

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LAURA GOMES RODRIGUES DOS SANTOS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR
DA CASCA DE EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus Labill*)**

**Bagé
2023**

LAURA GOMES RODRIGUES DOS SANTOS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR
DA CASCA DE EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus Labill*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida

**Bagé
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S399p Santos, Laura Gomes Rodrigues dos
Produção e caracterização de carvão ativado obtido a partir
da casca de eucalipto (*eucalyptus globulus labill*) / Laura
Gomes Rodrigues dos Santos.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2023.
"Orientação: André Ricardo Felkl de Almeida".

1. Adsorção. 2. Corante. 3. Cinética. 4. Fármacos. 5.
Resíduos Agrícolas. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

LAURA GOMES RODRIGUES DOS SANTOS

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR DA CASCA
DE EUCALIPTO (EUCALYPTUS GLOBULUS LABILL)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 13 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
Orientador
UNIPAMPA

Prof.^a Dr.^a Gabriela Silveira da Rosa
UNIPAMPA

Prof.^a Dr.^a Tânia Regina de Souza
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TANIA REGINA DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2023, às 12:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ANDRE RICARDO FELKL DE ALMEIDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2023, às 13:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GABRIELA SILVEIRA DA ROSA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/12/2023, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1336534** e o código CRC **6F92A697**.

Referência: Processo nº 23100.025883/2023-32 SEI nº 1336534

RESUMO

O eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*) trata-se de uma variedade de planta arbórea, amplamente cultivada no território brasileiro, essa espécie é responsável por originar uma considerável quantidade de resíduos após o processo de colheita, os quais se manifestam na forma de cascas, folhas e galhos. Tais resíduos demonstram a capacidade de servirem como insumo na elaboração de carvão ativado, empregado no procedimento de tratamento de efluentes. Dado o exposto, o presente trabalho apresentou como propósito central a produção de um carvão ativado, obtido a partir da casca de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), que foi empregado na adsorção do corante azul de metileno e dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco sódico. A casca de eucalipto recebeu tratamento químico por meio da impregnação com ácido fosfórico (H_3PO_4) e o carvão foi produzido através de pirólise da casca impregnada sob atmosfera inerte de nitrogênio a uma temperatura de $500^\circ C$. A casca e o adsorvente foram caracterizados em relação as suas propriedades físicas e físico-químicas. Ainda, a fim de avaliar a eficiência de remoção do carvão para o corante e os fármacos, experimentos de cinética de adsorção foram realizados. Observaram-se resultados consistentes com a literatura para a caracterização da casca de eucalipto. Após a produção de carvão, obteve-se um adsorvente que atendeu aos critérios para carvões ativados com d_p de 0,0403 mm. Análises de TGA e DRX indicaram degradação da hemicelulose e celulose após tratamento ácido. Os processos de adsorção para os compostos estudados mostraram características distintas. Foram estimadas eficiências de remoção de 95,98%, 72,50% e 88,31%, para o Azul de Metileno, Ibuprofeno e Diclofenaco Sódico, respectivamente. No caso do corante, o tempo necessário para atingir o equilíbrio foi de aproximadamente 120 min, revelando um processo que envolve tanto a transferência de massa por convecção quanto por difusão. No que diz respeito ao ibuprofeno, para atingir o equilíbrio de adsorção foram necessários cerca de 300 min, indicando um processo governado principalmente pela difusão. Quanto ao diclofenaco sódico, o equilíbrio de adsorção foi alcançado em apenas 50 min, caracterizando um processo majoritariamente convectivo. Com base nos estudos realizados, pode-se afirmar que o resíduo de eucalipto apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a produção de carvão ativado.

Palavras-chaves: Adsorção. Corante. Cinética. Fármacos. Resíduos Agrícolas.

ABSTRACT

Eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill) is a variety of tree plant, widely cultivated in Brazilian territory, this species is responsible for generating a considerable amount of waste after the harvesting process, which manifests itself in the form of bark, leaves and branches. Such waste demonstrates the ability to serve as input in the production of activated carbon, used in the effluent treatment procedure. Given the above, the present work presented as its central purpose the production of activated carbon, obtained from eucalyptus bark (*Eucalyptus globulus* Labill), which was used in the adsorption of methylene blue dye and the drugs ibuprofen and diclofenac sodium. The eucalyptus bark received chemical treatment through impregnation with phosphoric acid (H_3PO_4) and the charcoal was produced through pyrolysis of the impregnated bark under an inert nitrogen atmosphere at a temperature of 500°C. The shell and adsorbent were characterized in relation to their physical and physicochemical properties. Furthermore, in order to evaluate the carbon removal efficiency for the dye and drugs, adsorption kinetics experiments were carried out. Results consistent with the literature were observed for the characterization of eucalyptus bark. After charcoal production, an adsorbent was obtained that met the criteria for activated carbons with dp of 0.0403 mm. TGA and XRD analyzes indicated degradation of hemicellulose and cellulose after acid treatment. The adsorption processes for the studied compounds showed distinct characteristics. Removal efficiencies of 95.98%, 72.50% and 88.31% were estimated for Methylene Blue, Ibuprofen and Diclofenac Sodium, respectively. In the case of the dye, the time required to reach equilibrium was approximately 120 min, revealing a process that involves both convection and diffusion mass transfer. Regarding ibuprofen, it took about 300 min to reach adsorption equilibrium, indicating a process governed mainly by diffusion. As for diclofenac sodium, adsorption equilibrium was reached in just 50 min, characterizing a mostly convective process. Based on the studies carried out, it can be stated that eucalyptus residue presented satisfactory results regarding its use for the production of activated carbon.

Keywords: Adsorption. Dye. Kinetics. Drugs. Agricultural Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da área com plantios de eucalipto por estado, 2021	18
Figura 2 – Corte esquemático - Carvão comum (a) e Carvão ativado (b).....	20
Figura 3 – Fluxograma geral do processo de produção do carvão ativado	21
Figura 4 – Representação esquemática dos grupos superficiais nitrogenados e oxigenados que podem estar presentes na superfície dos carvões ativados	25
Figura 5 – Estrutura da molécula do corante azul de metileno	29
Figura 6 - Estrutura química das duas formas isoméricas de ibuprofeno.....	30
Figura 7 – Representação molecular do Diclofenaco Sódico.....	32
Figura 8 – Ilustração do processo de adsorção	34
Figura 9 – Etapas da cinética de adsorção	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos poros quanto ao diâmetro.....	24
Quadro 2 – Classificação, características e aplicações dos carvões ativados.....	24
Quadro 3 – Comparação entre os processos de ativação química e física	22
Quadro 4 – Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química	34
Quadro 5 – Processos que conduzem a cinética de adsorção	36
Quadro 6 – Modelos cinéticos comumente utilizados em processos de adsorção	37
Quadro 7 – Estado da arte para produção de carvão ativado obtido a partir de resíduos vegetais	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AINEs – Anti-inflamatórios não esteroidais

AOAC – Association of Official Analytical Chemists

ASTM – American Society for Testing and Materials

COEs – contaminantes orgânicos emergentes

DRX – Difração de Raio X

DS – Diclofenaco de Sódio

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA – estações de tratamento de água

ETE – estações de tratamento de esgoto

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico)

GHS – Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*

PFCCs – produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TGA – Termogravimetria

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

- C - Espessura da camada limite
- C_0 - Concentração inicial
- C_f - Concentração final
- C_F - Carbono fixo
- C_z - Teor cinzas
- d_p - Diâmetro de partícula
- E - Eficiência de remoção
- k_1 - Constante da velocidade de adsorção de pseudo-primeira ordem
- k_2 - Constante de velocidade de adsorção de pseudo-segunda ordem
- K_{di} - Constante de difusão intrapartícula
- m_{ad} - Massa de adsorvente
- M_v - Voláteis
- q_e - Quantidade de adsorvato adsorvido durante o momento do equilíbrio
- q_t - Capacidade de adsorção
- t - Tempo
- U_{bu} - Umidade
- V - Volume de solução
- α - Velocidade de adsorção inicial
- β - Quantidade de sítios apropriados
- ρ_b - Massa específica aparente
- ρ_r - Massa específica real
- ε - Porosidade do leito de partículas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Panorama da plantação de eucalipto	17
3.2 Resíduos de eucalipto	19
3.3 Carvão ativado e seu processo de produção.....	20
3.4 Contaminantes emergentes.....	27
3.4.1 Azul de metileno	28
3.4.2 Ibuprofeno.....	30
3.4.3 Diclofenaco	31
3.5 Adsorção	33
3.6 Cinética de adsorção.....	36
3.7 Estado da arte para produção de carvão ativado obtido a partir de resíduos vegetais	39
4 ARTIGO	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Caracterizado como um dos principais recursos madeireiros para atender às demandas da indústria brasileira, o gênero *Eucalyptus* destaca-se pela sua capacidade de adaptação em larga escala e pela sua versatilidade, sendo empregado extensivamente em uma variedade de aplicações (DUTRA, 2021). No território brasileiro, ao longo do ano de 2022, observou-se um aumento de 0,1% nas extensões de florestas cultivadas, representando um acréscimo de 8,1 mil hectares (IBGE, 2023). A área total destinada à silvicultura abrange 9,5 milhões de hectares, sendo que 77,3% correspondem a 7,3 milhões de hectares ocupados pelo eucalipto, sendo extensivamente empregado na indústria de celulose. De forma combinada, o eucalipto e o pinus tiveram uma influência expressiva, englobando 96,0% das áreas designadas para o cultivo de florestas plantadas visando fins comerciais no país. (IBGE, 2023). As regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil registraram um aumento de 0,4% e 5,5%, respectivamente, nas áreas destinadas ao cultivo de florestas plantadas em 2022. Enquanto isso, a região Sul, que contribui com 32,4% totalidade da área de plantio de eucalipto e pinus no país, registrou uma queda de 1,1%. (IBGE, 2023). Conforme delineado por Cerqueira *et al.* (2012) o eucalipto, em conjunto com o Pinus, destaca-se como a principal fonte de madeira para a geração de celulose. Uma parcela dessa produção resulta em resíduos, que frequentemente são empregados como fertilizantes e para a correção de solos. Os subprodutos provenientes do processamento da madeira podem ser categorizados com base em seu tamanho, incluindo pó, serragem, maravalha, cavacos e lenha. Esta última engloba os resíduos de maiores dimensões, como o topo da tora, lascas, costaneiras e cascas. (CERQUEIRA *et al.*, 2012). A empregabilidade desses resíduos com o intuito de gerar energia, produzir adubo orgânico, fabricar cerâmica e produzir carvão ativado são algumas das alternativas viáveis de reaproveitamento, conforme mencionado por Dutra (2021). O carvão ativado caracteriza-se como um material poroso e enriquecido em carbono, destacando-se por sua extensa área superficial e satisfatória capacidade de adsorção (CÂNDIDO, 2019). Devido a essas características, verifica-se sua extensa utilização em uma ampla variedade de aplicações, tanto ambientais quanto industriais, abrangendo domínios como catálise, processos de separação de gases, armazenamento de energia, procedimentos de purificação de água e ar, tratamento de efluentes, bem como em uma variedade de outros processos. (DUTRA, 2021).

A obtenção de carvão ativado pode ser alcançada por intermédio de processos físicos ou químicos. O método físico envolve a carbonização em uma atmosfera inerte sob emprego temperaturas aproximadas de 1000°C. Em contraste, o método químico é caracterizado por uma impregnação com um agente de ativação, sendo os principais agentes empregados o $ZnCl_2$,

H₃PO₄ e NaOH, com uma etapa subsequente de carbonização a temperaturas próximas a 600°C (DUTRA, 2021).

O carvão ativado pode ser gerado por intermédio de uma diversidade de matérias-primas, incluindo fontes minerais, animais ou vegetais. Em princípio, qualquer material orgânico enriquecido em carbono possui a capacidade potencial de ser submetido a conversão em carvão ativado (CÂNDIDO, 2019). Segundo Cândido (2019), no processo de seleção da matéria-prima precursora, são considerados critérios como o preço, a homogeneidade, a pureza, a extensão potencial da ativação e a consistência na disponibilidade. De acordo com Dutra (2021), uma solução viável para abordar essa problemática reside no emprego resíduos agroindustriais para obtenção de carvão ativado. Esses resíduos se destacam pelo considerável volume gerado e pela disposição inadequada em locais específicos. Esse produto é reconhecido de modo extensivo devido a capacidade de adsorver variadas substâncias que ele apresenta. Valencia (2007) afirma que a característica distintiva do carvão ativado reside em sua extensa superfície interna, situada na parte interna de uma rede de poros estreitos. Este ambiente é o principal local em que a maior parte do método de adsorção ocorre, e as dimensões e configurações dos poros exercem função crucial na seletividade da adsorção, influenciando-a por meio do efeito de “peneira molecular”.

A operação unitária de adsorção se caracteriza pelo contato entre um sólido e um fluido, onde reside o adsorvato, facilitando a transferência de massa da fase fluida para a superfície do material sólido, que é conhecido como adsorvente (GEANKOPLIS, 1998). Os materiais adsorventes desempenham um papel crucial nos procedimentos de adsorção, sendo amplamente empregados em diversas indústrias. No âmbito têxtil, sua aplicação é especialmente frequente no tratamento de efluentes coloridos, destacando-se por sua eficácia na eliminação de corantes sintéticos. Durante esse procedimento, ocorre a transferência dos corantes, que se situam no efluente aquoso, em direção a uma matriz sólida, representada pelo adsorvente. Conseqüentemente, é possível regenerar o adsorvente ou mantê-lo isolado do meio ambiente, proporcionando flexibilidade operacional e minimizando seu impacto ambiental (SILVA, 2019).

As atividades das indústrias têxteis resultam na produção significativa de efluentes contendo corantes artificiais que não aderem aos tecidos ao longo das fases de tingimento. Os corantes representam um desafio ambiental crucial nessas descargas, dado seu considerável potencial poluente, mesmo em concentrações reduzidas (SILVA, 2019). O corante azul de metileno é extensivamente empregado no ramo têxtil, pertencendo à categoria das fenotiazinas, caracterizada por seu grupo cromóforo, que inclui um anel que apresenta um átomo de

nitrogênio e átomo um de enxofre, além de duas estruturas de anéis aromáticos, cada um associado a um átomo de nitrogênio, o qual estabelece interações com dois grupos metila. Essa estrutura resulta em uma resistência ao longo das fases de biodegradação vinculados a esse corante (GHEDIN, 2022). Portanto, torna-se crucial realizar o tratamento adequado desses efluentes, visando a conservação de recursos hídricos, dada a sua resistência à biodegradação, teor de contaminantes orgânicos e inorgânicos e intensidade de cor (GHEDIN, 2022).

Em incontáveis países, assim como no Brasil, a prescrição médica para se adquirir anti-inflamatórios em farmácias não é solicitada (RAGASSI *et al.*, 2019). Somado a isso, a população global como um todo vem sendo alvo de mudanças em seu padrão de vida, razão que configura o aumento do consumo de fármacos (CARDOSO, 2020). Os maiores responsáveis pelo consumo (mais de 50%) de todos os medicamentos é a população idosa. Pelo menos 80% desta faixa etária é também apontada como consumidora de ao menos uma medicação diária, sendo que 75% não informa seus médicos a respeito do consumo não convencional (RAGASSI *et al.*, 2019). Segundo Cardoso (2020) uma considerável parte desses compostos denominados de contaminantes emergentes é introduzida no esgoto doméstico, gerando a intensificação de suas concentrações no esgoto bruto, bem como, sua identificação em corpos de água superficiais.

Tem se o conhecimento de que os métodos convencionais de tratamento de efluentes podem não ser totalmente eficazes no que diz respeito a eliminação de compostos orgânicos emergentes, contribuindo, dessa forma, para a poluição dos corpos de água. Esse desafio sublinha a importância de se desenvolver abordagens para lidar com a existência desses compostos emergentes nos efluentes, no objetivo de preservar a qualidade da água e mitigar os impactos ambientais (CARDOSO, 2020).

Dado o exposto, justifica-se este trabalho pela proposta de uma alternativa para os resíduos de eucalipto como matéria-prima utilizada na produção de um carvão ativado, destinado a eliminação do corante azul de metileno e dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco sódico via adsorção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi a produção e caracterização do carvão ativado obtido a partir da casca de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), com o intuito de empregá-lo como agente adsorvente no processo de adsorção do corante azul de metileno e dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco sódico.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Preparo e caracterização da casca de eucalipto quanto ao diâmetro de partícula (d_p), massa específica real (ρ_r) e aparente (ρ_b), porosidade do leito de partículas (ϵ), umidade (U_{bu}) e análise termogravimétrica (TGA);
- b) Tratamento da casca com ácido fosfórico 40% e produção do carvão ativado por meio de pirólise sob atmosfera inerte de nitrogênio a 500°C;
- c) Caracterização física e físico-química do carvão ativado por meio da determinação da massa específica real (ρ_r) e aparente (ρ_b), porosidade do leito de partículas (ϵ), diâmetro de partícula (d_p), teor de umidade (U_{bu}), análise imediata (em base seca) do teor cinzas (C_z), voláteis (M_v), carbono fixo (C_F), análise termogravimétrica (TGA) e fases cristalinas (DRX);
- d) Realização dos estudos de cinética de adsorção, por meio da adsorção do corante azul de metileno e dos fármacos ibuprofeno e diclofenaco sódico, análise da eficiência de remoção (E) para os contaminantes e ajuste a modelos previstos na literatura;
- e) Compilar os resultados em artigo científico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Panorama da plantação de eucalipto

Conforme o delineado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (2019), o gênero *Eucalyptus* é uma espécie nativa da Oceania, em particular da Tasmânia, Austrália, bem como de outras ilhas desse continente e não têm histórico documentado de introdução no Brasil. No entanto, há registros que indicam o plantio dessa espécie no território brasileiro em diferentes locais e períodos. Alguns desses registros expressão que no decorrer dos anos de 1825 a 1868 foram feitos plantios nos arredores do Museu Nacional e do Jardim Botânico do Rio de Janeiro, também foram plantados no estado de São Paulo, na cidade de Amparo entre 1861 e 1863, e no Rio Grande do Sul no ano 1868. Apesar desses relatos, a primeira plantação efetiva ocorreu em 1868, sob a responsabilidade do governador Joaquim Francisco de Assis Brasil, no estado do Rio Grande do Sul (EMBRAPA, 2019).

Estima-se que botanicamente existem aproximadamente 730 espécies reconhecidas, sendo cerca de 20 delas empregadas para fins comerciais no mundo todo, na atualidade. Estas espécies apresentam variadas propriedades físicas e químicas, fator responsável pela vasta empregabilidade do eucalipto para amplas finalidades a exemplo da geração de energia, laminação, celulose e papel, produção de medicamentos, serraria, cosméticos, tecidos e alimentos (EMBRAPA, 2019).

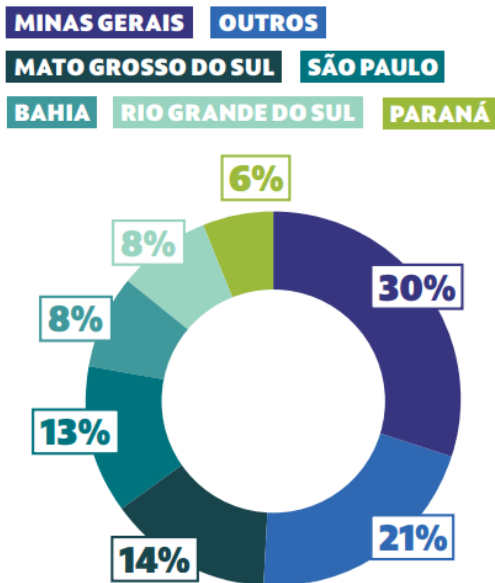
Conforme descreve a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (2022), em 2021, a extensão total de áreas destinadas ao plantio de árvores alcançou 9,93 milhões de hectares, fato que indica um aumento de 1,9% quando comparado com os dados do ano anterior, os quais apontavam 9,75 milhões de hectares. Dentre as espécies cultivadas, 75,8% da área corresponde ao plantio de eucalipto, totalizando 7,53 milhões de hectares, e o pinus contribui com 19,4%, alcançando o valor aproximado de 1,93 milhão de hectares. Somado a essas variedades, há cerca de 475 mil hectares dedicados ao plantio de outras espécies, incluindo seringueira, teca, acácia e paricá. (IBÁ, 2022). Em 2021, o eucalipto atingiu seu pico de produtividade desde 2014, alcançando 38,9 m³/ha/ano ao longo de 2021. No caso do pinus, o valor registrado foi de 29,7 m³/ha/ano. Destaca-se que esses números superam as médias globais (IBÁ, 2022).

O setor de árvores plantadas desempenha um papel bastante importante no que se refere a dinamização da economia local. A prática do cultivo de florestas para finalidades industriais em mais de 1 mil municípios em todo o Brasil, predominantemente em áreas mais afastadas dos grandes centros urbanos, vem intensificando o desenvolvimento regional, de modo que o

Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos municípios onde o setor atua é superior à média dos estados.

A Figura 1 expõe a distribuição da área com plantios de eucalipto por estado no ano de 2021.

Figura 1 – Distribuição da área com plantios de eucalipto por estado, 2021



Fonte: Ibá (2022).

De modo geral, espécies de eucalipto exibem um crescimento acelerado, demonstram uma ótima capacidade de adaptação a diversas regiões e oferecem uma vasta possibilidade de empregos para a sua madeira, resultando em um considerável potencial econômico (EMBRAPA, 2019). Essas características conferem ao eucalipto um status preferencial no que se refere a sua utilização, dada a sua intensa produtividade de madeira, que exibe uma média nacional de 38,9 m³ por hectare, com ciclos de corte de cerca de 7 anos. A combinação dessa alta produtividade com custos reduzidos e elevadas taxas de retorno de investimento posiciona o cultivo de eucalipto como altamente atrativo. Essa dinâmica contribui para a significativa competitividade dos produtos derivados da madeira tanto nos mercados domésticos quanto nos internacionais (EMBRAPA, 2019).

É válido reconhecer que, em paralelo ao sucesso econômico dessa prática, a geração de resíduos gerados na etapa de manejo e processamento do eucalipto também é uma consideração de significativa relevância (FAGUNDES, 2003).

3.2 Resíduos de eucalipto

As alterações climáticas resultantes da extração excessiva e inadequada de recursos de fontes naturais e de práticas de desmatamento, têm exercido pressões em âmbitos político, ambiental, social e econômico. Essa situação tem gerado uma considerável preocupação no que diz respeito a mitigar os efeitos derivados desses problemas, bem como em explorar maneiras de aproveitar os subprodutos, a exemplo dos resíduos gerados nas florestas. (FIGUEIREDO, 2022).

O manejo de resíduos sólidos compreende várias práticas, como sua reutilização, compostagem, reciclagem, recuperação e aproveitamento energético, além de outras destinações permitidas pelos órgãos ambientais. Isso inclui a disposição final que deve obedecer às normas operacionais a fim de contornar riscos ou danos à saúde pública, reduzir os impactos ambientais adversos e garantir a segurança (PGRS, 2017).

A priorização de práticas ecologicamente sustentáveis é uma meta central, com o objetivo não só de aprimorar a eficiência, mas também de diminuir os custos. Dentro dessa perspectiva, a valorização de subprodutos se revela como um elemento crucial para se alcançar esses objetivos (LANA, 2014). A busca por fontes de energia sustentáveis tem representado motivador impulso para o avanço de diversas investigações no campo energético (SILVA *et al.*, 2019). A integração histórica da madeira como uma fonte de energia no contexto brasileiro encontra-se profundamente entrelaçada com a produção de carvão vegetal, sendo impulsionada pela crescente demanda desse insumo por parte do setor siderúrgico (SANTOS *et al.*, 2011). O Eucalipto e o Pinus revelam-se as principais fontes de madeira para a indústria brasileira, especialmente na produção de celulose. Realizados os processamentos da madeira, os resíduos resultantes podem ser categorizados com base em seu tamanho, incluindo pó, serragem, maravalha, cavacos e lenha. A lenha engloba os resíduos de maiores dimensões, como o topo da tora, lascas, costaneiras e cascas (CERQUEIRA *et al.*, 2012).

Os resíduos provenientes do eucalipto possuem potencial para serem convertidos em energia através da produção de etanol. Ademais, a biomassa do eucalipto apresenta a possibilidade de ser usada para a fabricação de carvão (FIGUEIREDO, 2022). Cerca de uma tonelada de resíduo de casca de eucalipto, originária da indústria de papel e celulose, tem capacidade de gerar 200 kg de açúcares, que são capazes de produzir cerca de 100 L de etanol. Os açúcares obtidos nesse processo incluem glicose, frutose e sacarose. Quando as cascas se encontram em estado fresco, conservam aproximadamente 20% desses açúcares ainda presentes na forma solúvel, viabilizando seu potencial para produzir etanol. (FIGUEIREDO, 2022).

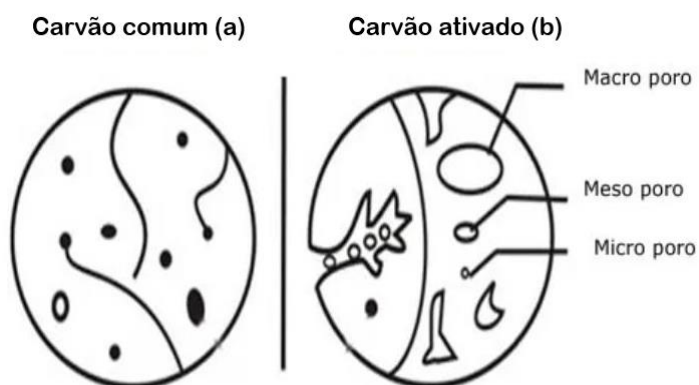
De acordo com Figueiredo (2022), pesquisas em curso exploram a aplicabilidade de resíduos provenientes do eucalipto na síntese de grafeno, destacado como o material mais fino, resistente e flexível identificado até o momento. Este composto exhibe possíveis usos em setores como eletrônicos flexíveis, processadores computacionais mais avançados, painéis solares de maior eficiência, biossensores e sistemas de filtragem de água.

Os resíduos do eucalipto, como ponteiros, galhos e serragem, têm potencial para serem utilizados na fabricação de carvão ativado, por conta da sua rica composição em carbono, alto teor de celulose, disponibilidade e crescimento rápido da planta desempenhando um papel de potencial matéria-prima. Embora a quantidade desses resíduos possa não ser significativa em termos volumétricos, é suficiente para representar fonte de renda viável para pequenos produtores locais (FIGUEIREDO, 2022).

3.3 Carvão ativado e seu processo de produção

O carvão ativado é reconhecido como um composto carbonáceo poroso, caracterizado por conter uma proporção reduzida de heteroátomos, sobretudo oxigênio, ligados à estrutura de carbono. Sua notável área superficial específica e uma porosidade significativamente desenvolvida conferem a esse material a habilidade de adsorver moléculas, presentes em fase líquida ou em fase gasosa (GORGULHO *et al.*, 2008). A Figura 2 ilustra um corte esquemático do carvão comum e do carvão ativado.

Figura 2 – Corte esquemático - Carvão comum (a) e Carvão ativado (b)



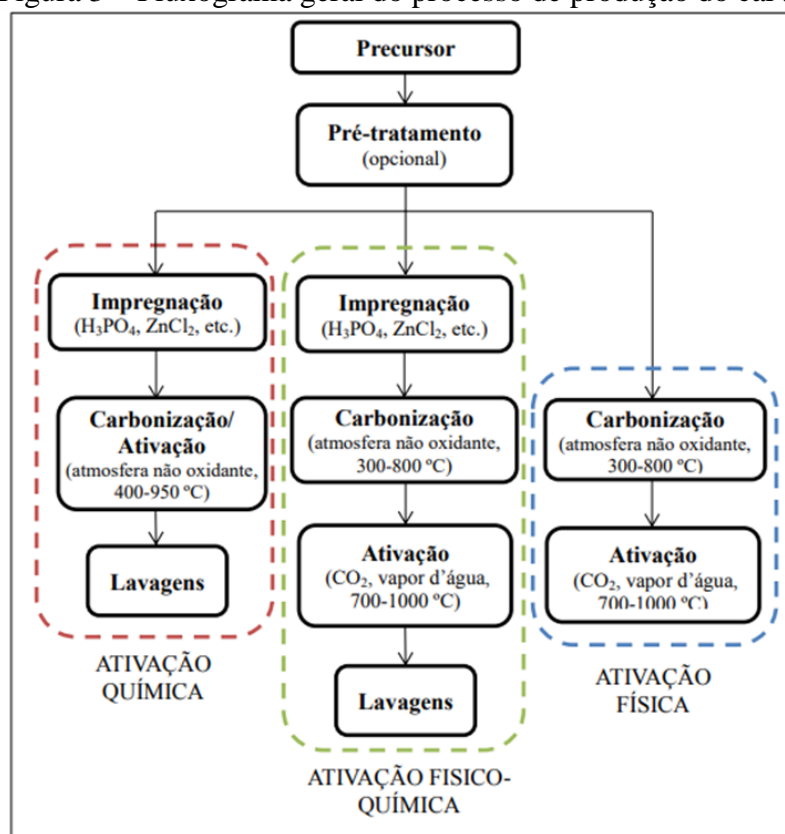
Fonte: Adaptado de Clark (2010)

O carvão ativado exhibe uma boa eficácia ao interagir com uma variedade extensa de materiais, adsorvendo moléculas de diversos tamanhos sem afetar a estrutura do substrato. Essas propriedades atribuem-lhe uma importância significativa no contexto do tratamento

adequado de resíduos líquidos (DE SALES *et al.*, 2015). Diversos materiais que contêm uma concentração elevada de carbono têm a capacidade de ser transformados em carvão ativado, incluindo, mas não se limitando a ossos de animais, madeira, resíduos minerais, resíduos vegetais, e petróleo. (SCHNEIDER, 2008).

A fabricação de carvão ativado pode ou não envolver uma fase de pré-tratamento, que engloba procedimentos como lavagem, secagem ao sol ou em forno, trituração, moagem e peneiramento do material precursor (CÂNDIDO, 2019). As etapas gerais do processo de produção do carvão ativado são expostas na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma geral do processo de produção do carvão ativado



Fonte: Cândido (2019)

Pode-se realizar a ativação do carvão através de procedimentos físicos ou químicos, seguida pela fase de carbonização. O propósito dos métodos de ativação é produzir um carvão microporoso, removendo componentes orgânicos como creosoto, alcatrão, naftas, bem como resíduos que aprestem potencial de obstruir os poros existentes nele. As técnicas de ativação resultam na criação de locais eletricamente insaturados, apresentando uma notável capacidade adsorvente (ROCHA *et al.*, 2012).

A ativação física constitui um método que é caracterizado pelo desenvolvimento de uma estrutura porosa, ampliando sua área superficial mediante um processo de tratamento térmico. Esse tratamento ocorre em temperaturas situadas na faixa de entre 700 e 1000°C, sob a influência de um gás oxidante adequado. Esse gás pode variar, podendo ser CO₂, vapor de água ou ar atmosférico, de modo que podem ser utilizados de maneira isolada ou combinada. Essa abordagem é muito usada na indústria e comumente utilizada para a produção em larga escala de carvões ativados. Essa preferência decorre de sua simplicidade intrínseca e da habilidade de gerar carvões ativados que apresentam uma boa microporosidade e resistência física substancial. (SILVA, 2019).

Ocorre durante a ativação química a mistura do precursor com os agentes ativadores, que podem ser ácido fosfórico, hidróxido de sódio, cloreto de zinco, ou carbonato de potássio e que operam como agentes oxidantes e de desidratação e posteriormente, é realizada a carbonização sob atmosfera inerte, por meio de temperaturas que podem variar na faixa de 400 a 900 °C. As vantagens do método são ser conduzido em uma etapa única, o uso de temperaturas mais baixas e tempos de ativação reduzidos e de levar a um elevado rendimento. A ativação química, no entanto, apresenta um complexo processo de reciclagem e recuperação e ativador e ocasiona o descarte dos líquidos, muitas vezes no meio ambiente, demandando o tratamento dos efluentes (SILVA, 2019). O Quadro 1 expõe um comparativo entre características das ativações química e física.

Quadro 1 – Comparação entre os processos de ativação química e física (Continua)

Características das ativações	Química	Física
Densidade de empacotamento	Maior	Menor
Rendimento	Maior	Menor
Tempo de ativação	Menor	Maior
Temperatura de ativação	Menor	Maior
Consumo energético	Menor	Maior
Resistência mecânica	Maior	Menor
Homogeneidade dos poros	Menor	Maior

Quadro 1 – Comparação entre os processos de ativação química e física (Conclusão)

Custo do agente ativante	Maior	Menor
Uso de reagentes químicos	Sim	Não
Necessidade de uma etapa adicional de lavagem	Sim	Não
Geração de efluentes líquidos (lavagens)	Sim	Não

Fonte: Cândido (2019)

Segundo Cândido (2019), os dois processos de ativação exibem vantagens e desvantagens. A ativação química tende a resultar em maior densidade de empacotamento devido à formação de produtos químicos mais densos, rendimento superior em porosidade e área superficial, tempo de ativação mais curto e pode ser mais eficiente em termos de consumo energético, especialmente se as reações forem exotérmicas. Já a ativação física, resulta em menor densidade, pode demandar mais energia, principalmente se altas temperaturas forem necessárias e ser mais econômica em termos de reagentes químicos, visto que, geralmente requer menos reagentes químicos, o que pode reduzir os custos. A escolha entre os métodos depende das características desejadas e das condições específicas de aplicação.

Conforme mencionado por Cândido (2019), é possível realizar a associação dos dois métodos de ativação, de modo que através da ativação química é viável obter materiais que apresentam uma porosidade bem desenvolvida, sendo esta compatível com uma massa específica aparente relativamente elevada. Essa ocorrência se deve ao fato de que a aplicação de quantidades reduzidas de H_3PO_4 ou $ZnCl_2$ resulta na formação de uma microporosidade estreita incipiente, sem provocar uma redução significativa da massa específica aparente em comparação com a amostra carbonizada na ausência de produtos químicos e a subsequente ativação física viabiliza o desenvolvimento apropriado da estrutura de poros primária originada pelo produto químico (CÂNDIDO, 2019). As características e propriedades do carvão ativado são dependentes de alguns fatores como a matéria-prima, o tempo de ativação e o processo. Também é imprescindível considerar a estrutura química, tendo em vista a capacidade dela de afetar a interação com adsorvatos apolares e polares (SILVA, 2019).

A habilidade de adsorção do carvão ativado é intimamente relacionada a diversos elementos, tais como o material de origem, a área superficial, a porosidade, a quantidade de grupos funcionais, além de variáveis experimentais como pH, temperatura, tempo, presença de contaminantes e agitação (ARAÚJO; GUIOTOKU, 2018). Uma das características mais cruciais do carvão ativado é o tamanho de seus poros, que segundo o delineado pela

International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), variam de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação dos poros quanto ao diâmetro

Tipo	Diâmetro médio	Utilização
Macroporo	$d > 50 \text{ nm}$	Servem de condutos de passagem para o interior do adsorvente.
Mesoporo	$50 > d > 2 \text{ nm}$	Responsável pela elevada área superficial e pela adsorção de moléculas grandes como corantes.
Microporo	$2 \text{ nm} > d$	Responsável pela elevada área superficial e pela adsorção de moléculas pequenas como de fármacos ou na adsorção sólido-gás.

Fonte: Adaptado de Everett (1972)

A categorização dos carvões ativados ocorre de três maneiras: granular, fibrosa e em pó, de modo que a diferenciação acontece conforme a configuração e dimensão dos poros, sendo cada variante designada para aplicações particulares (SRINIVASAKANNAN; ABU, 2004). O Quadro 3, apresenta as principais classificações do carvão ativado, bem como suas características e possíveis aplicações.

Quadro 3 – Classificação, características e aplicações dos carvões ativados (Continua)

Classificação	Características	Aplicações	Tamanho do poro
Granular	Considerado o melhor adsorvente para a eliminação de compostos	Eliminação dos subprodutos derivados da desinfecção, compostos aromáticos e poliaromáticos, pesticidas, herbicidas, detergentes e matéria orgânica natural que é a causadora da cor, odor e sabor.	0,6 a 4 mm

Quadro 3 – Classificação, características e aplicações dos carvões ativados (Conclusão)

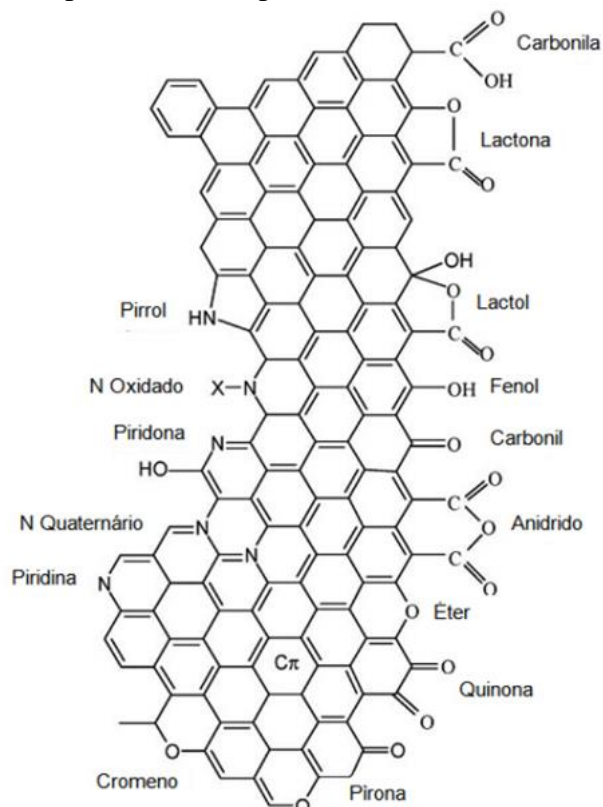
Pó	Apresenta velocidades de adsorção mais rápidas devido ao menor tamanho do poro	Aditivos em batelada, na separação e concentração de produtos em áreas como alimentação, produtos farmacêuticos, químicos, petróleo, energia nuclear e indústrias automotivas	44 μm
----	--	---	------------------

Fonte: Adaptado de Cavalcante (2015)

A capacidade de adsorção do carvão ativado é impactada não apenas pela área superficial e pela porosidade, como também pela existência de grupos funcionais, que se situam nas bordas e nos vértices da base gráfrica que constitui o material, os quais introduzem uma considerável diferença de eletronegatividade (GORGULHO *et al.*, 2006)

É possível que grupos funcionais se originem como vestígios do material precursor, seja durante a etapa de ativação ou pela retenção de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio assim que entram em contato com a atmosfera (SIMÕES, 2023). A Figura 4 expõe os grupos funcionais que podem estar presentes na superfície dos carvões ativados.

Figura 4 – Representação esquemática dos grupos superficiais nitrogenados e oxigenados que podem estar presentes na superfície dos carvões ativados



Fonte: Figueiredo e Pereira (2010)

Nesta molécula, o oxigênio desempenha um papel fundamental, sendo observado nos grupos funcionais hidroxila, carbonila, carboxila e enóis. Tais grupos superficiais apresentam influência sobre a reatividade e sobre propriedades de adsorção inerentes ao material (GUILARDUCI *et al.*, 2006). Em virtude da elevada eletronegatividade e reatividade do átomo de oxigênio, os grupos funcionais associados a esse átomo desempenham um papel preponderante no fenômeno da adsorção, principalmente em relação a adsorvatos de natureza polar presentes em soluções aquosas. Eles exercem influência sobre diversas características superficiais, tais como polaridade, molhabilidade e acidez, além de afetar propriedades físicas e outras propriedades químicas. A identificação desses grupos pode ser realizada por meio de análises espectroscópicas químicas e físicas (PEGO, 2016). De acordo com Guillarduci *et al.* (2006), em carvões ativados a adsorção dos compostos orgânicos é majoritariamente controlada por meio de interações químicas e físicas, em que no processo, os microporos e as propriedades ácido-base inerentes à superfície do material desempenham função fundamental no mecanismo. Na adsorção envolvendo compostos fenólicos em carvão ativado interações fenol-carvão controlam a adsorção através de ligações π - π , da formação de complexo doador-receptor, bem como das propriedades ácido-base do adsorvente e sua porosidade (GUILARDUCI *et al.*, 2006).

O carvão ativado é amplamente reconhecido como um adsorvente versátil com variadas possibilidades de emprego, as quais abrangem o tratamento de água, o processo de clarificação de produtos, a purificação de gases, a indústria de bebidas, a extração de metais, aplicações medicinais, análises laboratoriais e o tratamento de efluentes, destacando-se como uma ferramenta valiosa em diversas áreas (HEYLMANN *et al.*, 2021)

Pode-se citar como área de potencial utilização do carvão ativado a indústria de têxtil, na qual esse desempenha um papel fundamental, visto que, ele desempenha capacidade de adsorver impurezas e pigmentos indesejados e isso o torna um componente essencial no processo de remoção de contaminantes e na purificação. Neste ramo da indústria, o carvão ativado pode ser empregado, por exemplo, na recuperação e regeneração de solventes e na eliminação de resíduos tóxicos, contribuindo para a promoção da sustentabilidade e a eficiência ambiental das operações de tingimento e coloração (HEYLMANN *et al.*, 2021).

Outra possível aplicação do carvão ativado é na remoção de contaminantes emergentes de corpos hídricos, considerando a sua capacidade de adsorver uma diversidade de compostos detectáveis nesses ambientes. Sua superfície rugosa e fissurada proporciona um local propício para a adsorção eficiente de substâncias presentes na água, abrangendo desde produtos farmacêuticos a pesticidas e resíduos de produtos de cuidados pessoais. Este processo recebe

destaque como uma estratégia viável durante o tratamento de água, contribuindo expressivamente para a redução da presença de contaminantes emergentes nos recursos aquáticos (CARDOSO, 2020).

3.4 Contaminantes emergentes

Segundo Cornélio (2023), substâncias que demonstram potenciais riscos para a flora e fauna aquática são denominadas contaminantes emergentes. Esses compostos impactam negativamente a qualidade tanto da água quanto do solo e podem ser originados de maneira antrópica, sendo resultado de atividades domésticas, industriais, hospitalares e/ou agropecuárias, ou de maneira natural, como cianotoxinas. Gerações futuras podem ser impactadas por meio da exposição crônica e cumulativa em ambientes aquáticos, afetando a vida aquática, as atividades de lazer, a disponibilidade de água para animais e a saúde humana. São reconhecidos diversos tipos de contaminantes emergentes, sendo os corantes e fármacos alvo de destaque entre eles, em função de suas características específicas e do impacto que podem ter no meio ambiente.

A indústria têxtil, historicamente, desempenhou um papel de destaque na Primeira Revolução Industrial e continua a ser uma força influente nas economias globais (CARIO; FERNANDES, 2011). Dentre a série de desafios significativos enfrentados pela indústria têxtil figura a gestão eficiente de efluentes. O processo produtivo têxtil geralmente envolve o emprego deliberado de água, produtos químicos e corantes, resultando em efluentes complexos e poluídos (RUTZ, 2007). A grande demanda por água e produtos químicos na indústria têxtil, principalmente durante as etapas de tingimento e acabamento, a torna fonte de geração extensiva de efluentes líquidos, de modo que a produção de 1 kg de tecido exige aproximadamente 80 L de água. Dessas quantidades, estima-se que 88% sejam descartados como efluentes, enquanto os 12% restantes são perdidos devido à evaporação (RUTZ, 2007). A inquietação global gerada pela contaminação hídrica decorrente da presença diversificada de corantes, tais como o azul de metileno, por exemplo, tem aumentado significativamente. Portanto, a busca pela diminuição do volume desses efluentes, o reuso da água e a recuperação dos produtos químicos, sem consequências danosas para a qualidade do produto, representam objetivos essenciais para a indústria têxtil (SILVA, 2019).

Uma fonte de contaminação aquática são os chamados “ingredientes ativos dos fármacos”, intitulados pela indústria farmacêutica como compostos ativos que apresentam resistência à degradação, sendo persistentes em cursos de água, com potencial para causar

efeitos adversos em organismos presentes na água e em humanos, quando expostos de forma inadequada (TONUCCI, 2014). A considerável gama de classes, propriedades químicas, funcionalidades e estruturas que os ingredientes ativos dos fármacos apresentam, aliada às reações metabólicas predominantes no fígado, são responsáveis pela apreensão acerca desses microcontaminantes. Essas reações resultam na formação de metabólitos que, em alguns casos, demonstram ser igualmente ou mais tóxicos quando comparados a forma original do composto (TONUCCI, 2014). Mundialmente, os compostos orgânicos de maior utilização são os fármacos, apresentando muitos efeitos benéficos para seus consumidores. Entretanto, práticas veterinárias e industriais aliadas ao grande consumo humano, fazem destes compostos agentes de contaminação de águas subterrâneas e superficiais (TONUCCI, 2014). Diversas categorias de fármacos, tais como antibióticos, anti-inflamatórios, analgésicos, antilipêmicos, anticonvulsivos e hormônios, têm sido rotineiramente identificadas em concentrações que variam de ng L^{-1} a $\mu\text{g L}^{-1}$. Essas substâncias são frequentemente detectadas em efluentes oriundo de estações de tratamento de esgoto (ETE), em corpos d'água superficiais e subterrâneos, bem como nos efluentes provenientes de estações de tratamento de água (ETA). Devido a isso, a atenção de especialistas tem sido voltada para a presença de fármacos em ambiente aquoso, de modo que, em água, a presença destes compostos constitui um risco emergente, sobretudo para a biota aquática, devido à capacidade dessas substâncias em causar efeitos adversos em diversos organismos, mesmo em concentrações muito baixas (TONUCCI, 2014).

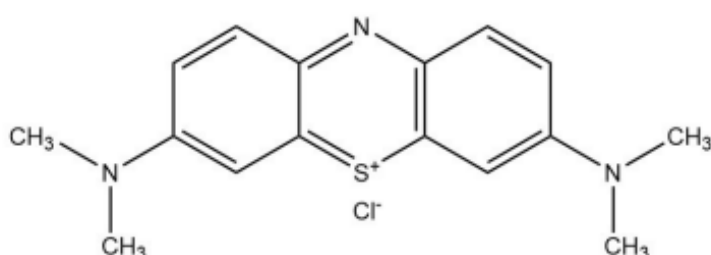
3.4.1 Azul de metileno

Corantes constituem-se como compostos orgânicos capazes de conferir coloração a diversos substratos, sendo amplamente empregados em produtos derivados do petróleo, desempenhando função como aditivos, além de serem utilizados nas indústrias têxtil, gráfica, fotográfica, farmacêutica, cosmética e alimentícia (SILVA, 2019). A gestão dos corantes no setor têxtil constitui um desafio, notado no caso do azul de metileno (AM), que é um dos corantes mais utilizados para tingimento e alteração de cores (SANTOS *et al.*, 2023).

O azul de metileno, cientificamente denominado de cloreto de tetrametilitionina ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$), representa um composto heterocíclico aromático com uma massa molecular de 373,92 g/mol e é um sólido que é caracterizado por apresentar considerável solubilidade em água e etanol, resultando em uma solução azul ao ser dissolvido (SILVA, 2019). É uma substância pouco tóxica, que apresenta capacidade de absorver consideravelmente pela região

do UV-visível ($\lambda_{\text{máx}} = 664\text{nm}$ em água) (SOUZA, 2018). Esta substância demonstra uma propensão para criar agentes agregadores, modificando a eficiência da fotossensibilização, reduzindo a produção de oxigênio singlete na presença de estímulo luminoso. Para atenuar esse fenômeno, é possível introduzir substituintes na estrutura, os quais podem apresentar cargas positivas ou cargas negativas. Fenômeno que acontece em função da repulsão eletrostática, resultando no incremento da hidrofiliicidade do corante, isto é, na sua afinidade com água (SOUZA, 2018). A Figura 5 apresenta a estrutura da molécula do corante azul de metileno.

Figura 5 – Estrutura da molécula do corante azul de metileno



Fonte: Ghedin (2022)

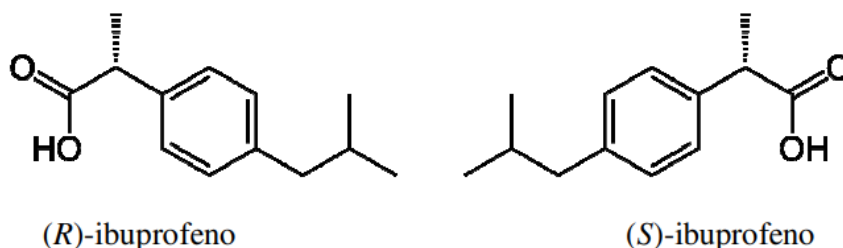
O emprego do azul de metileno acontece por meio de soluções aquosas, processo este que requer volumes significativos de água durante sua aplicação, resultando em consideráveis quantidades de efluentes. Essas águas residuais, frequentemente descartadas sem tratamento adequado, representam uma ação prejudicial ao ecossistema devido às propriedades tóxicas, mutagênicas e cancerígenas do corante (SANTOS *et al.*, 2023). A necessidade de cumprir normas ambientais torna imperativo que as indústrias do ramo têxtil desenvolvam estratégias para tratar efluentes antes que estes sejam encaminhados para o descarte no meio ambiente (ALMEIDA, 2006). A definição precisa e eficaz de sistemas de tratamento de efluentes é um fator de grande importância para minimizar os impactos ambientais adversos associados à indústria têxtil, isso garante não só a sustentabilidade, como também e a conformidade regulatória. (UNIVASF, 2018). Figuras entre os meios de tratamento de efluentes na indústria do ramo têxtil o emprego da técnica de adsorção, um processo no qual substâncias poluentes presentes nos efluentes são removidas eficazmente ao serem adsorvidas por materiais adsorventes (IMMICH, 2006). No contexto têxtil, a adsorção emerge como uma solução promissora, em que materiais adsorventes, a exemplo do carvão ativado, das zeólitas e resinas, têm demonstrado eficácia na remoção seletiva de compostos indesejados (ALMEIDA *et al.*, 2016).

3.4.2 Ibuprofeno

Anti-inflamatórios não esteroidais (AINEs) são fármacos que se distinguem dos corticoides, que apesar de também apresentarem atividade anti-inflamatória possuem mecanismo de ação e toxicidade diferentes. Eles operam inibindo ou atenuando o transporte de células do sistema imunológico para a região lesada, resultando na diminuição dos sintomas inflamatórios, como rubor, dor e calor. São inclusos nos princípios ativos na maioria desses tipos de fármacos o ácido acetilsalicílico, a dipirona sódica e o ibuprofeno (CORNELIO, 2023).

O ibuprofeno é o terceiro medicamento mais usado no planeta, integrando também a categoria de produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais (PFCCs), uma subclasse dos contaminantes orgânicos emergentes (COEs). Os PFCCs são compostos que se degradam tanto em corpos aquáticos, quanto no meio ambiente, sendo caracterizados por serem bioativos de alta toxicidade (SANTOS, 2023). Efluentes farmacêuticos, veterinários e hospitalares são responsáveis pela liberação do ibuprofeno na natureza. Essa liberação acontece por meio da rede de esgoto e do descarte incorreto, acarretando impactos ecotoxicológicos de grande severidade. O Ibuprofeno é um sólido incolor, cristalino e de odor característico, comumente usado no tratamento de febre, dores musculares e inflamações (SANTOS, 2023). O fármaco em questão foi sintetizado pela primeira vez no Reino Unido, no ano de 1961 e comercializado em 1969, de modo que, em 1983 teve sua utilização expandida logo que as farmácias iniciaram sua venda sem a solicitação de receita (CORNÉLIO, 2023). Segundo a IUPAC sua nomenclatura é ácido (2*RS*)-2-[4-(2- metil propil)fenil]propanóico, indicando que este composto possui um estereocentro no carbono 2, conforme observado na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura química das duas formas isoméricas de ibuprofeno.



Fonte: Seabra (2015)

Segundo Cornélio (2023), o enantiômero S do Ibuprofeno exibe propriedades anti-inflamatórias, antipiréticas e analgésicas, ao passo que o R-ibuprofeno é inativo. Apesar disso, como consequência dos custos de produção, o produto comercializado consiste em uma mistura racêmica dos estereoisômeros e a existência da enzima isomerase 2-aril propionil-CoA

epimerase no organismo humano possibilita a conversão de 50% a 60% do R-(-) ibuprofeno para o enantiômero S-(+)-ibuprofeno.

Conforme Cornélio (2023), a Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ), classifica o Ibuprofeno 50 no Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) como prejudicial para o ambiente aquático, de efeito agudo, categorizado como classe 3. Tais informações evidenciam o possível prejuízo ambiental decorrente da liberação não regulamentada deste fármaco em corpos d'água. No entanto, as regulamentações brasileiras, tanto na Resolução Conama 357/2005 (BRASIL, 2005), que aborda os estabelecidos limites de detecção de substâncias para o controle de efluentes líquidos depois do tratamento de esgoto, quanto na Portaria de Consolidação Nº 888 / 2021 (BRASIL, 2021), que estipula critérios para a potabilidade da água, não incluem disposições para a normalização de quantidades específicas para o Ibuprofeno (CORNÉLIO, 2023).

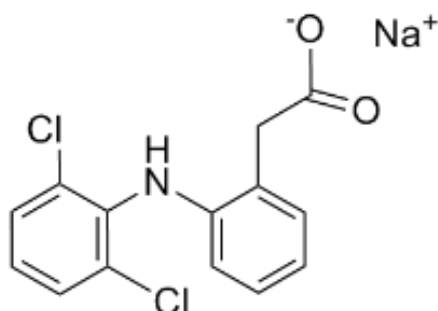
Além do ibuprofeno, o diclofenaco também foi bastante reportado em estudos que abordam a existência de fármacos em estações de tratamento de esgotos e corpos aquáticos (KRAMER *et al.*, 2015; QUEIROZ, 2018; RAGASSI *et al.*, 2019; SILVA, 2018). Além deles, também devem ser considerados seus metabólitos e derivados, apesar da dificuldade de detecção quando em misturas contendo centenas de moléculas distintas. Portanto, é crucial implementar de maneira eficaz medidas para a remoção desses contaminantes em ambientes aquáticos (BORRELY, 2012).

3.4.3 Diclofenaco

O Diclofenaco de Sódio (DS) é um fármaco anti-inflamatório não esteroide do ácido benzoacético, cuja nomenclatura IUPAC é 2-[2-(2,6-dicloroanilino)fenil]ácido acético e é usado para a redução de inflamações e alívio de dores nociceptivas. O fato deste medicamento apresentar atividades analgésicas, antipiréticas e inibidoras de plaquetas é fator determinante para recomendação do seu emprego no tratamento de doenças crônicas reumáticas, traumas físicos, febre e inflamações. A inibição da produção do muco responsável pela proteção do estômago é um efeito colateral que pode ser ocasionado pelo uso do diclofenaco sódico e tem como consequência uma potencialização do risco de ocorrência de úlcera gastrointestinal, (SILVA, 2023), além de danos renais e cardiovasculares também terem sido relatados (PINHEIRO, 2021) e por essa razão, o uso do medicamento deve ser feito de acordo com prescrição médica (SILVA, 2023).

Segundo Pinheiro (2021), o diclofenaco sódico é um ácido monocarboxílico, que apresenta fórmula molecular $C_{14}H_{11}Cl_2NO_2$, cuja estrutura é exposta na Figura 7, apresentando ácido fenilacético, com um grupo (2,6 dicloro-fenil) amino na posição 2. Sua massa molecular é 296,2 g/mol, com coeficiente de partição igual a 13,4 indicando solubilidade parcial tanto em meio aquoso, quanto em meio hidrofóbico.

Figura 7 – Representação molecular do Diclofenaco Sódico



Fonte: Pinheiro (2021)

Segundo a FISQP, o fármaco diclofenaco possui potencial toxicidade ambiental e não pode ser eliminado na rede de esgoto, em corpos de água ou no solo. É esperado que a água seja responsável pela pronta degradação do produto quando submetida a seu contato, no entanto, a presença em concentrações elevadas pode resultar em efeitos tóxicos para a vida aquática.

A composição química deste produto consiste em uma solução injetável composta por diclofenaco de sódio, álcool benzílico, hidróxido de sódio e ainda algumas outras substâncias inertes não perigosas. A prevenção de potenciais impactos ambientais relacionados a essas substâncias inclui evitar a introdução do produto em corpos d'água e na rede de esgotos, visando mitigar o risco de poluição (SILVA, 2023).

Dada a crucial importância da eliminação de contaminantes emergentes da água, como o ibuprofeno e o diclofenaco, por razões relacionadas à saúde humana, ambiental e ao ecossistema aquático a aplicação da adsorção para remover fármacos contaminantes de águas residuais é uma estratégia promissora e vem sendo alvo de diversos estudos (CORNÉLIO, 2023; HOLLAS *et al.*, 2020; LIMA, 2023; MERCK, 2023; SANTOS, 2023).

3.5 Adsorção

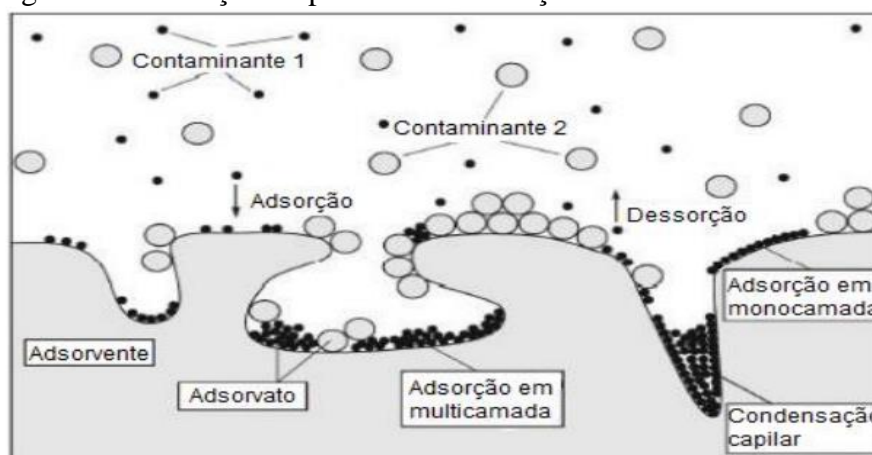
O processo físico-químico de separação no qual um fluido líquido ou gasoso percola um leito repleto de partículas sólidas encarregadas de adsorver um ou mais componentes do fluido denomina-se adsorção (GEANKOPLIS, 1998).

Reside na força motriz a diferença principal entre a concentração do adsorvato no fluido e na superfície adsorvente, esta força é responsável pela ocorrência da transferência do adsorvato de uma fase para outra (SILVA, 2022). O soluto fica retido no sólido por conta das interações microscópicas ocorridas com as partículas constitutivas deste sólido, sendo sucedida, deste modo, a chamada transferência seletiva de componente, intitulada transferência de massa. Sob a interface do material acumula-se uma espécie que é denominada de adsorbato ou adsorvato, e nomeia-se de adsorvente a superfície sólida em que o adsorvato é acumulado (SOUZA, 2022).

No momento em que atinge a superfície do adsorvente, o adsorvato que migrou da fase fluida, é difundido por meio dos poros do sólido, sendo adsorvido nos sítios ativos presentes na estrutura (MCCABE *et al.*, 1993).

Nas indústrias, seja na remoção de corantes, na recuperação de solventes, no tratamento de efluentes, na remoção de cores, odores e sabores prejudiciais nos alimentos ou em filtros e catalisadores de automóveis, entre outras inúmeras aplicações, a adsorção faz-se presente. Observa-se seu emprego também em equipamentos como máscaras de gás e purificadores de água (LAVRINI, 2013). A Figura 8 demonstra uma ilustração do processo de adsorção.

Figura 8 – Ilustração do processo de adsorção



Fonte: Adaptado de Dutta (2009)

São conhecidos dois diferentes tipos de adsorção que são a adsorção física e a adsorção química, nas quais existem diferenças, cujas principais estão dispostas no Quadro 4.

Quadro 4 – Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química

Adsorção Física	Adsorção Química
Forças de interações longas e fracas, como de Van der Waals	Forças de interações fortes, envolvem transferências de elétrons
Sem transferência de elétrons	Com transferência de elétrons
Calor de adsorção = 2 – 6 kcal mol ⁻¹	Calor de adsorção = 10 – 200 kcal mol ⁻¹
A camada adsorvida pode ser removida por aplicação de vácuo à temperatura de adsorção	A camada adsorvida só é removida por aplicação de vácuo e aquecimento à temperatura acima da adsorção
Formação de multicamadas abaixo da temperatura crítica	Somente formação de monocamadas
Acontece somente abaixo da temperatura Crítica	Acontece também a altas temperaturas
Lenta ou rápida	Instantânea
Adsorvente quase não é afetado	Adsorvente altamente afetado na superfície

Fonte: Cavalcante (2015)

As forças de Van Der Waal ocasionam na adsorção física (ou fisissorção) a presença da atração entre o adsorvente e o adsorvato, já que estas são fracas e longas, ocorrem em mais de

uma camada e são responsáveis pela rapidez e reversibilidade do processo. A energia liberada nesse processo é baixa e a entalpia desse processo é negativa (DUTRA, 2021).

Na adsorção química (ou quimissorção), ocorrem partilhas ou trocas de elétrons entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente, que fazem com que esta forma de adsorção seja caracterizada pela presença de ligações químicas fortes. A quimissorção necessita de sítios ativos para que o adsorvato seja retido, assim sendo, apenas as moléculas aptas a se ligar aos sítios ativos disponíveis serão adsorvidas (TADINI *et al.*, 2016).

Na adsorção, com o propósito de aprimorar a eficiência do processo, torna-se essencial a gestão cautelosa de diversos parâmetros, incluindo temperatura, pH, velocidade de agitação, polaridade, concentração no início de adsorbato, tamanho e formato das partículas contaminantes, além da presença de espécies que concorrem pelos sítios de adsorção. No contexto industrial, é necessário que o adsorvente selecionado demonstre uma eficiente capacidade de adsorção, aliada a uma considerável disponibilidade e custo reduzido (DUTRA, 2021).

Segundo Dutra (2021), no processo de adsorção química, o calor de adsorção é mais elevado comparado ao calor latente de condensação, já na adsorção física são inferiores, entretanto é complexo classificar um sistema por meio destes parâmetros. O pH exibe bastante influência no processo, de modo que, de acordo com a alteração do grau de ionização dos compostos ácidos e básicos, quando a adsorção é favorecida por pHs mais baixos, os íons H^+ , bastante dispostos no meio, neutralizam as cargas negativas presentes na superfície do adsorvente (DUTRA, 2021). A polaridade do adsorvato determina sua preferência entre interagir com o solvente ou com a superfície do adsorvente. Grupos polares, tais como hidroxilas, carboxílicos e aminas, demonstram uma afinidade mais acentuada por metais, promovendo, assim, uma intensificação na interação entre íons metálicos e o adsorvente (DUTRA, 2021).

A capacidade de adsorção (q_t) de um determinado adsorvente pode ser calculada através da Equação 1,

$$q_t = \frac{C_0 - C_f \cdot V}{m_{ad}} \quad (1)$$

na qual, q_t (mg/g) é a capacidade de adsorção, C_0 (mg/L) indica a concentração inicial e C_f (mg/L) a concentração final de adsorvato na fase fluida, o volume de solução é representado por V (L) e m_{ad} (g) é a quantidade de adsorvente.

A avaliação da eficiência de remoção (E) em um procedimento que utiliza um solvente sólido de fonte natural, ou seus derivados, para a adsorção de espécies químicas do meio aquoso pode ser calculada por meio da aplicação da Equação 2 (SILVA, 2019),

$$E = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 \quad (2)$$

em que C_0 é a concentração do adsorvato no início e C_f a concentração do adsorvato no final do processo.

3.6 Cinética de adsorção

A taxa ou velocidade de remoção sofrida pelo adsorvato na fase fluido é conhecida como de cinética de adsorção. Esse processo, envolve a transferência de massa que ocorre entre componentes que podem ser um ou mais, presentes na massa líquida externa, para a parte interna da partícula do adsorvente, a transferência de massa ocorre de modo que os componentes migram por meio dos microporos para as regiões mais internas da partícula. A ocorrência da cinética de adsorção pode se dar por meio de diferentes processos, conforme o descrito no Quadro 5 (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

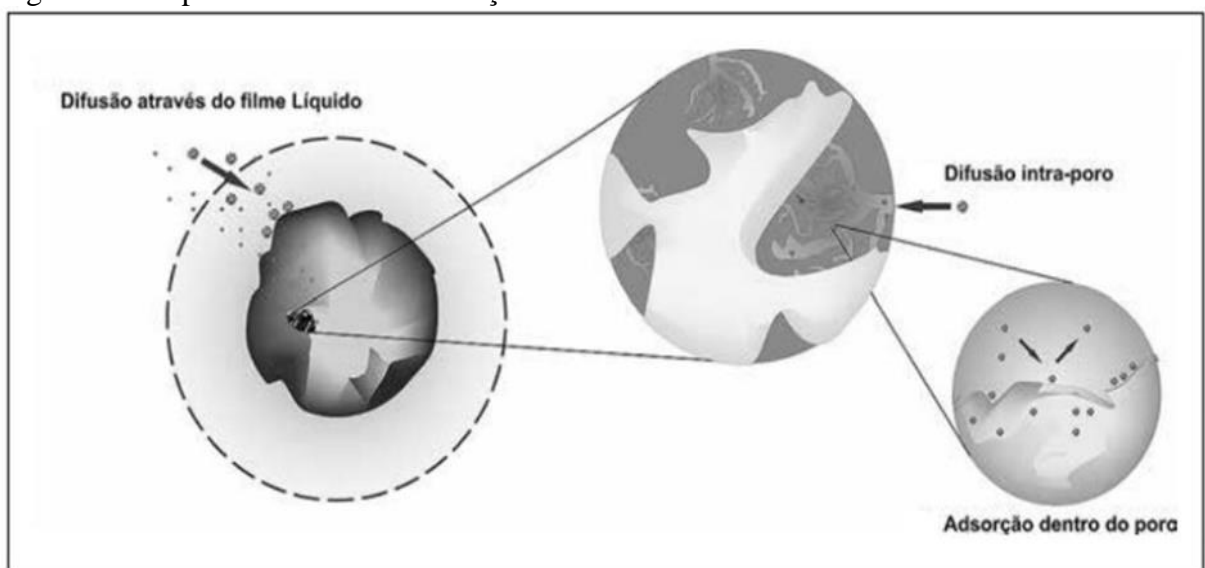
Quadro 5 – Processos que conduzem a cinética de adsorção

Processo	Descrição
Transferência de massa externa	Corresponde a transferência de moléculas da fase fluida para superfície externa da partícula adsorvente, por intermédio de uma camada de fluido que envolve a partícula
Difusão no poro	É ocasionada pela difusão de moléculas no fluido para o interior dos poros
Difusão na superfície	Corresponde à difusão das moléculas totalmente adsorvidas ao longo da superfície do poro

Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.* (2014)

A cinética de adsorção, como evidencia o Quadro 5, pode ser realizada por meio de transferência de massa externa, difusão no poro e difusão na superfície. Efetivamente, os adsorventes que apresentam mais empregabilidade contêm uma vasta distribuição de tamanho de poros situados na área interna das partículas e variados mecanismos de difusão ocorrem, de modo que este é dependente do tamanho relativo da molécula de adsorvato em relação ao tamanho do poro (NASCIMENTO *et al.*, 2014). As etapas da adsorção são ilustradas pela Figura 9.

Figura 9 – Etapas da cinética de adsorção



Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.* (2014)

Inúmeras condições apresentam potencial para impactar o processo de adsorção, sendo assim, foram desenvolvidos alguns modelos cinéticos visando estabelecer correlações que tenham capacidade de indicar a velocidade de remoção relacionada a um processo de adsorção específico.

Alguns dos modelos mais empregados nesse propósito são os de Pseudo-primeira ordem, Pseudo-segunda ordem, Difusão intrapartícula e Elovich (MINHO, 2023; SILVA, 2019) e são evidenciados no Quadro 6.

Quadro 6 – Modelos cinéticos comumente utilizados em processos de adsorção (Continua)

Modelo Cinético	Equação
Pseudo-primeira ordem	$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t})$ (3)

Quadro 6 – Modelos cinéticos comumente utilizados em processos de adsorção (Conclusão)

Pseudo-segunda ordem	$q_t = \frac{(q_e^2 k_2 t)}{1 + q_e k_2 t} \quad (4)$
Difusão intrapartícula	$q_t = k_{di} \cdot t^{1/2} + C \quad (5)$
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t) \quad (6)$

Fonte: Elovich, 1961; Lagergren, 1898; Weber e Morris, 1963.

No Quadro 6, segundo Silva (2019), a Equação 3 indica um modelo que foi elaborado por Lagergren no ano de 1898, configurando-se a primeira equação cinética elaborada no intuito de descrever o fenômeno de adsorção ocorrido em sistemas sólido/líquidos, fundamentando-se na capacidade do sólido em questão. O autor baseou-se na premissa de que a velocidade de remoção do adsorvato em relação ao tempo é diretamente relacionada à disparidade na concentração de saturação e disponibilidade de sítios ativos no material adsorvente.

Na equação os termos q_t e q_e representam, respectivamente, as quantidades de adsorvato adsorvido (mg g^{-1}) durante o momento do equilíbrio e no tempo t (min) e a constante da velocidade de adsorção de pseudo-primeira ordem é representada por k_l (min^{-1}). Ainda segundo Silva (2019), este modelo frequentemente não é ajustável a todo período de contato, normalmente sendo apropriado para períodos inferiores a 30 min na adsorção.

A Equação 4, segundo Souza (2018), segue os mesmos fundamentos da Equação 2, a diferença está no fato de que a adsorção é regulada por uma taxa de ordem n . No modelo k_2 representa a constante de velocidade ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$).

O modelo de difusão intrapartícula, indicado na Equação 5, parte da ideia de que a etapa que limita o processo é a difusão interna do adsorvato ocorrida em direção à superfície do adsorvente, sendo esta caracterizada por um coeficiente de difusão intrapartículas. No modelo em questão a constante de difusão intrapartícula é indicada por k_{di} ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1/2}$) e a espessura da camada limite é representada por C (mg g^{-1}), que conforme maior for seu valor, maior também será o efeito da camada limite no processo (SOUZA, 2018).

O modelo de Elovich, indicado pela Equação 6 é aplicado à cinética de quimissorção. Em processos de adsorção lenta, bem como, em determinados processos de quimissorção ativada este modelo se ajusta de modo satisfatório. Na equação, β representa a quantidade de sítios apropriados para o processo de adsorção em cada sistema, estando também associado à

extensão da cobertura da superfície de energia de ativação para quimissorção em (g mg^{-1}). E a velocidade de adsorção inicial é indicada pelo parâmetro α ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$) (SILVA, 2019).

Estudar a cinética de adsorção é de expressiva importância quando se trata do carvão ativado, pois está intrinsecamente ligada ao desempenho e eficácia desse material como adsorvente. Ao analisar a cinética de adsorção, é possível que seja determinada a velocidade com que o adsorvato é adsorvido pelo material adsorvente, possibilitando a otimização de processos de purificação e tratamento. Essa compreensão é fundamental em diversas aplicações, como no tratamento de água, purificação de gases e remoção de poluentes, onde a eficiência e a rapidez na adsorção são fatores críticos (NASCIMENTO, 2014).

3.7 Estado da arte para produção de carvão ativado obtido a partir de resíduos vegetais

De acordo com o crescimento da economia do Brasil, impulsionada, entre outros fatores, pela produção agrícola, também aumentam consideravelmente a geração de resíduos agroindustriais resultantes do processamento de matérias-primas como couro, madeira, fibras e alimentos. A falta de uma ascensão significativa na agroindústria do Brasil é atribuída, em parte, à considerável quantidade de resíduos gerados, suscetíveis a potenciais contaminações ambientais. Desse modo, a utilização sustentável desses materiais pode ser promovida através da aplicação destes resíduos no desenvolvimento de produtos de valor agregado (DUTRA, 2021). O Quadro 7 apresenta alguns dos estudos reportados da literatura a respeito da produção de carvão ativado obtido a partir de resíduos agroindustriais.

Quadro 7 – Estado da arte para produção de carvão ativado obtido a partir de resíduos vegetais (Continua)

Resíduo vegetal empregado	Aplicação	Autor
Resíduo de eucalipto	Adsorção de Azul de Metileno	(CÂNDIDO, 2019)
Casca do eucalipto branco	Adsorção de Azul de Metileno	(DUTRA, 2021)

Quadro 7 – Estado da arte para produção de carvão ativado obtido a partir de resíduos vegetais (Conclusão)

Casca de acácia negra	Adsorção de Fármacos	(SOUZA, 2022)
Bagaço de malte	Adsorção de Azul de Metileno	(BARBOSA <i>et al.</i> , 2022)
Borra de café	Tratamento de efluentes	(LIMA <i>et al.</i> , 2022)
Resíduos de ossos suínos	Adsorção de corante têxtil	(SANTOS, 2022)
Resíduos vegetais do extrativismo amazônico	Adsorção de amarelo ácido 17 e verde brilhante	(PEREIRA, 2022)
Bagaço de oliveira	Remoção de Prednisona	(FIGUEIREDO, 2022)
Resíduo de Castanheira-do-Brasil	Tratamento de água	(ALVES <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Autora (2023)

A análise do Quadro 7 indica uma variedade de materiais passíveis de serem utilizados na produção de carvão ativado, usando como matéria-prima resíduos agroindustriais, e que demonstram eficácia na adsorção de diferentes compostos. Os materiais mais proeminentes para a produção de carvão ativado são os lignocelulósicos. Esses materiais são caracterizados pela abundância de compostos como lignina e celulose. As vantagens do emprego destes materiais incluem a sua extensa disponibilidade e custo reduzido da matéria-prima, além de estarem presentes, muitas vezes, em granulometria reduzida, como em serragem. Destaca-se também o aumento da demanda por carvão ativado, que apresenta como viabilidade do atendimento o emprego desse tipo de matéria prima (DUTRA, 2021).

4 ARTIGO

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO OBTIDO A PARTIR DA CASCA DE EUCALIPTO (*Eucalyptus globulus Labill*)

Laura Gomes Rodrigues dos Santos^a

André Ricardo Felkl de Almeida^b

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a produção e caracterização de carvão ativado obtido a partir do resíduo agrícola da casca de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), cujo enfoque prático incluiu a remoção do corante Azul de Metileno e dos fármacos Ibuprofeno e Diclofenaco Sódico por meio da adsorção. A casca de eucalipto foi submetida a tratamento químico por meio da impregnação de uma solução de ácido fosfórico 40%. O adsorvente foi produzido mediante a pirólise, sob atmosfera inerte de N₂, da casca impregnada a uma temperatura de 500°C. A matéria-prima e o adsorvente foram submetidos a caracterização física e físico-química mediante a determinação do diâmetro de partícula (d_p), massa específica real (ρ_r), massa específica aparente (ρ_b), porosidade do leito de partículas (ε), umidade (U_{bu}) e análise termogravimétrica (TGA). Para o adsorvente também foi feita a caracterização quanto a análise imediata em base seca do teor de cinzas (C_z), voláteis (M_v) e carbono fixo (C_f) e difração de raix-X (DRX). Para avaliar a eficiência de adsorção do carvão ativado foram realizados experimentos de cinética de adsorção para o corante e os fármacos e calculada a eficiência de remoção (E). Evidenciou-se um diâmetro de partícula de adsorvente de 0,0403 mm. Os resultados para C_z , M_v e C_f corresponderam a, respectivamente, 17,79%, 17,71% e 64,50% e estão intimamente associados às condições do processo. O adsorvente apresentou uma ampla faixa de distribuição granulométrica, que é esperada para carvões ativados quimicamente com H₃PO₄. As análises de TGA e DRX revelaram que a aplicação de tratamento ácido ocasionou a degradação da celulose. As análises das cinéticas de adsorção revelaram que resíduo de eucalipto apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a produção de carvão ativado, visto que demonstrou eficiência de remoção de 95,98%, 72,50% e 88,31%, para o Azul de Metileno, o Ibuprofeno e o Diclofenaco sódico, respectivamente.

Palavras-chaves: Adsorção. Corante. Cinética. Fármacos. Resíduos Agrícolas.

1 INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus*, destacado por sua versatilidade e ampla adaptação, desempenha um papel fundamental no atendimento às demandas da indústria madeireira brasileira (DUTRA, 2021). Em 2022, observou-se um aumento de 0,1% nas extensões de florestas cultivadas no Brasil, representando um acréscimo de 8,1 mil hectares, com 77,3% da área total destinada à silvicultura ocupada pelo eucalipto. Juntamente com o pinus, essas espécies abrangem 96,0% das áreas de florestas plantadas para fins comerciais no país (IBGE, 2023).

A produção de celulose a partir do eucalipto e pinus é expressiva, gerando resíduos como pó, serragem, maravalha, cavacos e lenha, sendo esses passíveis de reaproveitamento em diversas aplicações (CERQUEIRA *et al.*, 2012; DUTRA, 2021). Uma alternativa destacada é a produção de carvão ativado, um material poroso reconhecido por sua extensa área superficial e capacidade de adsorção (CÂNDIDO, 2019).

O carvão ativado, obtido por métodos físicos ou químicos, apresenta diversas aplicações industriais, incluindo tratamento de efluentes e remoção de compostos como corantes e fármacos (DUTRA, 2021; GHEDIN, 2022). Considerando a abundância de resíduos

agroindustriais, a produção de carvão ativado a partir de materiais como os provenientes do eucalipto representa uma solução viável e sustentável (DUTRA, 2021; CÂNDIDO, 2019).

A adsorção é uma operação unitária que desempenha um papel de destaque na remoção de poluentes. Materiais adsorventes, como o carvão ativado, são empregados em diversas indústrias, destacando-se na remoção de corantes de efluentes têxteis (SILVA, 2019). A presença de corantes artificiais, como o azul de metileno, representa um desafio ambiental, exigindo métodos eficazes de tratamento (GHEDIN, 2022). Na literatura encontram-se inúmeros estudos envolvendo a adsorção de corantes por meio de carvão ativado produzido a partir de diversas matérias primas como palha de azevém (*lolium multiflorum lam.*) (SILVA, 2019), endocarpo do coco babaçu (SOUSA, 2018), casca de nozes (COSTA, FURMANSKI E DOMINGUINI, 2015), resíduo de casca do eucalipto branco (DUTRA, 2021), biomassa de madeira de reciclagem (NASCIMENTO, 2019), sabugo de milho (SALES *et al.*, 2015), entre outros.

Além disso, a contaminação de corpos hídricos por contaminantes emergentes, como os fármacos ibuprofeno e diclofenaco sódico, ressalta a necessidade de abordagens inovadoras no tratamento de efluentes (CARDOSO, 2020). São encontrados na literatura diversos estudos envolvendo adsorção de fármacos por meio de carvão ativado obtidos por diferentes fontes como endocarpo de murumuru (*Astrocaryum murumuru mart.*) (COSTA *et al.*, 2021), resíduos de couro curtido ao cromo (III) (GRABOSKI *et al.*, 2021), resíduo da casca da acácia-negra (*Acácia Mearnsii De Wild*) (SOUZA, 2022), bagaço de oliveira (FIGUEIREDO, 2022), resíduo de Baru (FERREIRA, 2022), Capim annoni (*Eragrostis plana Nees*) (MENDES, 2020) e resíduo de estação de tratamento de efluentes (COSTA, 2022).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho reside na proposta de uma alternativa sustentável para os resíduos de eucalipto, visando a produção de carvão ativado. O enfoque prático incluiu a caracterização do material precursor e do carvão ativado e a remoção do corante Azul de Metileno e dos fármacos Ibuprofeno e Diclofenaco Sódico por meio da adsorção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima empregada na produção de carvão ativado foi a casca de eucalipto da espécie *Eucalyptus Globulus Labill*, obtida na Estância São Francisco, situada na cidade de Bagé, Rio Grande do Sul. A amostra foi previamente preparada para a redução da granulometria seguindo duas etapas, sendo a primeira a redução manual e secagem em estufa por 24h a 105°C e a segunda a moagem em moinho de facas. O material moído foi submetido a lavagem com água corrente, segundo Foelkel (2004), para a remoção de compostos como polifenólicos poliméricos (taninos e ácidos fenólicos), ceras, quercitinas, além de sódio, potássio e outras substâncias que podem apresentar solubilidade em água e estar presentes na casca. Para finalizar a etapa de preparo da matéria-prima, o material foi seco em estufa por 72h a 105°C.

A casca moída e seca foi caracterizada, conforme a metodologia de Silva (2019), quanto ao diâmetro de partícula (d_p), massa específica real (ρ_r) e massa específica aparente (ρ_b), porosidade do leito de partículas (ε), umidade (U_{bu}) e análise termogravimétrica (TGA). O d_p da casca foi obtido por peneiramento, através de um sistema de peneiras 9, 16, 32, 60, 115 e 270 Mesh/Tyler e agitador eletromagnético. A determinação do ρ_r foi conduzida através de picnometria gasosa, empregando um picnômetro da marca *Quantachrome Instruments*, modelo ULTRAPYC 1200e, e utilizando gás hélio com pureza de grau 6.0. Os valores de ρ_b foram obtidos por meio do teste de proveta. A porosidade do leito de partículas foi calculada através da relação de ρ_r e ρ_b , conforme a Eq. 1,

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_r} \quad (1)$$

onde, ε corresponde a porosidade do leito, ρ_b (Kg/m³) representa a massa específica aparente e ρ_r (Kg/m³) a massa específica real.

As análises térmicas foram realizadas por termogravimetria (TGA) em uma termobalança (Shimadzuu, TGA-50, Japão) sob atmosfera de nitrogênio gasoso a uma taxa de 50mL/min e com aquecimento de 10°C/min até 700°C.

2.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

Para a produção do carvão ativado, procedeu-se à ativação química da casca moída mediante a impregnação com ácido fosfórico 40% m/m, na proporção de 1:1 em massa. A casca impregnada foi submetida a secagem em estufa por 24h a 105°C.

Para a produção do carvão ativado realizou-se a pirólise da casca impregnada a 500°C, de acordo com a metodologia de Silva (2019), em reator com fluxo contínuo de nitrogênio (N₂). Como etapa de finalização, o material foi neutralizado utilizando água corrente e seco por 72h a 105°C.

Efetuar-se as análises física e físico-química do material adsorvente, conforme a adaptação da metodologia de Silva (2019), mediante a determinação da massa específica real (ρ_r) e massa específica aparente (ρ_b), porosidade do leito de partículas (ε), diâmetro de partícula (d_p), teor de umidade (U_{bu}), análise imediata do teor cinzas (C_z), voláteis (M_v), carbono fixo (C_F), análise termogravimétrica (TGA) e difração de raios-X (DRX). O d_{ps} foi obtido por análise com Granulômetro (CILAS, 1190 L). Os valores de U_{bu} , C_z , M_v e C_F foram obtidos de acordo com as normas da *Association of Official Analytical Chemists - AOAC* (1997), e da *American Society for Testing and Materials - ASTM - E1755* e *ASTM - E872*. A amostra foi analisada conforme a cristalinidade por meio da difração de raios-X (Rigaku Ultima IV, Japão) através da implementação de radiação $CuK\alpha$ e geometria Bragg-Bretano. Efetuou-se a análise das amostras abrangendo uma extensão de 5 a 70°, com incrementos de 0,05.

2.3 EXPERIMENTOS DE ADSORÇÃO

Realizaram-se ensaios de cinética de adsorção em duplicata, segundo a adaptação da metodologia descrita por Silva (2019), para o corante Azul de Metileno e para os fármacos Ibuprofeno e Diclofenaco Sódico. Os experimentos de cinética envolveram a combinação de 0,5 g de adsorvente com 25 mL da solução de 50 mg/L para todos os compostos. As amostras foram agitadas em uma mesa agitadora, variando-se o tempo de contato de 0 a 120 min para o corante e de 0 a 300 min para os fármacos. A separação das fases sólida e líquida foi feita por meio de centrifugação a 3000 rpm durante 15 min. Visando quantificar o corante e os fármacos presentes em fase líquida, foram realizadas as curvas de calibração no espectrofotômetro, nos comprimentos de onda de 660, 221 e 278 nm, respectivamente para o azul de metileno, o ibuprofeno e o diclofenaco sódico. Através do ajuste linear das curvas obtiveram-se as Equações de 2 a 4, por meio das quais foram estimadas as concentrações para o corante e os fármacos,

$$C_{AZ} = 0,1358ab_1 \quad (2)$$

$$C_{IB} = 0,04265ab_2 \quad (3)$$

$$C_{DS} = 0,03481ab_3 \quad (4)$$

onde C_{AZ} , C_{IB} e C_{DS} são as concentrações em mg/L de azul de metileno, ibuprofeno e diclofenaco sódico, respectivamente e ab_1 , ab_2 e ab_3 representam suas respectivas absorvâncias. A leitura das absorvâncias das amostras foi conduzida em um espectrofotômetro UV-Vis a 660 nm, 221 nm e 278 nm para o Azul de Metileno, Ibuprofeno e Diclofenaco Sódico, respectivamente.

A capacidade de adsorção foi calculada utilizando a Equação 5,

$$q_t = \frac{C_0 - C_f \cdot V}{m_{ad}} \quad (5)$$

na qual, q_t (mg/g) indica a capacidade de adsorção, C_0 (mg/L) representa a concentração inicial e C_f (mg/L) a concentração final de adsorvato na fase fluida, o volume de solução é representado por V (L) e m_{ad} (g) é a quantidade de adsorvente.

Foi calculada a eficiência de remoção (E) dos contaminantes através da Equação 6,

$$E = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 \quad (6)$$

na qual, C_0 e C_f representam as concentrações do adsorvato no início e no final do processo, respectivamente.

2.4 AJUSTES CINÉTICOS DE ADSORÇÃO

Com o propósito de escolher o modelo mais apropriado para descrever a cinética de adsorção do corante e dos fármacos pelo adsorvente, quatro modelos distintos foram empregados, sendo eles Pseudo-primeira ordem, Pseudo-segunda ordem, Elovich e Modelo Difusivo, cujos modelos são descritos, respectivamente, pelas Equações 7 a 10.

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t}) \quad (7)$$

$$q_t = \frac{(q_e^2 k_2 t)}{1 + q_e k_2 t} \quad (8)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t) \quad (9)$$

$$q_t = k_{di} \cdot t^{1/2} + C \quad (10)$$

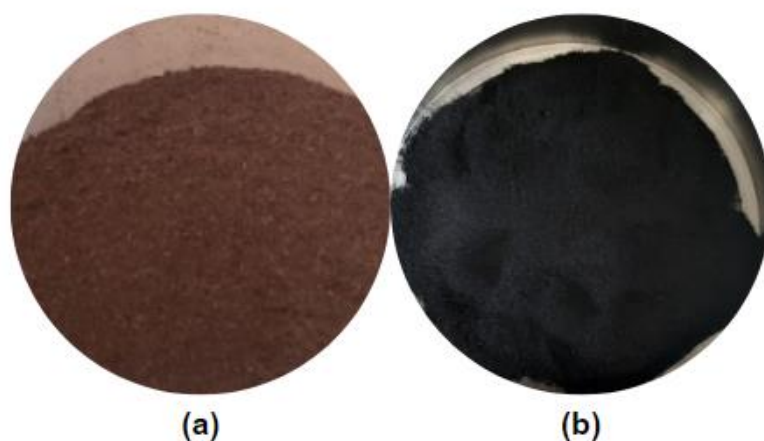
Nas equações 7 a 10 os termos q_t e q_e representam, respectivamente, as quantidades de adsorvato adsorvido (mg g⁻¹) durante o momento do equilíbrio e no tempo t (min). A constante da velocidade de adsorção de pseudo-primeira ordem e a de pseudo-segunda ordem são representadas por k_1 (min⁻¹) e k_2 (g mg⁻¹ min⁻¹), respectivamente. Na Equação 9, β (g mg⁻¹) representa a quantidade de sítios apropriados para o processo de adsorção em cada sistema. A velocidade de adsorção inicial é indicada pelo parâmetro α (mg g⁻¹ min⁻¹). Na Equação 10, a constante de difusão intrapartícula é indicada por k_{di} (g mg⁻¹ min^{-1/2}) e a espessura da camada limite é representada por C (mg g⁻¹).

A fim de avaliar os ajustes dos modelos, foram examinados os coeficientes de determinação (R^2) e qui-quadrado (X^2) e a tabela de análise de variância (ANOVA) com nível de confiança equivalente a 95%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta a uma fotografia ilustrativa da matéria-prima e do adsorvente obtido.

Figura 1 – Casca de eucalipto moída e seca (a) e carvão ativado (b)



Fonte: Autora (2023)

A comparação visual das amostras permite identificar uma expressiva modificação da casca de eucalipto moída e seca em relação ao adsorvente, visto que este apresentou coloração consideravelmente mais escura.

A Tabela 1 exibe os resultados da caracterização física e físico-química da matéria prima e do adsorvente.

Tabela 1 - Caracterização física e físico-química da matéria prima e do adsorvente

Parâmetro	Matéria-prima	Carvão ativado
d_p (mm)	0,2015	0,0403
ρ_r (kg/m ³)	1298,9 ± 0,0036	1443,21 ± 0,0061
ρ_b (kg/m ³)	184,0 ± 0,0034	248,4 ± 0,0058
ε	0,86	0,83
U_{bu} (%)	3,44 ± 0,44	0,10 ± 0,02
C_Z (%)	-	17,79 ± 0,58
M_V (%)	-	17,71 ± 8,48
C_F (%)	-	64,50 ± 8,29

Fonte: Autora (2023)

Observa-se na Tabela 1 que a casca de eucalipto moída e seca apresentou diâmetro de 0,2015 mm, enquanto o carvão ativado apresentou diâmetro de 0,0409 mm estando dentro do critério estabelecido para carvão ativado classificado como pó, visto que apresentou diâmetro de partícula inferior a 0,044mm.

A massa específica real obtida para a casca de eucalipto foi mais baixa em relação aos valores reportados na literatura para resíduos agroindustriais, visto que, Camargo (2021) obteve o valor de 1470,5 kg/m³ para massa específica real da casca da acácia-negra, Rosseto *et al.* (2014) reportaram 1461,0 kg/m³ para a massa específica real de endocarpos moídos de frutos de butiás (*Butia quaraimana*) e Silva (2019) estimou o valor de 1522,8 kg/m³ para a massa específica real da palha de azevém (*Lolium multiflorum Lam.*). O valor de massa específica obtido para o adsorvente, segundo Silva (2019), manteve-se na faixa esperada para carvões ativados obtidos a partir de resíduos agrícolas, que varia de 1000 a 1700 kg/m³.

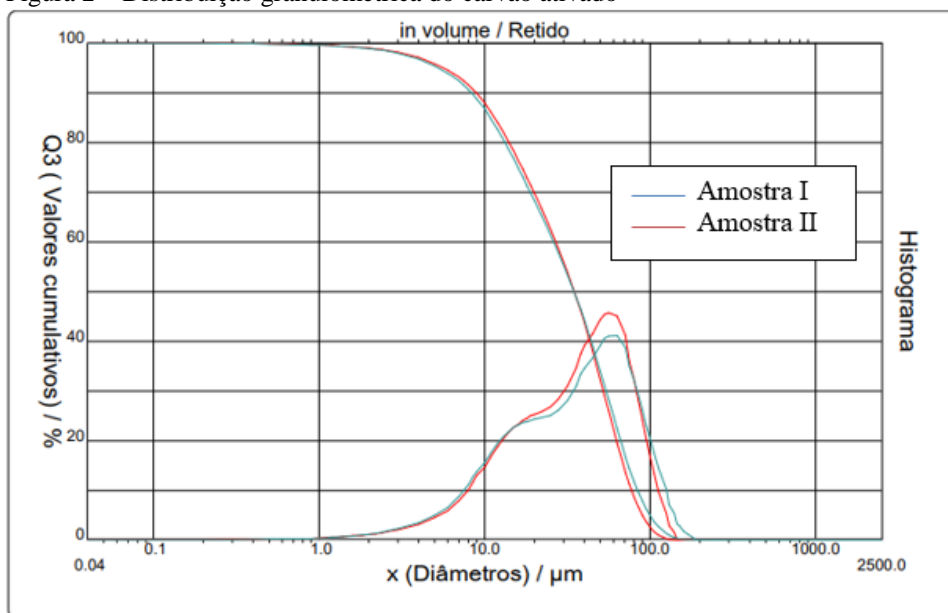
Para o adsorvente a porosidade do leito obtida foi de 0,83, que está na faixa de valores encontrados na literatura de 0,54 e 0,87 para carvões ativados produzidos a partir de resíduos agrícolas, por Sousa (2018) e Silva (2019), respectivamente.

O teor de umidade obtido para a casca de eucalipto foi de 3,44%, representando um valor dentro do encontrado na literatura para outros resíduos agrícolas, visto que Camargo (2021) obteve o valor 3,05% para a casca de acácia, Mani *et al.* (2004) relataram valores de 6,9% para palha de cevada e 6,2% para palha de milho e Carrier *et al.* (2013) identificaram o teor de umidade de 6,2% para a casca de eucalipto. Quanto ao teor de umidade do adsorvente, de acordo com Silva (2019), é preferível que este não ultrapasse 10% por questões de armazenamento do material, uma condição que é corroborada pelo carvão produzido, o qual apresentou um valor de cerca de 0,10%.

Os resultados alcançados para os teores de cinzas, voláteis e carbono fixo foram, respectivamente de 17,79%, 17,71% e 64,50%, valores esses que estão intimamente associados às condições do processo. O teor de carbono fixo foi elevado comparado com a literatura, visto que Silva (2019) encontrou o teor de 48,15% para o carvão ativado obtido a partir da palha de azevém e Camargo (2021) obteve 39,97% para o carbono fixo do carvão ativado obtido da casca da acácia-negra (*Acacia mearnsii De Wild*). O alto teor de carbono fixo é uma condição favorável, visto que refere-se à fração de carbono que permanece no material após a remoção dos voláteis durante o processo de carbonização e é uma propriedade essencial do carvão ativado, de modo que contribui para sua capacidade de adsorção, resistência mecânica e estabilidade química. De acordo com Silva (2019), à medida que a temperatura empregada na pirólise aumenta, observa-se um acréscimo nos teores de cinzas e carbono fixo, resultando em uma massa específica mais elevada, enquanto o teor de matéria volátil diminui, de modo que, a aplicação de temperaturas mais elevadas durante o processo promove uma ampla expansão dos gases e sua expulsão do interior do carvão, resultando em um menor teor de voláteis e um maior teor de carbono fixo no carvão ativado. O alto teor de cinzas identificado no adsorvente constitui um aspecto desfavorável para o processo de adsorção, considerando que, segundo Catelan e Mendes (2018), a capacidade adsortiva é potencializada à medida que se reduz o teor de cinzas, já que a presença de material mineral exerce uma influência adversa sobre o processo, propiciando a adsorção preferencial de água devido à sua natureza hidrofílica.

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica do carvão ativado obtida a partir do Granulômetro CILAS, 1190 L.

Figura 2 – Distribuição granulométrica do carvão ativado

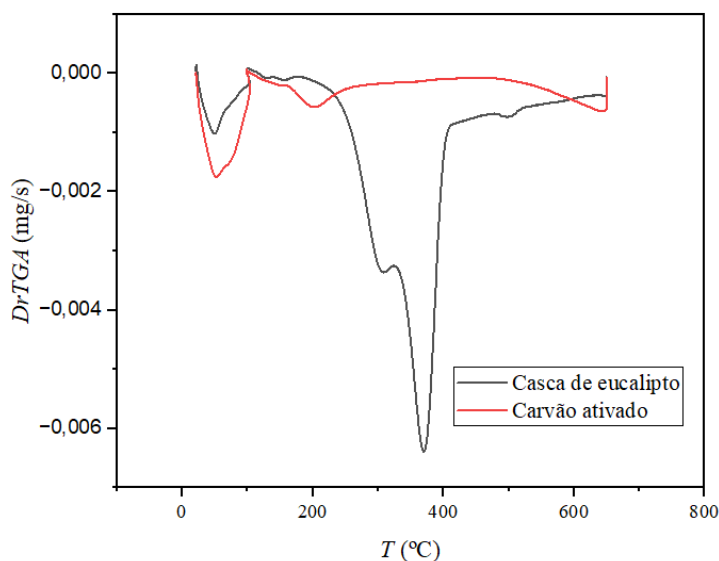


Fonte: Autora (2023)

A partir da análise da Figura 2, observa-se que a amostra apresentou uma boa reprodutibilidade. Observa-se ainda, que em relação a amostra I, 10% das partículas apresentaram diâmetros menores que 0,0089mm, 50% apresentaram diâmetros menores que 0,0349mm, 90% apresentaram diâmetros inferiores a 0,0774mm e o diâmetro médio da amostra foi equivalente a 0,0394mm. A amostra II apresentou 10% das partículas com valores de diâmetro inferiores a 0,0083mm, 50% dos diâmetros menores que 0,0348mm, 90% dos diâmetros menores que 0,0841mm e diâmetro médio de 0,0412mm. A ampla faixa de distribuição apresentada pelas amostras, segundo Nascimento *et al.* (2017) é esperada para carvões ativados quimicamente com H_3PO_4 .

A Figura 3 apresenta as análises termogravimétricas da derivada da perda de massa em função da temperatura referentes à casca de eucalipto moída e seca e ao carvão ativado obtido.

Figura 3 – Análise termogravimétrica da matéria-prima e do adsorvente

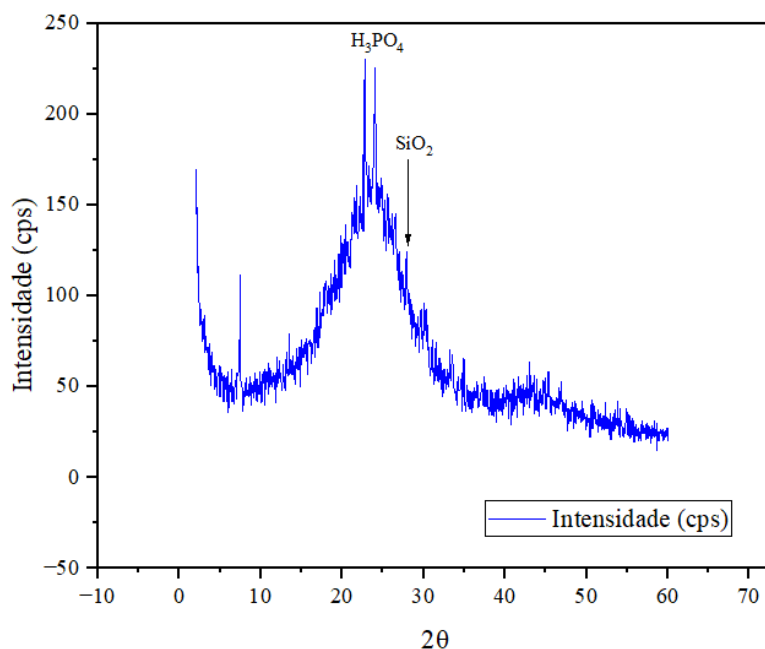


Fonte: Autora (2023)

Na Figura 3, nota-se três picos de perda de massa relacionados a casca e três picos de perdas de massa relacionadas ao adsorvente. A primeira fase de perda, ocorre a temperaturas inferiores a 100 °C, em ambas as amostras e se supõe que está associada à perda de umidade. São observados na Figura 2 para a matéria-prima picos de perda de massa distintos para a hemicelulose variando de 220 a 315°C, para a celulose de 315 a 400°C e para a lignina entre 100 e 900°C. Este fato, segundo Camargo (2021), é esperado para materiais lignocelulósicos. O segundo pico presente no adsorvente, acima de 150°C, pode estar associado à volatilização do ácido fosfórico, visto que sua temperatura de degradação é de 158°C. Ainda no adsorvente, nota-se que este não atingiu a estabilidade térmica, possivelmente em função da presença de uma substância não identificada no material. Segundo Denari e Cavalheiro (2012), em análises termogravimétricas, espera-se que a perda de massa total da matéria ocorra em diversas etapas, fato que é observado em ambas as amostras.

A análise da estrutura cristalina do adsorvente é exposta na Figura 4.

Figura 4 - Difratograma de raios-X para o carvão ativado

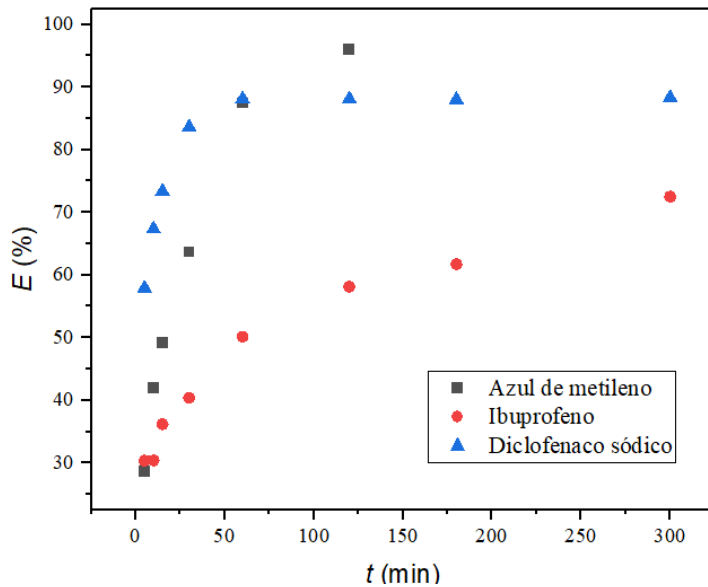


Fonte: Autora (2023)

Observa-se na Figura 4, que o adsorvente apresentou 3 picos cristalinos e 1 fase amorfa. A fase amorfa é identificada entre 15 e 30°. O segundo pico é difuso e situa-se em 22,85 e 24°, sendo referente a resíduos de H_3PO_4 , que aliado aos resultados da análise termogravimétrica indica resquícios do agente impregnante no material. Já o terceiro pico cristalino é observado em 27,95° e é referente ao quartzo (SiO_2), que é esperado em carvões produzidos a partir de precursores orgânicos. Ainda houve um pico cristalino observado em 7,5° que não foi identificado pelo banco de dados.

As eficiências de remoção dos contaminantes são evidenciadas na Figura 5.

Figura 5 – Eficiência de remoção para o corante e os fármacos



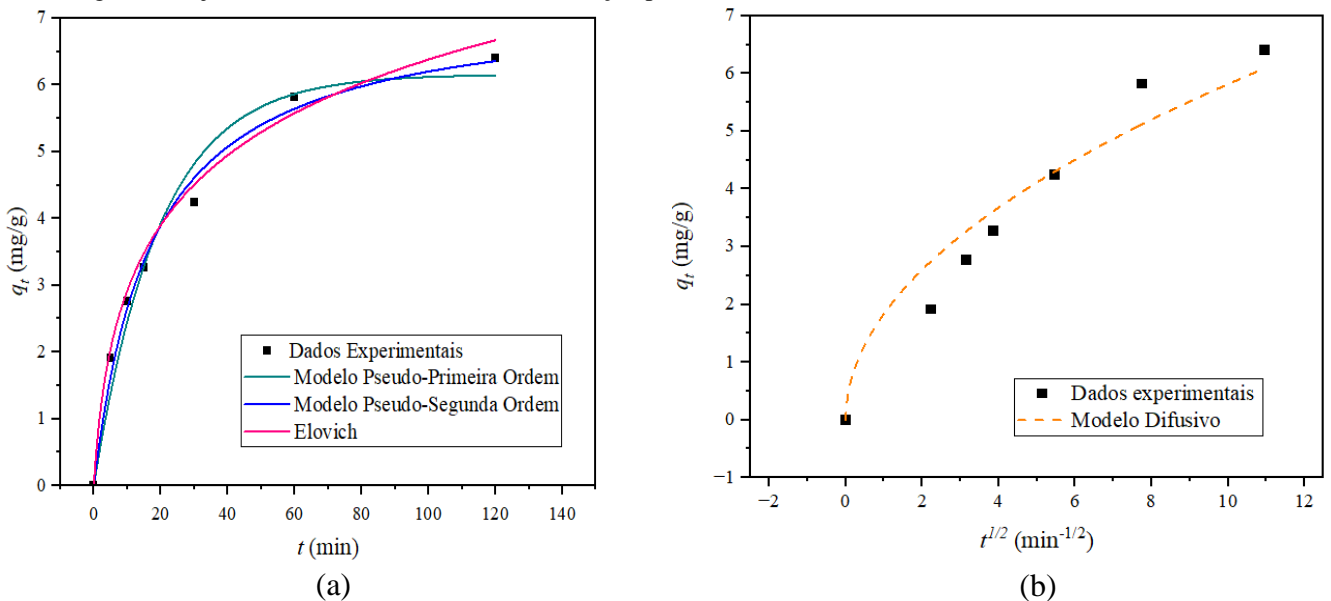
Fonte: Autora (2023)

A Figura 5 evidencia a eficiência de remoção dos contaminantes ao longo do tempo. O azul de metileno, o ibuprofeno e o diclofenaco sódico apresentaram eficiência de remoção final de 95,98%, 72,50% e 88,31% respectivamente.

Os valores de eficiência de remoção evidenciaram o potencial adsorptivo do carvão ativado a partir de casca de eucalipto, visto que, estas demonstraram-se próximas ou superiores as evidenciadas pela literatura. Silva (2019) por exemplo obteve 99,36% para a remoção de azul de metileno com carvão ativado obtido da palha de azevém, Figueiredo (2012) reportou o valor de 57,9 % para a remoção de ibuprofeno a partir de adsorção com carvão ativado de borras de café e Schmidt (2022) encontrou 90,3% para a eficiência de remoção de diclofenaco sódico através de carvão ativado de folhas de abacateiro (*Persea americana Mill.*).

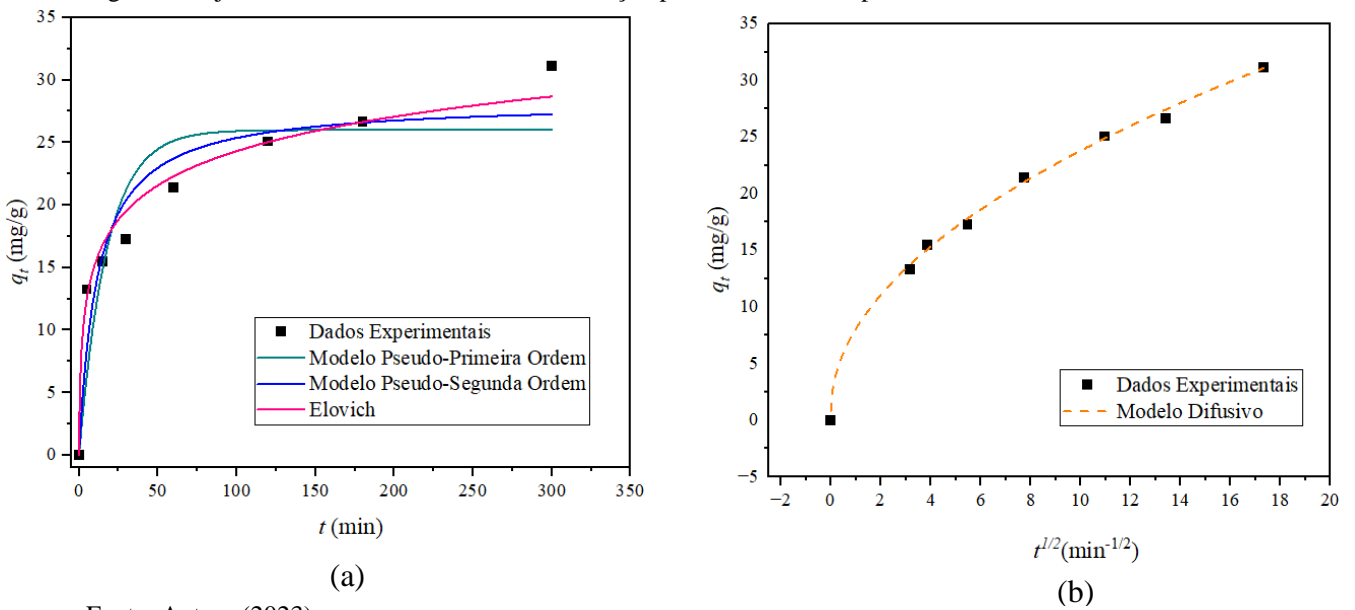
As Figuras 6 a 8 apresentam os ajustes dos modelos cinéticos de adsorção para o corante e para os fármacos Ibuprofeno e Diclofenaco, respectivamente.

Figura 6 - Ajustes dos modelos cinéticos de adsorção para o corante Azul de Metileno



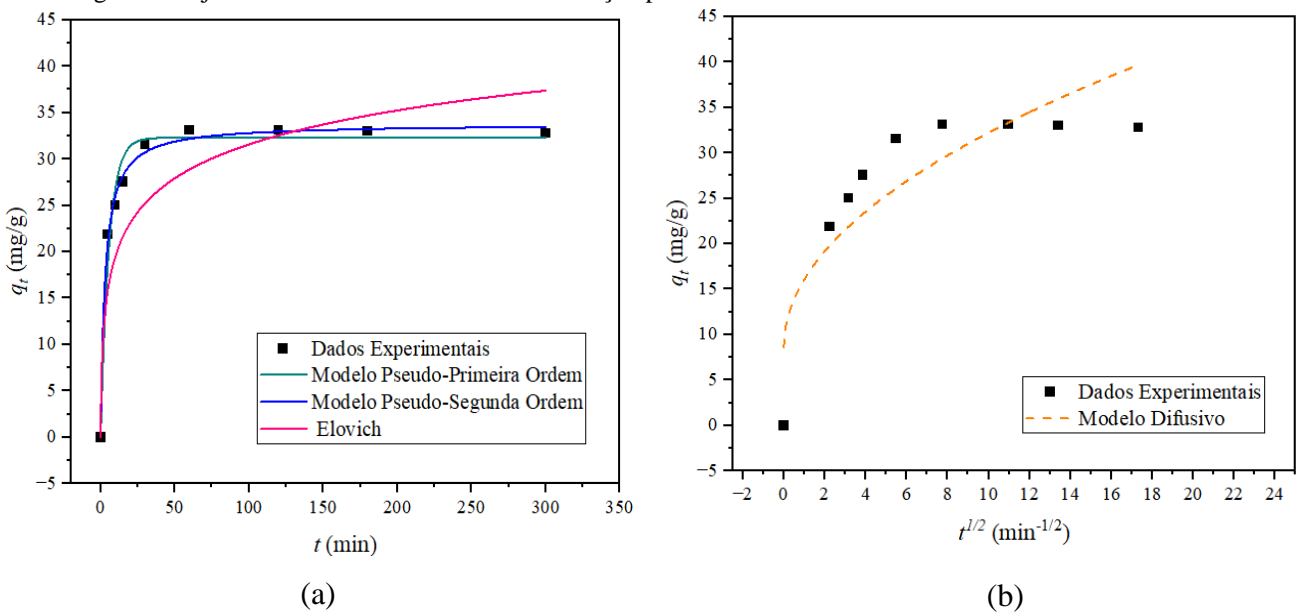
Fonte: Autora (2023)

Figura 7 - Ajustes dos modelos cinéticos de adsorção para o fármaco Ibuprofeno



Fonte: Autora (2023)

Figura 8 - Ajustes dos modelos cinéticos de adsorção para o fármaco Diclofenaco Sódico



Fonte: Autora (2023)

Observa-se na Figura 6 que o tempo que a adsorção do corante levou para atingir o equilíbrio foi de aproximadamente 120 min e evidenciou ser um processo de adsorção em que ocorre transferência de massa tanto por convecção quanto por difusão, comprovado pelos modelos de ajuste cinético.

Através da análise da Figura 7 observa-se que a adsorção do fármaco Ibuprofeno levou cerca de 300 min para atingir o equilíbrio e a adsorção do fármaco demonstrou ser um processo majoritariamente difusivo, comprovado pelos modelos de ajuste cinéticos empregados.

Ao analisar a Figura 8, observa-se que para o Diclofenaco Sódico o equilíbrio de adsorção foi atingido em aproximadamente 50 min, que ocorre, segundo Silva (2019), em função da adsorção das moléculas de adsorvato na superfície externa do material adsorvente, evidenciando ser um processo altamente convectivo, comprovado pelos modelos de ajuste.

Na Tabela 2, são apresentados os valores dos parâmetros de ajuste para os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, elovich e difusão intrapartícula para o Azul de Metileno, Ibuprofeno e Diclofenaco, respectivamente.

Tabela 2 - Ajustes dos modelos de cinética de adsorção para o Azul de Metileno

Cinética com Azul de Metileno				
Modelo	PPO	PSO	Elovich	DI
Parâmetros	$q_e = 6,155$ $k_1 = 0,050$	$q_e = 7,278$ $k_2 = 0,008$	$\alpha = 0,8239$ $\beta = 0,6194$	$C = 9,8901$ $k_{di} = 1,8393$
R^2	0,9739	0,9909	0,9503	0,9436
X^2	0,1549	0,0540	0,1056	0,3351
Cinética com Ibuprofeno				
Modelo	PPO	PSO	Elovich	DI
Parâmetros	$q_e = 25,999$ $k_1 = 0,057$	$q_e = 28,302$ $k_2 = 0,003$	$\alpha = 17,934$ $\beta = 0,251$	$C = 0,779$ $k_{di} = 7,277$
R^2	0,8411	0,91869	0,92377	0,9934
X^2	17,4018	8,90375	1,33289	0,64525
Cinética com Diclofenaco Sódico				
Modelo	PPO	PSO	Elovich	DI
Parâmetros	$q_e = 32,297$ $k_1 = 0,178$	$q_e = 33,782$ $k_2 = 0,009$	$\alpha = 20,498$ $\beta = 0,189$	$C = 8,607$ $k_{di} = 7,466$
R^2	0,9782	0,9957	0,8986	0,7760
X^2	2,8663	0,5608	2,8625	29,4804

Fonte: Autora (2023)

A partir da Tabela 2 observa-se que os modelos que melhor se ajustaram à cinética de adsorção do corante foi o de pseudo-segunda ordem, seguido do de pseudo-primeira ordem, os quais exibiram uma regressão significativa, com R^2 consideravelmente elevados e baixos X^2 , evidenciando a predominância da transferência de massa por convecção. Segundo Sousa (2018), o fato do modelo que melhor se ajustou ter sido o de pseudo-segunda ordem indica que o processo de adsorção química ocorre por meio da doação ou troca de elétrons entre o adsorvato e o adsorvente. O modelo de Elovich a partir do ajuste evidenciou que também ocorre quimissorção ao longo do processo de adsorção, visto que este apresentou coeficiente de determinação (R^2) consideravelmente elevados e baixos qui-quadrados (X^2). Os ajustes mais satisfatórios apresentaram valores da capacidade de adsorção próximos aos valores calculados experimentalmente. Verifica-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais para o fármaco Ibuprofeno foi o de difusão intrapartícula, cujo R^2 e X^2 foram satisfatórios, evidenciando que o processo de adsorção ocorreu de forma lenta em que a transferência de massa predominante ocorreu por difusão. Pela análise dos dados referentes ao Diclofenaco verifica-se que o modelo que melhor se ajustou foi o de pseudo-segunda ordem, seguido do ajuste pelo modelo de pseudo-primeira ordem, o que demonstra a predominância da ocorrência do processo de transferência de massa convectiva. Ambos os modelos apresentaram R^2 e X^2 satisfatórios. A capacidade de adsorção obtida pelos modelos que melhor se ajustaram também foram as que mais se aproximaram da obtida experimentalmente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nas caracterizações da casca de eucalipto foram consistentes com a literatura. Obteve-se adsorvente de d_p 0,0403 mm, atendendo aos critérios para diâmetro de carvões ativados. Os resultados para C_z , M_v e C_F corresponderam a, respectivamente, 17,79%, 17,71% e 64,50%. As análises de TGA e DRX revelaram que a aplicação de tratamento ácido à casca ocasionou a degradação tanto da celulose.

A análises das cinéticas de adsorção revelaram que resíduo de eucalipto apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a produção de carvão ativado, visto que, para as concentrações testadas, este demonstrou eficiência de remoção de 95,98%, 72,50% e 88,31% para o azul de metileno, o ibuprofeno e o diclofenaco sódico, respectivamente. Os processos de adsorção dos diferentes compostos investigados apresentam características distintas. No caso do corante, o tempo necessário para atingir o equilíbrio foi de aproximadamente 120 min, revelando um processo que envolve tanto a transferência de massa por convecção quanto por difusão. No que diz respeito ao Ibuprofeno, para atingir o equilíbrio de adsorção foram necessários cerca de 300 min, indicando um processo difusivo de adsorção. Quanto ao Diclofenaco Sódico, o equilíbrio de adsorção foi alcançado em apenas 50 min, caracterizando um processo altamente convectivo.

Dado o exposto, pode-se afirmar que o resíduo de eucalipto apresentou resultados satisfatórios quanto ao seu emprego para a produção de carvão ativado, visto que este demonstrou potencial adsorptivo para o Azul de Metileno, o Ibuprofeno e o Diclofenaco sódico.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, R. S. **Desenvolvimento de material adsorvente do resíduo da casca da acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild) para o branqueamento de óleo de arroz**, 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2021.

CÂNDIDO, N. R. **Produção e Caracterização de carvões de eucaliptos ativados fisicamente com CO₂ ou gás da carbonização**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOABAXKNC/1/disserta_o_de_mestrado__n_bia_rangel_c_ndido.pdf. Acesso em: 17 jan. 2023

CARRIER, M. *et al.* Impact of the lignocellulosic material on fast pyrolysis yields and CATELAN, T. C.; MENDES, A. N. F. Produção de carvão ativado a partir da palha de milho e posterior utilização para remoção do corante azul de metileno de efluentes aquosos. **BJPE**, 5 jul. 2019. Disponível em: https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/V05N03_11/pdf. Acesso em: 13 dez. 2023.

CERQUEIRA, P. H. A.; VIEIRA, G. C.; BARBERENA, I. M.; MELO, L. C.; FREITAS, L. C. F. Análise dos Resíduos Madeireiros Gerados Pelas Serrarias do Município de Eunápolis-BA. **Floresta e ambiente**, Seropédica, RJ, v.19, n.4, p.506-510, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/JBzYqzFHgRCRQR6YYBnvXRj/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 25 out. 2022.

CIMIRRO, N. F. G. M. **Carvão ativado de capimannoni (Eragrostis plana Nees) produzido por pirólise convencional e ativação química aplicado ao processo de remoção de fármacos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2020.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 3, p. 386-390, 2017. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v12i3a5461>. Acesso em: 11 dez. 2023.

COSTA, L. M. F. **Adsorção do Diclofenaco Sódico Utilizando Carvão Ativado Obtido a partir de Resíduo de Estação de Tratamento de Efluentes**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

COSTA, P. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. Produção, Caracterização e Aplicação de Carvão Ativado de Casca de Nozes para Adsorção de Azul de Metileno. **Revista Virtual de Química**, 3 mar. 2015. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/871>. Acesso em: 13 dez. 2023.

DUTRA, D. K. R. **Obtenção de Carvão Ativado a partir do resíduo de casca do eucalipto branco**. 2021. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Química Industrial) - Universidade do Vale do Taquari, Curso de Química Industrial, Lajeado, 2021. Disponível em: <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/51097ddf-9044-4b68-b82e-19d050eac0b5/content>. Acesso em: 13 jan. 2023.

FERREIRA, I. V. **Carvão ativado de resíduo de Baru para adsorção de fármacos**. 91p. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

FIGUEIREDO, P. L. M. **Adsorção de ibuprofeno e ácido clofíbrico em carvões ativados**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) - Universidade Nova de Lisboa, [S. l.], 2012. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/9123/1/Figueiredo_2012.pdf. Acesso em: 17 jan. 2024.

FIGUEIREDO, P. S. **Remoção de Prednisona por adsorção em carvão ativado obtido a partir do bagaço de Oliveira**. 69 p. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

FONSECA, M. J. O., PEREIRA, A. R., & MARTINS, E. S. (2017). Caracterização de cultivares de cenoura pelo teste de tetrazólio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 12(3), 2591-2597. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v12i3a5461/425>. Acesso em: 12 dez. 2023.

GHEDIN, S. **Remoção dos corantes têxteis Índigo Carmim e Azul de Metileno pelo processo de adsorção utilizando pirita**. 2022. Dissertação (Pós Graduação em Energia e Sustentabilidade) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/236300/PGES0043-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 dez. 2023.

GRABOSKI *et al.*, 2021 https://www.researchgate.net/profile/Cesar-Tonicioli-Rigueto/publication/353247969_ADSORCAO_DE_DICLOFENACO_DE_SODIO_POR_CARVAO_ATIVADO_OBTIDO_A_PARTIR_DE_RESIDUOS_DE_COURO_CURTIDO_AO_CROMO_III/links/60f0c07a0859317dbde5fe9a/ADSORCAO-DE-DICLOFENACO-DE-SODIO-POR-CARVAO-ATIVADO-OBTIDO-A-PARTIR-DE-RESIDUOS-DE-COURO-CURTIDO-AO-CROMO-III.pdf
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413015769>. Acesso em 17 fev. 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Valor de produção da silvicultura e da extração vegetal cresce 11,9% e atinge recorde de R\$ 33,7 bilhões. **Agência de Notícias IBGE**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37963-valor-de-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-cresce-11-9-e-atinge-recorde-de-r-33-7-bilhoes>. Acesso em: 12 dez. 2023.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. **Canadian biosystems engineering**. 2004. Disponível em: <https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/46/c0404.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

NASCIMENTO, C. Síntese e caracterização de carvão ativado da palha de milho a partir da ativação química com H₃PO₄ para a adsorção de atrazina e carbendazim. **ENEMP 2017 - Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Disponível em: <https://11nq.com/JTEkc>. Acesso em: 12 dez. 2023.

NASCIMENTO, L. G. A. **Estudo da adsorção do corante Nylosan azul brilhante por carvão ativado comercial e oriundo de biomassa de madeira de reciclagem**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ROSSETO, V *et al.* CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E TÉRMICA DE ENDOCARPOS DE BUTIÁS. **COBEQ**, FLORIANÓPOLIS, SC, 19 out. 2014. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/0678-24467-155921.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2023.

SALES, P. F. *et al.* Produção, Caracterização e Aplicação do Carvão Ativado Obtido a partir do Sabugo de Milho: A Busca pelo Reaproveitamento de um Resíduo Agroindustrial. **Revista virtual de química**, 21 jan. 2015. Disponível em: <https://rvq-sub.sbjq.org.br/index.php/rvq/article/view/831/567>. Acesso em: 17 jan. 2024.

SCHMIDT, L. F. **Avaliação da remoção da concentração de Diclofenaco de sódio em solução aquosa através do processo de adsorção utilizando carvão ativado proveniente de folhas de abacateiro (Persea americana Mill.)**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/243341/TCC%20Luiz%20Fernando%20Schmidt.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jan. 2024.

SILVA, E. O. **Carvão ativado obtido a partir da palha de azevém (*Lolium multiflorum Lam.*) para a adsorção do corante azul de metileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2019

SOUZA, N. B. A. Adsorção de fármacos a partir do resíduo da casca da acácia-negra (*acácia mearnsii de wild*) moído, tratado e transformado em carvão ativado. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste estudo, foi possível evidenciar que o resíduo agrícola da casca de eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), quando submetido a tratamentos químicos e físicos, apresenta considerável potencial adsorptivo, que deve ser explorado. O estudo revelou que a casca de eucalipto é adequada para produção de carvão ativado e apresentou diâmetro médio de partículas de 0,0403 mm. Análises indicaram degradação da hemicelulose e celulose pós-tratamento ácido e pirólise. Os processos de adsorção para Azul de Metileno, Ibuprofeno e Diclofenaco Sódico apresentaram eficiências de remoção de 95,98%, 72,50% e 88,31%, respectivamente. Desse modo, conclui-se que o resíduo de eucalipto demonstrou resultados promissores para a produção de carvão ativado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que estudos futuros sobre este tema abordem os seguintes tópicos:

1. Realizar as caracterizações quanto as análises imediatas em base seca de teor de cinzas, voláteis e carbono fixo para a casca do eucalipto;
2. Realizar a difratometria de raios-X para a casca de eucalipto;
3. Realizar isotermas de adsorção;
4. Analisar a adsorção em outros contaminantes.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, C. Estudo avalia manejo de resíduos florestais em área de eucalipto. **Jornal da USP**. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-agrarias/estudo-avalia-manejo-de-residuos-florestais-em-area-de-eucalipto/>>. Acesso em: 20, dez. 2022.

ARAÚJO, L. F.; GUIOTOKU, M. Produção de carvão ativado a partir de resíduo de Erva-Mate. **XVIII Encontro de Química da Região Sul**, Curitiba, PR, 11 nov. 2010. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/877781/producao-de-carvao-ativado-a-partir-de-residuo-de-erva-mate>> Acesso em: 06 jan. 2023.

BORRELY, Sueli *et al.* Contaminação das águas por resíduos de medicamentos: ênfase ao cloridrato de fluoxetina. **O mundo da saúde**, 28 set. 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: **Casa Civil-Subchefia para Assuntos Jurídicos**, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

CAMARGO, R. S. **Desenvolvimento de material adsorvente do resíduo da casca da acácia negra (*Acacia mearnsii* De Wild) para o branqueamento de óleo de arroz**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2021.

CÂNDIDO, N. R. **Produção e Caracterização de carvões de eucaliptos ativado fisicamente com CO₂ ou gás da carbonização**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/RAOABAXKNC/1/disserta__o_de_mestrado___n_bia_rangel_c_ndido.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2023.

CARDOSO, C. M. M. **Estudo da remoção de contaminantes emergentes em meio aquoso por carvão ativado alternativo produzido com cascas do fruto de Jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.), utilizando sistema combinado CA-MO**. 2021. Tese (Doutorado em Tecnologias Química e Biológica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

CASTRO, C. **Preparação de carvão ativado a partir de borra de café: uso como adsorvente e como suporte catalítico para a remoção de poluentes orgânicos em meio aquoso**. 2009. Dissertação - (Pós-Graduação em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, MG, 2009. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/6739>>. Acesso em: 23 jan. 2023.

CAVALCANTE, V. R. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos de coco, banana e laranja**. 2015. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, PE, 2015. Disponível em: <<http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/642>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

CERQUEIRA, P. H. A.; VIEIRA, G. C.; BARBERENA, I. M.; MELO, L. C.; FREITAS, L. C. F. Análise dos Resíduos Madeireiros Gerados Pelas Serrarias do Município de Eunápolis-BA. **Floresta e ambiente**, Seropédica, RJ, v.19, n.4, p.506-510, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/floram/a/JBzYqzFHgRCRQR6YYBnvXRj/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 25 out. 2022.

CLARK, H. L. M. **Remoção de fenilalanina por adsorvente produzido a partir da torta prensada de grãos defeituosos de café**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos). Faculdade de Farmácia, UFMG, Belo Horizonte. 115p. 2010.

CONTRERAS, A. M. G. **Produção e Caracterização de filtro para purificação de água a partir da cinza de casca de arroz impregnada com nanopartículas de prata**. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/30404948.pdf>. Acesso em: 16, jan. 2023.

CORNÉLIO, J. P. L. **Desenvolvimento de material adsorvente a partir do resíduo da colheita do arroz (*Oryza sativa*) para a remoção de poluentes emergentes em solução aquosa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2023.

COSTA FILHO, D. V.; SILVA, A. J.; SILVA, P. A. P.; SOUSA, F. C. Aproveitamento de resíduos agroindustriais na elaboração de subprodutos. **II Congresso internacional das ciências agrárias COINTER – PDVAGRO 2017**. João Pessoa, 2017. Disponível em: <<https://cointer-pdvagro.com.br/wp-content/uploads/2018/02/APROVEITAMENTO-DE-RES% C3% 8DDUOS-AGROINDUSTRIAIS-NA-ELABORA% C3% 87% C3% 83O-DE-SUBPRODUTOS.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2022.

COSTA, L. M. F. **Adsorção do Diclofenaco Sódico Utilizando Carvão Ativado Obtido a partir de Resíduo de Estação de Tratamento de Efluentes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

COUTO, G. M. *et al.* Utilização de serragem de *Eucalyptus* sp. na preparação de carvões ativados. **SciELO**. Lavras, V. 36, n. 1, p. 69-77, jan./fev., 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/VDHfkcNZJKQxkn6MQm6GWcp/?lang=en>. Acesso em: 20, jan. 2023.

DE SALES, Priscila. F.; BERTOLI, Alexandre C.; PINTO, Felipe M.; MAGRIOTIS, Zuy Maria. Produção, caracterização e aplicação do carvão ativado obtido a partir do sabugo de milho: a busca pelo reaproveitamento de um resíduo agroindustrial. **Revista Virtual de Química**, Niterói, RJ, v.7, n.4, 21 jan. 2015. ISSN 1984-6835. Disponível em: <http://rvq-sub.s bq.org.br/index.php/rvq/article/view/831>. Acesso em: 05 jan. 2023.

DUTRA, D. K. R. **Obtenção de Carvão Ativado a partir do resíduo de casca do eucalipto branco**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Química Industrial) - Universidade do

Vale do Taquari, Curso de Química Industrial, Lajeado, 2021. Disponível em: <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/51097ddf-9044-4b68-b82e-19d050eac0b5/content>. Acesso em: 13 jan. 2023.

DUTTA, B. K. **Principles of Mass Transfer and Separation Processes**. Nova Delhi: PHI Learning, 2009. Disponível em: https://content.kopykitab.com/ebooks/2016/06/7406/sample/sample_7406.pdf. Acesso em: 23 jan. 2023

EMBRAPA. O Eucalipto. **Embrapa**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>. Acesso em: 14 jan. 2023.

EVERETT, D. H. **Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry. Pure and Applied Chemistry**, jan. 1972. Disponível em: <http://www.degruyter.com/view/j/pac.1972.31.issue4/pac197231040577/pac197231040577.xml>. Acesso em: 23 jan. 2023.

FERNANDES, R.; CARIO, S. Da roda d'água a nanotecnologia: a trajetória da evolução tecnológica do setor têxtil. **Abphe**, 23 out. 2008.

FIGUEIREDO, J.L.; PEREIRA, M.F.R. The role of surface chemistry in catalysis with carbons. **Catalysis Today**, 2010.

FIGUEIREDO, L. D. Uso de Resíduos Florestais de Eucalipto. **ESALQ Júnior Florestal**, 2022. Disponível em: <https://www.esalqjrfflorestal.org.br/post/uso-de-res%C3%ADduos-florestais-de-eucalipto>. Acesso em: 17 jan. 2023.

FIGUEIREDO, P. S. **Remoção de Prednisona por adsorção em carvão ativado obtido a partir do bagaço da oliveira**. Orientador: Marcilio Machado Morais. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Química, Bagé, 2022.

FLORESTA, Curitiba, PR, v. 47, n. 3, p. 323 - 332, jul. / set. 2017. Arruda, E. L. de *et al.*

FRANCISKI, M. A. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir de bagaço de malte oriundo de cervejarias para utilização como adsorvente do corante azul de metileno**. 2018. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15884>. Acesso em: 20 nov. 2022.

GABRIEL, V. A.; VASCONCELOS, A. A.; LIMA, E. F.; CASSOLA, H.; BARRETTO, K. D.; BRITO, M. C. A importância das plantações de eucalipto na conservação da biodiversidade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 2013. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/435>. Acesso em: 12 out. 2022.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3 ed. Englewood Cliffs: P T E Prentice-Hall, 1993.

GHEDIN, Sara. **Remoção dos corantes têxteis Índigo Carmim e Azul de Metileno pelo processo de adsorção utilizando pirita**. 2022. Dissertação (Pós Graduação em Energia e Sustentabilidade) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/236300/PGES0043-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 dez. 2023.

GORGULHO, H. F.; MESQUITA, J. P.; GONÇALVES, F.; PEREIRA, M. F.R.; FIGUEIREDO, J. L. **Characterization of the surface chemistry of carbon materials by potentiometric titrations and temperature-programmed desorption**. Carbon, Oxford, v. 46, n. 12, p. 1544-1555, Oct. 2008.

GUILARDUCI, V. *et al.* Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. **Química Nova**, [s. l.], 14 jun. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/TMmRkmksVnZGhFvHCkKpBYk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 dez. 2023.

HEYLMANN, K. *et al.* Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil. **SciELO**, 29 abr. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/BDGvWxvThxwwMg9ZwhXyjcd/?lang=pt&format=pdf#:~:text=Com%20rela%C3%A7%C3%A3o%20ao%20tratamento%20de,de%20absor%C3%A7%C3%A3o%20no%20efluente%20tratado>. Acesso em: 29 nov. 2023.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. **Process Safety Environmental Protection**, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1205/095758298529326>. Acesso em: 29 dez. 2022.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2022**. São Paulo. 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2022.

IBGE. Valor de produção da silvicultura e da extração vegetal cresce 11,9% e atinge recorde de R\$ 33,7 bilhões. **IBGE**, 27 set. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37963-valor-de-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-cresce-11-9-e-atinge-recorde-de-r-33-7-bilhoes>. Acesso em: 6 dez. 2023.

IMMICH, A. P. S. **Remoção de corantes de efluentes têxteis utilizando folhas de Azadirachta indica como adsorvente**. 2006. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Valor de produção da silvicultura e da extração vegetal cresce 11,9% e atinge recorde de R\$ 33,7 bilhões. **Agência de Notícias IBGE**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37963-valor-de-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-cresce-11-9-e-atinge-recorde-de-r-33-7-bilhoes>. Acesso em: 12 dez. 2023.

KRAMER, R. *et al.* Determinação de anti-inflamatórios na água e sedimento e suas relações com a qualidade da água na bacia do Alto Iguaçu, Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 18 maio 2015.

KUHN, R. O. **Adsorção de Diclofenaco Sódico por carvão ativado obtido do resíduo da casca da Acácia Negra (Acacia mearnsii De Wild)**. Orientador: André Ricardo Felkl de Almeida. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Química, Bagé, 2022.

LAGERGREN, S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. **Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar**, jan. 1898. Disponível em: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10016440244/>. Acesso em: 29 dez. 2023.

LANA, A. Q. **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

LAVRINI, B. Meio Filtrante em Carvão Ativado E Suas Aplicações Em Filtragem e Tratamento. **Meio Filtrante**. 2013. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/1038/meio-filtrante-em-carvao-ativado-e-suas-aplicacoes-em-filtragem-e-tratamento>. Acesso em: 20 jan. 2023.

LEE, C. K.; LOW, K. S.; CHEW, S. L. Removal of Anionic Dyes by Water Hyacinth Roots. **Advances in Environmental Research**, v. 3, n. 1, p. 343-351, 1999

LEMO, S. Dados da ONU mostram que 15 mil pessoas morrem por doenças ligadas à falta de saneamento. **Jornal da USP**, 2020. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/dados-da-onu-mostram-que-15-mil-pessoas-morrem-anualmente-por-doencas-ligadas-a-falta-de-saneamento/>. Acesso em: 17 out. 2022.

LIMA, Fernanda Siqueira. **Avaliação da remoção de fármacos por processos adsorptivos: estudos isotérmico, cinético e termodinâmico**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. 5. ed. New York: McGraw Hill, 1993.

MEIOS FILTRANTES DE QUALIDADE PARA FILTROS DE ÁGUA. **Snatural**, 2022. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/meios-filtrantes-filtros-agua-caracteristicas/>. Acesso em: 17, out. 2022.

MINHO, G. U. **Estudo da modelagem da adsorção em batelada do fármaco nimesulida presente em solução aquosa utilizando carvão ativado como adsorvente**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2023.

MURALEEDHARAN, T. R; IYENGAR, L; VENKOBACHAR, C. **Biosorption: an attractive alternative for metal removal and recovery**. Current Science, v. 61, n. 6, p. 379-385, 1991. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24095078?seq=1>. Acesso em: 23 jan. 2023.

NASCIMENTO, R. F. do *et al.* ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. **Fortaleza: Imprensa Universitária**, 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 22 dez. 2022.

NIEDERSBERG, C. **Ensaio de adsorção com carvão ativado produzido a partir da casca do tungue (*Aleurites fordii*), resíduo do processo de produção de óleo.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Catarina. 65p. 2012.

EMBRAPA. O Eucalipto. **Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>. Acesso em 14 out. de 2022.

OLIVEIRA, A. C.; *et al.* Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, V. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap10.pdf>. Acesso em: 19, jan. 2023.

PEGO, M. **Modificação superficial de carvão ativado utilizando tratamento corona.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, 2016. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/11815/2/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Modifica%C3%A7%C3%A3o%20superficial%20de%20carv%C3%A3o%20ativado%20utilizando%20tratamento%20corona.pdf. Acesso em: 14 dez. 2023.

ENAP. Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. **ENAP**, p. 1-54, 15 dez. 2017. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4923/1/PGRS_ENAP_R2.pdf. Acesso em: 4 dez. 2023.

QUEIROZ, D.; SILVA, J. M. S. Resíduo aproveitável para carvão de eucalipto em área de floresta cultivada com quatorze anos de idade. **Revista científica eletrônica de engenharia florestal**, 2005. Disponível em: <http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/9kI3DKR8fAWPaO9_2013-4-25-15-35-43.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

ROCHA, O. R. S. da.; NASCIMENTO, G. E. do, CAMPOS, N. F. ; SILVA, V. L. da; DUARTE, M. M. M. B. Avaliação do processo adsorvivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo bf-2r. **Revista Química Nova**, v. 35, n. 7, p.1369-1374, 2012.

RUTZ, E. Universidade Federal de Ouro Preto. **Estudo da adsorção de corantes da indústria têxtil usando carvão ativado e o pó retido no filtro eletrostático da fabricação da alumina como adsorventes.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

SANTOS, F. **Aplicação de adsorventes ecológicos para remediação de ibuprofeno em meio aquoso.** 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química) - Universidade Federal de Sergipe, 2023.

SANTOS, I.; METZKER, S.; MACHADO, A. Produção e caracterização de adsorvente para remoção de corante orgânico em meio aquoso. **Nativa**, [s. l.], 24 out. 2023. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/16144/12964>. Acesso em: 13 nov. 2023.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. *et al.* Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SCHNEIDER, E. L. **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. 2008, 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2008. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1869/1/Eduardo%20Luiz%20Schneider.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2022.

SCHNEIDER, L. T. **Casca de arroz como agente adsorvente no tratamento de óleo residual**. 2017, 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2017. Disponível em: <http://131.255.84.103/bitstream/tede/2997/5/Lara%20Talita%20Schnider.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

SEABRA, C. **Farmacocinética do Ibuprofeno**. 2015. Dissertação (Mestre em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Fernando Pessoa, 2015.

SILVA, A. C. *et al.* Qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos de eucalipto. **Scientia Forestalis**, 2019. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr123/cap15.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2023.

SILVA, E. O. **Carvão ativado obtido a partir da palha de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) para a adsorção do corante azul de metileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2019.

SILVA, R. M. Q. **Extração por partição em baixa temperatura para determinação simultânea de microcontaminantes de preocupação emergente em esgoto bruto total por CG/EM**, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SIMÕES, V. **Tratamento do pó de capim elefante por explosão a vapor e impregnação de tensoativo para adsorção de cromo em meio aquoso: processos batelada e dinâmico**. 2023. Dissertação (Programa de pós-graduação em engenharia química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

SOUSA, M. **Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir do endocarpo do coco babaçu (*Attalea speciosa*)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, 2018.

SOUZA, Natallia Britto Azevedo. **Adsorção De Fármacos A Partir Do Resíduo Da Casca Da Acácia-Negra (*Acácia Mearnsii De Wild*) Moído, Tratado E Transformado Em Carvão Ativado**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2022.

SRINIVASAKANNAN, C.; ABU, M. Z. B. **Production of activated carbon from rubber wood sawdust**. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 89-96, Aug. 2004.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. A.; FILHO, P. A. P. Operações Unitárias na Indústria de Alimentos. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

TONUCCI, M. C. **Adsorção de diclofenaco, estradiol e sulfametoxazol em carvões ativado e nanotubos de carbono: estudos cinéticos e termodinâmicos**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

FUSATI. Tratamento Preventivo de água Residual. **FUSATI**. 2022. Disponível em: <https://www.fusati.com.br/tratamento-preventivo-de-agua-residencial/>. Acesso em: 16, jan. 2023.

VALENCIA, C. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola**. 2007. Tese (Mestrado) - PUC-RIO, 2007.

VALÉRIO FILHO, A. **Carvão ativado obtido a partir de lodo de estação de tratamento de água aplicado na remoção de contaminantes**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2021.

VAN HALEM, D., VAN DER LAAN, H., HEIJMAN, S., VAN DIJK, J., AMY, G. Assessing the sustainability of the silverimpregnated ceramic pot filter for low-cost household drinking water treatment. **Physics and chemistry of the Earth**, 34, 36-42.

VIANA, L. G.; CRUZ, P. S. **Reaproveitamento de Resíduos Agroindustriais**. In. IV CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – IVCOBESA. Cruz das Almas, BA. Anais. IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental – 2016. Cruz das Almas, Bahia, BA, 13 a 16 de jul. 2016. Disponível em: <http://cobesa.com.br/2016/download/cobesa-2016/IVCOBESA-133.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2022.

VILA NOVA, F.V.P.; TENÓRIO, N.B. Doenças de Veiculação Hídrica Associadas à Degradação dos Recursos Hídricos, Município de Caruaru – PE. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia-MG v. 20, n. 71, setembro, p. 250-264.(VILA NOVA; TENÓRIO, 2019).

WEBER, W. J.; MORRIS, J. C. Kinetics of adsorption on carbon from solution. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 89, n. 2, p. 31-60, 1963.

YANG, K.; PENG, J.; SRINIVASAKANNAN, C.; ZHANG, L.; XIA, H.; DUAN, X., Preparation of high surface area activated carbon from coconut shells using microwave heating, **Bioresource Technology**, v. 101, p. 6163–6169, 2010