores de pH menores que o pH_{PCZ} e negativamente quando os valores de pH são maiores que o pH_{PCZ} . A Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) em comparação com as bandas características obtidas através da literatura foi verificado a existência de estiramentos de hidroxila, lignina, celulose, amidas, grupamentos de aldeídos e grupos carboxílicos. A Difração Raio-X (DRX) comprovou a predominância da região amorfa do material devido a presença da lignina e a hemicelulose.

O teste de afinidade comprovou a adsorção do corante Safranina pelo material adsorvente estudado apresentando a diminuição de concentração de adsorvato presente na água. Além disso, a quantidade adsorvida para quantidade de corante adsorvido. Com os estudos de adsorção, pode-se verificar que o modelo que mais se ajustou aos dados experimentais nas condições estudadas foi o modelo de pseudo-segunda ordem, para as concentrações de 10 mg/L e 50 mg/L. Mediante a esse resultado, temos que a natureza do processo adsorativo é química a partir da troca ou compartilhamento de elétrons.

Ademais, a isoterma que se adequou melhor os dados experimentais foi o modelo de Sips, caracterizado por apresentar pressuposições dos modelos de Langmuir e Freundlich, como a ocorrência da adsorção em monocamada e de forma heterogênea. Dessa forma, de acordo com o modelo, sugere-se que o processo adsorativo é caracterizado por ser heterogêneo e em monocamada. Em concordância com o aumento do valor das constantes de equilíbrio conforme o aumento da temperatura, o valor da entalpia do processo adsorativo é positiva, indicando um processo adsorativo endotérmico.

É válido ressaltar que o corante Safranina sendo um corante básico catiônico tende a ter atração à superfícies carregadas negativamente, como no caso da lignina, que faz parte da composição da casca e apresenta grupos funcionais como hidroxilas e metoxilas que favorecem o processo adsortivo em questão. Contudo, comprova-se que o processo adsortivo foi satisfatório, bem como a obtenção e caracterização do pó da casca da Castanha-do-Brasil.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência do pH na adsorção do corante Safranina utilizando como adsorvente o pó da casca da Castanha-do-Brasil;
- Estudar o comportamento da adsorção mediante a variação da massa de adsorvente utilizado para analisar e encontrar a massa com maior eficiência na adsorção;
- Testar o uso do adsorvente apresentado em outros corantes e de forma complementar avaliar a adsorção com estes determinados corantes;
- Observar a influência de outros parâmetros como agitação, temperatura, volume e massa de adsorvente no estudo de remoção do corante Safranina;
- Avaliar a aplicação em uma Estação de Tratamento de Água e a viabilidade de implantação para o tratamento de águas industriais contaminadas com corantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIT, 2023. **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confeção: Perfil do Setor Têxtil no Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>.
- ABREU, J; LOPES, C. R., RIBEIRO, R., & FERNANDES, J. **Plantas com risco de extinção depositadas no herbário da Amazônia Meridional, Alta Floresta, Mato Grosso, Brasil**. Enciclopédia biosfera, v. 15, n. 28, 2018.
- ALI, R.; HULYA, K. **Adsorption of Pb (II) ions from aqueous solution by native and activated bentonite: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study**. Journal of Hazardous Materials, v. 179, n. 1-3, p. 332-339, nov./jan., 2010.
- ALMEIDA, É. J. R.; DILARRI, G.; CORSO, C. R. **A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes**. 2016.
- ALMEIDA, José Jonas. **Do extrativismo à domesticação: as possibilidades da castanha-do-pará**. 2015. Tese (Doutorado em História Econômica) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- AMBRÓSIO, J. *et al.* **Caracterização termo-química de casca de Castanha-do-Pará. 12º Congresso Brasileiro de Polímeros**. 2013.
- ANDIA, J. P. M. **Remoção de Boro de Águas e Efluentes de Petróleo por Adsorção**, 2009.
- BARBOSA, L. C. A. **Infrared spectroscopy for characterization of organic compounds**, Ed. UFV: Viçosa, 2007, 189 p.
- BONELLI, P.R.; DELLA ROCCA, P.A.; CERRELLA, E.G.; CUKIERMAN, A.L. **Effect of pyrolysis temperature on composition, surface properties and thermal degradation rates of Brazil Nut shells**. Bioresource Technology 76 (2001) 15-22.
- BULCA, Ö. *et al.* Performance investigation of the hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic modelling. **Journal of Water Process Engineering**, p. 101821, 2020.
- CANTELLI, A. M. D. **Adsorção de corante por um bioissorvente obtido do casulo do bicho-da-seda (bombyx mori): Experimentos e modelagem**. 2018. p. 254. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.
- CARABINEIRO, S. A. C. *et al.* **Adsorption of ciprofloxacin on surface-modified carbon materials**. Water Research, v. 45, n. 15, p. 4583–4591, 2011.
- CASARIN, J. **Adsorção de íons metálicos utilizando a casca da semente de Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K) como bioissorvente**. Dissertação da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2014.
- CIOLA, R. **Fundamentos da catálise**. São Paulo: Moderna, 1981.
- CONAMA, 1986. Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução CONAMA N° 001, de 23/01/1986.

DOS SANTOS, B. A. **Compósito de zeólita A magnética sintetizada a partir das cinzas volantes do carvão para adsorção de poluentes metálicos**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

FEBRATEX GROUP. **Indústria da moda é a que mais gasta água a nível mundial**. Tecnotêxtil Brasil, 2021.

FEBRIANTO, J. *et al.* **Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, p. 616-645, 15 mar. 2009.

FERREIRA, A. **Ensino de química experimental de um espectrofotômetro alternativo na região do visível**. Instituto Federal de Alagoas. 2019.

FORMIGONI, I. 2018. A exportação de castanha do Pará. Disponível em: <<http://www.farmnews.com.br/dados/exportacao-de-castanha-do-para/>>.

FREUNDLICH, H. M. **Over the adsorption in solution**. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 57, p. 385-470, 1906.

GAMOUDI, S; SRASRA, E. **Adsorption of organic dyes by HDPy+- modified clay: Effect of molecular structure on the adsorption**. *Journal of Molecular Structure*, v. 1193, n. 5, p. 522-531, mar./mai, 2019.

GE, Q.; LIU, H. **Tunable amine-functionalized silsesquioxane-based hybrid networks for efficient removal of heavy metal ions and selective adsorption of anionic dyes**. *Chemical Engineering Journal*, v. 428, n. May 2021, p. 131370, 2022.

GEORGIN, J. **Avaliação do potencial de cascas residuais como biossorbentes para o tratamento de efluentes de simulados têxteis**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

GERAQUE, Eduardo. **Observatório de Comércio e Ambiente na Amazônia: Castanha é um dos pilares da bioeconomia da Amazônia**. 2022.

GONÇALVES Jr., A. C.; NACKE, H.; FÁVERE, V. T.; DIVINO, G. **Comparação entre um trocador aniônico de sal de amônio quaternário de quitosana e um trocador comercial na extração de fósforo disponível em solos**. *Química Nova*, v. 33, p. 1047-1052, 2010.

GUERRA, B. *et al.* **Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente: Estudos e Perspectivas**. Consórcio Projeto REGSA. Florianópolis, 2014.

HO, Y. S.; MCKAY, G. **A Comparison of Chemisorption Kinetic Models Applied to Pollutant Removal on Various Sorbents**. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 76, n. 4, p. 332- 340, 1998.

HORVAT, A. J. M.; PETROVIC, M.; BABIC, S.; PAVLOVIC, D. M.; ASPERGER, D.; PELKO, S.; MANCE, A. D.; KASTELAN-MACAN, M. **Analysis, occurrence and fate anthelmintics and their transformation products in the environment**. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 31, p. 61-24, 2012.

KAUR, Sumanjit *et al.* **Synthesis and adsorption properties of mesoporous material for the 55 removal of dye safranin: Kinetics, equilibrium, and thermodynamics**. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, [s. l.], v. 22, p.19–27, 2015. Disponível em: Acesso em: 30 set. 2021.

KUNZ, A.; PERALTA, P.; MORAES, S.; DURÁN, N.; **Quim. Nova.** 2002. 25, 78.

LAGERGREN, S. **About the theory of so-called adsorption of soluble substances.** Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens, v. 24, n. 4, p. 1–39, 1898.

LANGMUIR, I. **The dissociation of hydrogen into atoms.** III. The mechanism of the reaction. *Journal of the American Chemical Society*, v. 38, n. 6, p. 1145-1156, abr./jun. 1916.

LINS, P. **Avaliação da influência dos parâmetros de síntese de hidróxidos duplo lamelares ZnAl para aplicação como adsorventes em tratamento de água.** 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas.

LOCATELLI, M., E. P. da SILVA FILHO, A. H. VIEIRA, E. P. MARTINS, e P. L. de L. PEQUENO. **Castanha-do-brasil: Opção Para Solo De Baixa Fertilidade Na Amazônia.** 2003.

MARTINS FILHO, R. T. **Biossorventes – biomassa de aguapé e esferas de alginato/goma do cajueiro – para adsorção de azul de metileno.** 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MARIANO, M. **Têxteis: Insumos e Práticas Sustentáveis.** Química e derivados, 2023.

MCKAY, G. **Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters.** Boca Raton: CRC Press, 1996.

MCQUARRIE, D. A.; SIMON, J. D. **Physical Chemistry: a molecular approach.** Califórnia: University Science Book, 1997.

MENDES, O. **Setor têxtil: Produção, Comércio internacional e perspectivas para o Brasil, Nordeste, Ceará e Pernambuco em 2021.** 2021.

NAJA, Ghinwa; MURPHY, Vanessa; VOLESKY, Bohumil. **Biosorption, metals.** Wiley Encyclopedia of Industrial Biotechnology, 2010.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** E-book. 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2014. (Estudos da pós-graduação).

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020. (Estudos da pós-graduação).

NUNES, Giovanna Ribeiro. **Geração e tratamento de efluentes da indústria têxtil.** 2019. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PASSARINI, I., & BELINI, U. (2020). **RESUMO DE TCC: REAPROVEITAMENTO DA CASCA DA CASTANHA-DO-BRASIL NO DESIGN DE EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS.** IX Sustentável, 6(3), 169–170. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n3.169-170>.

PATIÑO, Y.; DÍAZ, E.; ORDÓÑEZ, S. **Performance of different carbonaceous materials for emerging pollutants adsorption.** *Chemosphere*, v. 119, p. S124–S130, 2015.

- PAWLAK Z.; PAWLAK, A. S. *Applied Spectroscopy Reviews*, 32(4), 349-383, 1997.
- PINHEIRO, Raquel da Costa. *et al.*, 2022. **Estudo do resíduo sólido do processamento da Castanha-do-Brasil para a obtenção de subprodutos com valor agregado.** *Conjecturas*, 672–691.
- PIQUET, ABM; MARTELLI, MC. **Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão.** *Investigação, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.] , v. 11, n. 3, pág. e27311326506, 2022.
- PRANCE, G. T. e MORI, S. A. 1979. **Lecythidaceae – Part I: the actinomorphic – flowered.**
- QIU, H. *et al.* **Critical review in adsorption kinetic models.** *Journal of Zhejiang University Science A*, v. 10, n. 5, p. 716-724, 2009.
- QUINTELA, D. *et al.* **Utilização da concha de sururu (*Mytella falcata*) na remoção de corantes de solução aquosa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Maceió, 2020.
- QUITINO, M. **Utilização de resíduo de café para remoção adsorptiva de corantes em solução aquosa.** Trabalho de Conclusão de Curso. Química Tecnológica e Industrial. Universidade Federal de Alagoas. 2021.
- ROCHA, O. R. S. *et al.* **Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF2R.** *Química Nova*, v. 35, n. 7, p. 1369-1374, set./mar. 2012.
- RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Process.** New York: John Wiley & Sons, 1984.
- SALGADO, Camila Monteiro; SOUZA, Olavo Tavares de. **Variáveis morfológicas, estimativa de parâmetros e dissimilaridade genética em folhas de Castanheira-do-Brasil.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, PA, 2022.
- SHER, Ana Carolina. **Adsorção de corante vermelho do congo empregando carvão ativado de casca de arroz.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS). Cerro Largo, 2017.
- SILVA, E.; PIPI, A. *et al.* **Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre II em meio aquoso.** *Revista Matéria*, 2019.
- SILVA, T. P. da, PONTES, A. N., & ALBURQUEQUE, A. R. (2020). **Cadeias de produção sustentáveis no extrativismo de castanha do Brasil na Amazônia brasileira.** *Brazilian Journal of Development*, 6(8), 63460–63478. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-687>.
- SILVA, Rayane; SALVADOR, Marcela et al. **Tratamento de efluentes na remoção de corante utilizando biomassas.** *Revista Eletrônica – Estácio Recife*. 2020.
- SOUSA NETO, V. O. *et al.* **Use of coconut bagasse as alternative adsorbent for separation of copper (II) ions from aqueous solutions: isotherms, kinetics, and thermodynamic studies.** *BioResources*, v. 6, n. 3, p. 3376-3395, 2011.

SOUZA, C. D. R.; SILVA, K. C. **Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) para produção de carvão ativado.** Research, Society and Development, v. 10, n. 2, p. e53310212698, 27 fev. 2021.

SOUZA, M. **Adsorção de corante diazo secundário por ZnAl/Hidróxido Duplo Lamelar.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas. 2022.

SPINACE, M. A. *et al.* **Characterization of lignocellulosic curaua fibres.** Carbohydrate Polymers, v. 77, n. 1, p. 47-53, 2009. ISSN 0144-8617.

STUART, B. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and applications.** John Wiley & Sons Inc: New York, 2004.

SUZUKI, M. **Adsorption Engineering.** Tokyo: Elsevier Science, v. 25, 1990.

TOMASSONI, F. *et al.* **Otimização da eletrocoagulação aplicada em efluente têxtil.** Revista DAE. n. 219, v. 67, 2019.

UEDA, K. **Extração de nanocristais de celulose da casca da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia Excelsa*).** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Grande Dourados. 2018.

VIDAL, C. B.; RAULINO, G.S.C.; DA LUZ, A. D.; DA LUZ, C.; NASCIMENTO, R.F.; De Keukeleire, D. Experimental and Theoretical Approach to Multicomponent Adsorption of Selected Aromatics on Hydrophobically Modified Zeolite. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 59, p. 282-288, dezembro, 2014.

VILARDI, G.; DI PALMA, L.; VERDONE, N. Heavy metals adsorption by banana peels micro-powder: Equilibrium modeling by non-linear models. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 3, p. 455–464, 2018.

WADT, L. H. DE O. **Árvore do conhecimento: castanha-do-brasil.** Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/castanha-do-brasil/arvore/CONT000fthbvzx02wyiv80otz6x99cj3lnt.html#>>.

WADT, L. H. DE O. *et al.* **Primary and secondary dispersal of *Bertholletia excelsa*: Implications for sustainable harvests.** Forest Ecology and Management, v. 415–416, n. February, p. 98–105, 2018.

YANG, R. T. **Adsorbents: Fundamentals and Applications.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIDADE DE DISSERTAÇÃO, TESE, TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, ESPECIALIZAÇÃO OU MEMORIAL ACADÊMICO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS (RIUFAL)

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação, autorizo ao Repositório Institucional da Universidade Federal de Alagoas (RIUFAL) a disponibilizar, através do site <http://www.repositorio.ufal.br>, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei n. 9610/98, o texto integral da obra abaixo citada, conforme permissões assinaladas, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção de científica brasileira, a partir desta data.

1 Identificação do material bibliográfico

| | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Dissertação + Produto Educacional |
| <input type="checkbox"/> | Dissertação |
| <input type="checkbox"/> | Tese |
| <input type="checkbox"/> | Trabalho de Conclusão de Curso |
| <input type="checkbox"/> | Especializações |
| <input type="checkbox"/> | Memorial Acadêmico |

2 Identificação da Dissertação, Tese, TCC, Especialização ou Memorial Acadêmico

| | | | |
|--------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Autoria: | | | |
| Lattes | | | |
| Lattes Atualizado: | <input type="checkbox"/> Sim | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> Não |
| Orientador(a): | | | |
| Coorientador(a): | | | |

Membros da Banca:

| | |
|-----------|--|
| 1º Membro | |
| 2º Membro | |
| 3º Membro | |
| 4º Membro | |
| 5º Membro | |

| | |
|-----------------|--|
| Data da Defesa: | |
| Titulação: | |

Título da Dissertação, Tese, TCC, Especialização ou Memorial Acadêmico no idioma original:

| |
|--|
| |
|--|

Palavras-chave no idioma original:

Título da Dissertação, Tese, TCC, Especialização ou Memorial Acadêmico em outro idioma (especifique):

Palavras-chave em outro idioma (especifique):

Programa de Defesa:

Área de conhecimento - CNPq:

3 Agência de Fomento:

4 Informação de acesso ao documento

| | | |
|---------------------------|-------|---------|
| Liberação para publicação | Total | Parcial |
|---------------------------|-------|---------|

Em caso de liberação parcial, especifique os arquivos restritos:

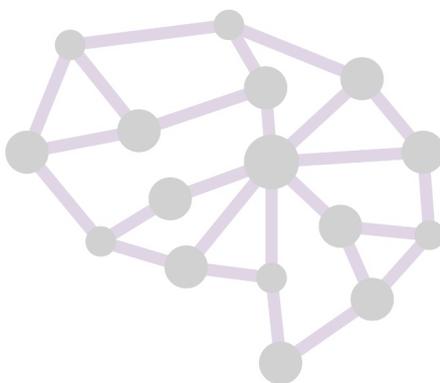
A restrição (parcial ou total) poderá ser mantida por até um ano a partir da data de autorização da publicação. A extensão deste prazo requer justificativa junto ao RIUFAL. O resumo e os metadados (elementos referenciais) ficarão sempre disponibilizados.

5 Endereço do Autor para contato:

| | | | |
|--------------------|----------------|-------------|--|
| Logradouro: | | | |
| Nº: | Compl.: | CEP: | |
| Cidade: | Estado: | | |
| Tel.(s): | | | |
| E-mail: | | | |
| Data: | | | |

Documento assinado digitalmente
gov.br THALYTA MORGANA DA COSTA SILVA
Data: 23/02/2024 14:25:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor



RIUFAL
Repositório Institucional da Ufal