UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

# AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CROMO EM EFLUENTE A PARTIR DE CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO COM PALITO DE ERVA-MATE

Rafaela Klein Paes

Lajeado/RS, 12 de dezembro de 2023

Rafaela Klein Paes

# AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CROMO EM EFLUENTE A PARTIR DE CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO COM PALITO DE ERVA-MATE

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Química, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Profª. Drª. Cleide Borsoi

Lajeado/RS, 12 de dezembro de 2023

Rafaela Klein Paes

# AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO DO CROMO EM EFLUENTE A PARTIR DE CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO COM PALITO DE ERVA-MATE

A Banca examinadora abaixo aprova o Projeto de Monografia apresentado no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Química, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química

Profª. Drª. Cleide Borsoi - orientadora
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Profª. Drª. Lucélia Hoehne
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof.º Drº. Gustavo Reisdorfer
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado/RS, 12 de dezembro de 2023

# RESUMO

A qualidade dos cursos de água vem sendo afetada de diversas maneiras sendo que a principal forma de poluição é através das indústrias, sobretudo pelo descarte incorreto dos resíduos tanto sólidos quanto líquidos. Estes efluentes líquidos podem concentrar metais pesados, com elevado potencial tóxico, como o cromo (Cr). Entre as diversas formas de tratamento destes efluentes está a adsorção com carvão ativado, porém o custo desse material é elevado e, por isso, estão surgindo diversas formas de desenvolvimento de carvão ativado, a partir da utilização de resíduos agroindustriais. Como no Rio Grande do Sul há predomínio do cultivo e do consumo de erva-mate, há elevada geração de resíduos e, portanto, buscando aproveitar os resíduos destas indústrias, aliando isto ao tratamento de efluentes, o objetivo deste estudo é caracterizar e obter resultados satisfatórios a partir de um carvão ativado produzido com os palitos de erva-mate, para a remoção do cromo de efluentes. Para isso, a metodologia utilizada consistiu em ativar o carvão fisicamente (CAF) com pirólise em mufla, a 700 ºC, por 45 min e quimicamente com cloreto de zinco ($ZnCl_2$), hidróxido de sódio (NaOH) e ácido fosfórico ($H_3PO_4$), em proporção 1:1, sendo as amostras sintetizadas denominadas $CA_{ZnCl2}$, $CA_{H3PO4}$ e $CA_{NaOH}$ e os resultados das análises de adsorção foram comparados ao carvão ativado comercial (CAC). Foram analisados diferentes pH, cujos resultados indicam que o melhor pH de adsorção é o 6, considerando-se a capacidade de adsorção, utilizando-se 0,2 g/L de carvão ativado no tempo de equilíbrio de 3 min, com maior capacidade de adsorção para $CA_{H3PO4}$ e para $CA_{ZnCl2}$. Já para as análises envolvendo a variação de concentração de cromo hexavalente (Cr (VI)), a partir de solução de efluente sintético, verificou-se que a maior eficiência foi obtida com $CA_{H3PO4}$ na concentração de 1,77 mg/L Cr (VI), e durante a análise da variação do tempo de equilíbrio de adsorção, a amostra $CA_{H3PO4}$ alcançou 90% de remoção de Cr (VI) com 5 min. Para a avaliação da eficiência do carvão ativado, foram elaboradas as isotermas de adsorção a partir dos modelos de Langmuir, Freundlich e de Brunauer, Emmett e Teller (BET), que constataram que o modelo de Freundlich foi o mais satisfatório para todas amostras analisadas. Através dos resultados obtidos, verifica-se que é possível desenvolver carvão ativado utilizando palitos de erva-mate, e que podem ser obtidos resultados satisfatórios na adsorção do Cr.

**Palavras-chave:** carvão ativado; cromo; palitos de erva-mate; adsorção.

## ABSTRACT

The quality of watercourses has been affected in several ways, with the main form of pollution being through industries, especially due to the incorrect disposal of both solid and liquid waste. These liquid effluents can concentrate heavy metals, with high toxic potential, such as chromium (Cr). Among the different ways of treating these effluents is adsorption with activated carbon, however the cost of this material is high and, therefore, different ways of developing activated carbon are emerging, using agro-industrial waste.As in Rio Grande do Sul there is a predominance of cultivation and consumption of yerba mate, there is a high generation of waste and, therefore, seeking to take advantage of waste from these industries, combining this with effluent treatment, the objective of this study is to characterize and obtain results satisfactory results from activated carbon produced with yerba mate sticks, for removing chromium from effluents. For this, the methodology used consisted of activating the coal physically (CAF) with pyrolysis in a muffle furnace, at 700 ºC, for 45 min and chemically with zinc chloride ($ZnCl_2$), sodium hydroxide (NaOH) and phosphoric acid ($H_3PO_4$), in a 1:1 ratio, with the synthesized samples being called $CA_{ZnCl2}$, $CA_{H3PO4}$ and $CA_{NaOH}$, and the results of the adsorption analyzes were compared to commercial activated carbon (CAC). Different pHs were analyzed, the results of which indicate that the best adsorption pH is 6, considering the adsorption capacity, using 0.2 g/L of activated carbon in the equilibrium time of 3 min, with a greater adsorption capacity. adsorption for $CA_{H3PO4}$ and for $CA_{ZnCl2}$. As for the analyzes involving the variation in the concentration of hexavalent chromium (Cr (VI)), from a synthetic effluent solution, it was found that the highest efficiency was obtained with $CA_{H3PO4}$ at a concentration of 1.77 mg/L Cr (VI ), and during the analysis of the adsorption equilibrium time variation, the $C_{AH3PO4}$ sample achieved 90% Cr(VI) removal within 5 min. To evaluate the efficiency of activated carbon, adsorption isotherms were created based on the Langmuir, Freundlich and Brunauer, Emmett and Teller (BET) models, which found that the Freundlich model was the most satisfactory for all samples analyzed. Through the results obtained, it can be seen that it is possible to develop activated carbon using yerba mate sticks, and that satisfactory results can be obtained in the adsorption of Cr.



**Keywords**: activated carbon; chrome; yerba mate sticks; adsorption.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado da obtenção do carvão ativado a partir de palitos de erva-mate.……...……..32

Figura 2 - Amostras após ativação química com $H_3PO_4$ (A), $ZnCl_2$ (B) e NaOH (C)..35

Figura 3 - Amostras após a etapa de pirólise, ativadas com $ZnCl_2$ (A), $H_3PO_4$ (B), NaOH (C) e sem ativação química (D).....35

Figura 4 - Diferentes formatos das isotermas…….……..……40

Figura 5 - Carvão ativado obtido com palitos de erva-mate funcionalizados com: $ZnCl_2$ (A), $H_3PO_4$ (B), NaOH (C) e Carvão ativado comercial (D).....……..…..42

Figura 6 - $CA_{NaOH}$ durante lavagem de neutralização com agente neutralizante……43

Figura 7 - Aspecto da amostra sem ativação química, apenas por pirólise…..……44

Figura 8 - Curva de calibração elaborada a partir de diferentes concentrações de Cr (VI).....……45

Figura 9 - Avaliação da variação de concentração de adsorvato……..48

Figura 10 - Interferência do tempo de equilíbrio na adsorção do Cr (VI)...……..51

Figura 11 - Isotermas de adsorção da amostra $CA_{ZnCl2.}$……...……..54

Figura 12 - Isotermas de adsorção utilizando-se o $CA_{H3PO4}$……..55

Figura 13 - Isotermas de adsorção obtidas para o CAC…..……..56

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Estudos de adsorção que apresentaram ajuste satisfatório para o modelo de isoterma de Freundlich……57

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação das amostras de carvão ativado produzidas com palitos de erva-mate…….…...…36

Tabela 2 - Parâmetros empregados para as análises de adsorção, envolvendo pH, tempo de equilíbrio e variação de concentração de Cr (VI)...……38

Tabela 3 - Capacidade de adsorção das amostras avaliadas……47

Tabela 4 - Comparativo das capacidades de adsorção dos adsorventes $CA_{ZnCl2}$, $CA_{H3PO4}$ e CAC…….……..……50

Tabela 5 - Parâmetros das isotermas de adsorção obtidos de acordo com os modelos avaliados, para os adsorventes $CA_{ZnCl2}$, $CA_{H3PO4}$ e CAC……53

## SUMÁRIO

**1 INTRODUÇÃO……11**
**1.1 Objetivo geral……..…13**
**1.2 Objetivos específicos…….. 13**
**1.3 Justificativa……...……13**

**2 REVISÃO TEÓRICA……..……15**
**2.1 Problemas ambientais……15**
**2.2 Resíduos líquidos industriais……17**
**2.2.1 Indústrias e legislação brasileira…….. 20**
**2.3 Resíduos sólidos industriais……21**
**2.4 *Biochar*……22**
**2.4.1 Erva-mate e o biocarvão……...…26**
**2.4.2 Aplicações dos resíduos e dos palitos de erva-mate……..29**

**3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS……..… 31**
**3.1 Materiais…….. 31**
**3.2 Método…… 31**
**3.2.1 Obtenção do carvão ativado...……...……32**
**3.2.2 Análises de adsorção……...36**
**3.2.3 Isotermas de adsorção……39**

**4 RESULTADOS E DISCUSSÃO……...41**
**4.1 Aspecto visual das amostras desenvolvidas e rendimento…… 41**
**4.2 Curva de calibração…… 45**
**4.3 Análises de adsorção…….. 46**
**4.3.1 Efeitos da variação de pH da solução…… 46**
**4.3.2 Efeitos da variação de concentração de Cr (VI) da solução……..……48**
**4.3.3 Análise do tempo de equilíbrio……..51**
**4.3.4 Isotermas de adsorção……52**

**5 CONCLUSÃO……58**

**REFERÊNCIAS…… 60**

# 1 INTRODUÇÃO

Os transtornos significativos causados ao meio ambiente são gerados principalmente por atividades antrópicas, que são intensamente dependentes de fontes primárias e fósseis (Machado; Leite; Duarte, 2021). Com o crescimento da demanda industrial e de demais intervenções humanas, aumenta também a extração de matérias-primas, o processamento, a produção, a distribuição e, consequentemente, a geração de resíduos que necessitam de tratamento e destino adequado (Rocha *et al*., 2020).

As atividades industriais também são as principais responsáveis por afetar a qualidade dos corpos hídricos, pelo reduzido ou inexistente tratamento adequado dos efluentes, afetando o meio biótico e abiótico dos locais, tornando os corpos d'água vulneráveis (Ananias *et al.,* 2021). Essa contaminação provém de várias áreas industriais, como por exemplo de indústrias têxteis, de tintas, de pigmentos, metalúrgicas, curtumes, entre outras, que podem concentrar metais pesados (chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd)) com potencial tóxico. O cromo é um dos metais pesados mais tóxicos e está presente em soluções aquosas em dois estados de oxidação, trivalente (Cr (III)) e hexavalente (Cr (VI)), sendo que na forma hexavalente causa ação irritante e corrosiva no corpo humano e é considerado cancerígeno (Moreira; Bueno, 2019). Assim, para o descarte correto dos efluentes no meio ambiente, é necessário reduzir os níveis de cromo até a concentração estabelecida pela legislação (Ries; Silveira, 2019).

Em relação ao tratamento dos efluentes, existem diferentes tipos de tratamento que dependem dos efluentes gerados, assim como dos contaminantes

presentes nos resíduos e da carga poluidora de cada indústria. Esses tratamentos incluem processos químicos, físicos e biológicos, com mais de uma técnica disponível (Ananias *et al.,* 2021). Em específico para a remoção de cromo e de outros metais pesados, encontra-se a precipitação química, a troca iônica, a filtração por membranas, a eletrólise, a extração, a adsorção, entre outras, sendo que a adsorção apresenta vantagens em relação às demais. Estas vantagens incluem a confiabilidade dessa tecnologia, a facilidade de operação e a combinação com diversas tecnologias eficientes de depuração (Ries; Silveira, 2019).

Embora o carvão ativado seja ideal para a remoção de contaminantes por adsorção, o uso é limitado devido ao alto custo de produção, o que tem gerado oportunidades de pesquisa para reduzir estes custos a partir do carvão mineral, como por exemplo a produção através de biomassa (Morais *et al*., 2019). Assim, com o intuito de gerar novos produtos com valor agregado, estão sendo difundidos os conceitos de minimização, de recuperação, de reaproveitamento e de biotransformação de resíduos, que são necessários para otimizar o agronegócio, ao passo que reduz impactos ambientais (Ries; Silveira, 2019).

Sabendo-se disto e com a intenção de reutilizar resíduos agroindustriais na produção de adsorventes, verifica-se a possibilidade de reaproveitamento dos resíduos da industrialização da erva-mate. Este reaproveitamento pode reduzir a extração de recursos naturais e o acúmulo de resíduos no meio ambiente, assim como pode ser uma alternativa econômica e sustentável para produção de adsorventes para o tratamento de efluentes contaminados (Lermen *et al*., 2021). A partir disso, este trabalho pretende produzir amostras de carvão ativado com resíduos da indústria ervateira para a remoção de cromo de efluentes, avaliando a eficiência do carvão ativado produzido e a capacidade de adsorção.

## 1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver o carvão ativado a partir de palitos de erva-mate, ou seja, dar um novo destino aos resíduos da indústria ervateira, na intenção de utilizá-los no desenvolvimento de um adsorvente para a remoção do cromo de efluentes, um metal pesado altamente tóxico.

## 1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão baseados em:

- Desenvolver o carvão ativado a partir dos resíduos de palitos da erva-mate através de processos químicos e físico;
- Caracterizar o carvão ativado desenvolvido, comparando-se com o carvão ativado comercial (CAC);
- Verificar a eficiência do carvão desenvolvido quanto a remoção de Cr (VI) de resíduos de efluentes líquidos, a partir de um efluente sintético.
- Avaliar o melhor modelo de isoterma de adsorção para cada carvão ativado, através dos modelos de Freundlich, Langmuir e BET.

## 1.3 Justificativa

Sabendo-se que o cromo é um dos metais pesados de maior toxicidade para o meio ambiente, já que integra a lista da Agência Ambiental dos EUA (EPA) de 129 poluentes com maior criticidade, é de extrema importância encontrar maneiras de remover este metal da água, considerando-se a sua mobilidade no meio ambiente e seu potencial cancerígeno (Moreira; Bueno, 2019).

Em relação às tecnologias empregadas na recuperação de contaminantes da água, uma das mais comuns é a adsorção, na qual sólidos possuem a capacidade de retirar substâncias solúveis. Os adsorvatos são as moléculas ou íons encontrados em fase aquosa, que podem ser adsorvidos na superfície de um sólido, que é denominado adsorvente. Para tal processo, um dos materiais mais empregados é o carvão ativado, que atua como adsorvente ao remover compostos fenólicos e metais tóxicos da água, contudo seu custo é elevado e existe dificuldade em regenerá-lo (Meurer; Silva, 2019).

Dessa maneira, satisfazendo-se a necessidade de reutilizar os resíduos e a preocupação com o custo do carvão ativado, a busca por adsorventes alternativos, de baixo custo, renováveis e disponíveis, é crescente (Meurer; Silva, 2019). Justifica-se, portanto, a importância deste trabalho através da produção de um carvão ativado capaz de remover o cromo de efluentes líquidos, metal que está presente em diversas indústrias, transformando os resíduos agroindustriais de ervateiras, que neste caso são os palitos de erva-mate, em matérias-primas.

# 2 REVISÃO TEÓRICA

## 2.1 Problemas ambientais

O padrão industrial observado em países da Europa, nos Estados Unidos e no Japão, levou cerca de dez anos para atingir o mesmo patamar no Brasil. Apesar da economia em ascensão e a transformação dos segmentos da indústria entre os anos de 1950 e 1980, a preocupação com a poluição e a situação do meio ambiente iniciou somente na década de 70, após diversos problemas de saúde associados a atividades de polos industriais (Ganem, 2015).

Um dos principais problemas da indústria é, sem dúvida, a chance de ocorrer algum desastre ambiental, seja por lançamento de gases, contaminação por efluentes líquidos e por resíduos sólidos, que é intensificada em locais com baixa preocupação ambiental (Ganem, 2015). No intuito de reduzir esses problemas ambientais, os métodos de prevenção à poluição e a Produção Mais Limpa (PML) surgem para atingir o desenvolvimento sustentável, já que pequenas alterações nos postos operacionais podem trazer benefícios tanto para a indústria, como para o meio ambiente (Costa; Oliveira, 2018).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), em 2020 foram gerados cerca de 41,676 milhões de kg de resíduos provenientes de processos industriais, considerados perigosos. Destes, 41,281 milhões de kg receberam destino correto. Em relação ao volume gerado, os resíduos líquidos atingiram 6,128 milhões de litros, sendo que 6,061 milhões de litros

receberam métodos de tratamento ou um destino final. Em relação aos resíduos da Classe II, ou seja, os não perigosos, no mesmo ano foram gerados 1,866 bilhão de kg e 1,860 bilhão de kg receberam o destino adequado. Já o volume gerado de líquidos industriais não perigosos atingiu 85,3 mil litros e, conforme o SINIR, todo o volume recebeu tratamento correto (SINIR, 2020).

Quando se trata de poluição atmosférica, verifica-se a intensificação da queima de combustíveis, como o carvão mineral e o petróleo, para a geração de energia e o processamento de matérias-primas durante o século XX, devido à Revolução Industrial. Além da geração de energia, os setores de base que envolvem siderúrgicas, fábricas de cimento, vidro e indústrias químicas provocaram as maiores emissões de poluentes no decorrer do século XX (Silva; Vieira, 2017).

A poluição atmosférica é proveniente das modificações da urbanização das cidades, que elevou a concentração e emissão de poluentes, causando diversos problemas socioambientais. A qualidade do ar e a poluição atmosférica estão relacionadas sobretudo a materiais particulados em suspensão na atmosfera, o que determina o patamar de poluição com base na intensidade, concentração e disponibilidade das substâncias. No geral, estes particulados são poluentes que possuem algum tipo de periculosidade para a saúde humana e que são compostos por material sólido ou líquido, mas capazes de permanecer em suspensão e causar poluição atmosférica. A origem destes materiais particulados atmosféricos pode estar relacionada ao progresso de ações antrópicas, tais como a queima de combustíveis fósseis, contudo podem ser de origem natural, gerada pela suspensão de partículas presentes no solo com a ação do vento (Oliveira; Sousa; Oliveira, 2020).

Os eventos críticos de poluição do ar têm como causa diversos fatores, entre eles a densidade industrial, as condições climáticas e a topografia da localidade, e ocorrem sobretudo em regiões com baixas altitudes ou vales. Através destes eventos, a qualidade de vida e a saúde da população podem ser afetadas de forma drástica em curto espaço de tempo, tendo como principal fonte a quantidade excessiva de emissões de gases e as partículas poluentes. Partindo da preocupação com eventos críticos em locais específicos, nos últimos anos as lideranças mundiais

preocupam-se e alertam a comunidade científica sobre as alterações climáticas e sobre o aquecimento global, com aumento de temperatura de cerca de 0,6 ºC no século XX (Silva; Vieira, 2017).

Quanto aos recursos hídricos, diversas indústrias contribuem para a poluição destes e entre as mais poluidoras encontram-se os curtumes, que geram alta quantidade de resíduos sólidos e efluentes com alto teor de compostos químicos danosos, resultantes dos processos de beneficiamento de peles e couros. Nos curtumes são utilizados equipamentos com elevada capacidade de produção, que necessitam de alto volume de água e energia elétrica, gerando efluentes líquidos com residuais tóxicos, que exigem tratamentos adequados para minimizar os impactos no meio ambiente (Santos; Araújo, 2020).

Neste contexto, é necessário que haja um controle rigoroso dos impactos ambientais causados pelo aumento da poluição, do descarte de resíduos industriais, do desequilíbrio da natureza e pela diminuição dos recursos naturais. Dessa maneira, a poluição gerada por atividades industriais possui grande capacidade de causar danos ao meio ambiente, assim como para a saúde humana (Costa; Oliveira, 2018).

## 2.2 Resíduos líquidos industriais

As interferências humanas têm gerado o comprometimento da qualidade de recursos hídricos, seja por efluentes domésticos e industriais sem tratamento ou pelo uso de substâncias químicas na agropecuária. É na água que diversos processos metabólicos ocorrem, porém é necessário que ela seja pura. Diversas alterações químicas podem afetar o organismo humano, contudo, por ser um solvente universal, são numerosas as substâncias às quais a água pode se associar, inclusive com aquelas que a contaminam (Moreira; Bueno, 2019).

Os resíduos industriais incluem uma variedade de materiais provenientes de processos produtivos que geram resíduos caracterizados como perigosos, que são

considerados aqueles que apresentam inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, além dos resíduos não perigosos. Dentre estes resíduos, estão inclusos poluentes orgânicos persistentes como aldrina, dieldrina, dioxinas, endrina e também os metais pesados, como o cromo (Cr) e o chumbo (Pb) (Pereira, 2019).

A contaminação dos corpos de água e do solo causada pelo lançamento inadequado de efluentes industriais, passou a ser tema de preocupação da sociedade, de órgãos de saneamento e de fiscalização ambiental. Nestes efluentes, podem estar presentes metais pesados, os quais incluem o cromo, o chumbo, o cádmio, o níquel, o mercúrio, o zinco e o cobre, que são considerados altamente tóxicos, bioacumulativos e não biodegradáveis. Dessa maneira, ao serem lançados ao meio ambiente sem o tratamento adequado, podem gerar graves consequências para a saúde dos seres vivos (Ries; Silveira, 2019). Além disso, os metais pesados e alguns componentes químicos, são capazes de causar efeito tóxico em animais e plantas, já que podem se acumular nos organismos e provocar problemas de saúde nas pessoas consumidoras, quando em excesso (Barbosa, I. 2017).

Um dos metais pesados que vem recebendo maior atenção devido à elevada toxicidade é o cromo. Esse metal existe em variadas formas de estado de oxidação, porém o Cr (III) e o Cr (VI) são as formas de maior estabilidade e predominância. Na forma trivalente, atua no controle da glicose e dos lipídios no organismo de mamíferos e é essencial para os seres vivos. Contudo, na forma hexavalente, é considerado pela *Environmental Protection Agency* (EPA) um dos poluentes ambientais mais tóxicos, com alto poder cancerígeno e mutagênico (Ries; Silveira, 2019). Assim, na forma trivalente é menos tóxico em condições ácidas e redutoras e na forma hexavalente está presente em condições alcalinas e oxidantes, sendo que este possui uma forma mais móvel e com maior toxicidade, é altamente solúvel, biologicamente reativo e caracterizado como genotóxico, ou seja, tem capacidade de alterar material genético de organismos, podendo ser letal (Santos, 2021).

Este metal (cromo) possui elevada aplicabilidade em diversos processos industriais, como na indústria de eletrônicos para tratamento anticorrosivo, em peças com banho de zinco, painéis de circuitos integrados e para blindagem elétrica de

componentes. Ademais, pode ser utilizado em cromados, na fabricação de pigmentos e corantes e também em escurecimento de peles e preservação de madeiras. Este metal é resistente a ácidos como ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) a temperatura ambiente, o que leva o interesse do seu uso na galvanoplastia, no revestimento de maçanetas de portas até estruturas metálicas através do processo de eletrodeposição. Ainda, pode ser aplicado em ligas metálicas com ferro e níquel, o que gera produtos altamente resistentes à corrosão (Moreira; Bueno, 2019). Entre os diversos processos nos quais o cromo está presente, destaca-se o curtimento de peles com sais de cromo, que podem ocasionar risco alto de contaminação ambiental, justamente pelo teor residual presente nos banhos, apesar de oportunizar melhora em técnicas de reciclagem e tratamento, sabendo-se que é possível reutilizar a água e o cromo nos processos (Barbosa, I. 2017).

Como os sais de cromo utilizados em larga escala nos curtumes para conceder resistência, flexibilidade e maciez ao couro, são considerados como perigosos, ou seja, esses resíduos compõem a Classe I, de acordo com a legislação ambiental. Assim, as indústrias calçadistas, que geram alta quantidade de resíduos por dia, possuem dificuldade em reciclar ou reutilizar seus resíduos, visto que são constituída de retalhos de couro (Soares; Araújo, 2016).

A cada 250 kg de couro produzidos, geram-se 730 kg de resíduos sólidos e 40 m³ de efluentes líquidos. Em ambos os resíduos, cerca de 4 e 6 kg de cromo estão presentes, respectivamente. Na produção do couro curtido são utilizados de 80 a 90% de sulfato de cromo III hidratado ($Cr_2(SO_4)_3$. $nH_2O$), devido a interações com grupos carboxilas presentes no couro, que dão propriedades colágenas ao mesmo tempo que tornam o produto não biodegradável e tóxico para microrganismos (Jeronimo *et al.*, 2019).

Em países produtores de couro, o tratamento de efluentes gera discussões acerca do controle de poluição, devido a presença de componentes com alta toxicidade para diversos microrganismos de processos biológicos. No Brasil, as tecnologias inviáveis de processamento e a falta de recursos para a depuração de

efluentes, demonstram o cenário dos curtumes brasileiros, com falta de controle adequado de efluentes líquidos (Barbosa, I. 2017).

### 2.2.1 Indústrias e legislação brasileira

Para lançar ao meio ambiente ou reutilizar os efluentes, há padrões e normas dispostas por legislações e resoluções, a fim de evitar a contaminação de solos, de recursos hídricos e da atmosfera. A nível nacional, existe a Resolução nº 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que define os parâmetros de lançamento nos corpos de água (CONAMA, 2011).

Especificamente no estado do Rio Grande do Sul, o Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) estabeleceu a Resolução 355/2017, que tem como objetivo determinar os Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos em águas superficiais (CONSEMA, 2017). Já a Resolução nº 334/2016 do CONSEMA é responsável por estabelecer o padrão de emissão de toxicidade de efluentes líquidos despejados nas águas superficiais do Estado (CONSEMA, 2016).

Quanto ao cromo, as características de alta solubilidade e a facilidade de interconversão, são motivos para que os órgãos ambientais estabeleçam limites para ambas espécies químicas desse elemento (Ries; Silveira, 2019). No Brasil, de acordo com a Resolução 430 de 2011 do CONAMA, os parâmetros de lançamento de efluentes de indústrias em recursos hídricos, com o intuito de evitar a contaminação dos ecossistemas e minimizar os impactos desse metal pesado, foram fixados em 1,0 mg/L para Cr (III) e 0,1 mg/L para Cr (VI) (CONAMA, 2011).

O estado do Rio Grande do Sul possui uma legislação mais restritiva acerca do cromo, em comparação com o restante do país. Sendo assim, em relação ao lançamento de efluentes com a presença de cromo, o CONSEMA, através da Resolução número 355/2017, definiu que os efluentes podem ser lançados em águas superficiais, caso atendam ao padrão de emissão de cromo hexavalente, definido como 0,1 mg/L e 0,5 mg/L para cromo total (CONSEMA, 2017).

Para atender a estas exigências, cabe ao ramo empresarial o equilíbrio entre a sustentabilidade, as dimensões econômicas, ambientais e sociais. Assim, aumentam as possibilidades de alinhar a gestão ambiental à competitividade e desempenho, agregando valor à organização, aumentando a credibilidade social e ambiental (Santos; Araújo, 2020).

## 2.3 Resíduos sólidos industriais

O volume de resíduos sólidos vem crescendo de forma avançada, ultrapassando o crescimento da população. Estes resíduos podem ser fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE) quando depositados em áreas inadequadas para este fim, além da disposição em aterros sanitários e lixões. A liberação destes gases ocorre pela decomposição de matéria-orgânica, misturada a variadas substâncias, o que colabora com o agravamento do efeito estufa (Figueiredo; Nascimento, 2021). Ademais, as áreas subterrâneas e aquosas podem ser contaminadas por lixões e depósitos de resíduos de maneira inadequada, gerando uma das formas de passivo ambiental, que retrata o impacto no meio ambiente (Pereira, 2019).

Conforme descrito pela Lei nº 12.305 de 2010, relacionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos são objetos, substâncias ou materiais decorrentes de atividades humanas, que não permitem o lançamento em redes públicas de esgoto ou cursos de água (Brasil, 2010). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de forma específica a NBR 10.004/2004, classifica os tipos de resíduos sólidos produzidos conforme as suas propriedades, da seguinte maneira: Resíduos Classe I: perigosos; Resíduos Classe II: não perigosos; Resíduos de Classe IIA: não inertes e Resíduos Classe IIB: inertes (ABNT, 2004).

De acordo com Pereira (2019), os resíduos sólidos incluem tanto residuais hospitalares quanto agrícolas, de atividades minerárias, além daqueles que são coletados por serviços de limpeza pública e podem ser valorados. Com a PNRS, primeiramente é necessário que ocorra o gerenciamento de resíduos sólidos como

fontes de renda, geração de valor, para então ser considerada a disposição final dos rejeitos (Pereira, 2019). Diante disso, a gestão adequada de resíduos, como a separação na origem e a coleta seletiva, podem ser fatores importantes para efetivar processos tecnológicos de tratamento mecânico pela reciclagem, contendo a contaminação de materiais por outros compostos presentes nos resíduos, aumentando índices de reciclagem que reduzem os impactos ambientais e geram economia de energia (Figueiredo; Nascimento, 2021).

Devido aos inúmeros resíduos agroindustriais gerados atualmente, crescem os estudos e a valorização destes resíduos, dado a alta disponibilidade, o baixo custo e ao fato de que podem tornar-se um risco ao solo e à água caso não sejam manejados corretamente. Assim, destinar de forma sustentável e reutilizá-los para produção de outros materiais, pode ser uma alternativa para reduzir os custos dos processos de adsorção e também do tratamento de efluentes (Lermen *et al*., 2021).

Em especial os resíduos agroindustriais, como por exemplo madeira, folhas, galhos de árvores, mostram-se latentes agentes na forma de adsorventes de vários poluentes. Dessa maneira, esses resíduos podem ser uma fonte para a produção de carvão ativado, devido a durabilidade e ao baixo teor de cinzas, e podem ser uma alternativa para tratamento de água e efluentes (Grangé; Holz; Damin, 2016).

## 2.4 *Biochar*

Um dos materiais mais comuns para o tratamento de água é o carvão ativado, o qual pode estar na forma granular ou em pó, sendo que existem outros materiais adsorventes disponíveis, como o hidróxido férrico granular, a alumina ativada e o zeólito. Uma das principais características dos adsorventes é o elevado grau de porosidade, o que aumenta a área superficial interior onde irá ocorrer a adsorção (Howe *et al.*, 2017).

Considerando-se a elevada capacidade de capturar moléculas através de interações físicas ou químicas e na remoção de contaminantes, o carvão ativado é

um dos adsorventes mais utilizados em meios aquosos, sendo capaz de descontaminar efluentes e reduzir o material orgânico, principalmente aqueles que alteram a cor dos efluentes. Há diversos materiais que podem ser utilizados para a produção do carvão ativado, tendo como pressuposto a elevada concentração de carbono na estrutura. Estes materiais são calcinados e enriquecidos a partir da temperatura, porém sem fusão, que impede a formação dos microporos (Santos, 2021).

Considerando-se o tratamento de água, a biossorção pode ser um método capaz de superar as atuais técnicas já empregadas. Este método consiste na utilização de resíduos agroindustriais na forma de adsorventes, para a remoção de metais pesados, isto é, um bioadsorvente, ou também através de microrganismos vivos ou mortos (bactérias, fungos, leveduras) (Barros; Carvalho; Ribeiro, 2017).

*Biochar,* material utilizado na biossorção, é definido como matéria orgânica carbonizada e, conforme o *Biochar International Initiative*, como “um material sólido obtido da conversão termoquímica de biomassa em um ambiente limitado de oxigênio”. Esse material, de forma sólida, pode ser produzido por secagem, por carbonização, pirólise ou gaseificação de biomassa, e na forma de pasta, pela carbonização hidrotérmica de biomassa sob pressão (Qian *et al*., 2015).

O biocarvão (*biochar*) pode ser desenvolvido através de diversos materiais, seja a partir de resíduos lignocelulósicos ou diferentes biomassas e possui variadas aplicações comerciais, devido ao seu preço baixo e a facilidade de sintetização. Este material possui elevada área superficial, que pode alcançar maior capacidade de armazenamento de energia, sobretudo pela maior quantidade de sítios eletroquímicos ativos (Jerez *et al*., 2023). Apesar do *biochar* proveniente de fontes lenhosas ser produzido e utilizado durante milhares de anos, os fenômenos que ocorrem durante o processo de produção ainda não são totalmente compreendidos, dados a sua complexidade (Weber; Quicker, 2018). Em contrapartida, uma das matérias-primas para o *biochar* podem ser os resíduos agroindustriais, que são compostos sobretudo de lignina e celulose, além de água, hemicelulose, lipídios, açúcares, hidrocarbonetos e amido. Também estão presentes em biomassas residuais grupos funcionais como os fenólicos, carbonil, álcoois, ésteres, entre

outros, que são essenciais para a fixação do elemento a ser adsorvido (Oliveira; Alfaya, 2018).

Um dos processos pelos quais o *biochar* pode ser produzido, é através do processo de pirólise, caracterizada em lenta e rápida, dependendo da taxa de aquecimento e do tempo de residência. Também denominada de carbonização convencional, a pirólise lenta é capaz de gerar biocarvão pelo aquecimento da biomassa com longa residência de tempo (até dias) e taxa de aquecimento baixa, e por muito tempo este método foi um dos mais utilizados, sendo o que mais contribui na produção deste material. Em contrapartida, o método de pirólise rápida produz *biochar* utilizando alta taxa de aquecimento (acima de 200 K/min) e curto tempo de residência (menos de 10 s). Comparando-se o custo de produção de materiais petroquímicos ou demais processos químicos, o *biochar* apresenta um processo barato, sustentável e de fácil produção, possibilitando o desenvolvimento de materiais com extensas aplicações a baixo custo (Qian *et al*., 2015).

A típica temperatura de pirólise lenta é em torno de 500 ºC, entretanto depende das propriedades desejadas do produto. Para um alto teor de carbono, com mais de 95%, requer temperaturas próximas a 1000 ºC, o que é possível alcançar com matérias-primas lenhosas, porém não são adequadas para resíduos agrícolas ou compostos com baixas temperaturas de fusão de cinzas (Weber; Quicker, 2018).

Conforme Wang e Wang (2019), diversas vantagens podem ser citadas em relação ao *biochar*, como o rico teor de carbono, a elevada capacidade de troca catiônica, a área de superfície extensa e a estrutura estável. A técnica de adsorção utiliza-se do *biochar* para remover metais pesados e poluentes orgânicos, sendo que essa capacidade de adsorção está relacionada a propriedades físico-químicas, como a distribuição do tamanho dos poros, grupos funcionais e a eficiente troca iônica, que variam de acordo com as circunstâncias de preparo do biocarvão. Além de ser utilizado para remover poluentes orgânicos e metais pesados, o *biochar* pode ser empregado no controle de acidez do solo, para o aumento de troca catiônica e para a fertilidade do solo.

No caso do cromo, o pH da solução aquosa gera elevada interferência na adsorção, visto que influencia na carga superficial do *biochar.* Dessa maneira, o pH

desempenha um papel importante na seleção do valor ótimo nos estudos de adsorção, determinando com qual facilidade o substrato adsorve íons que são potencialmente prejudiciais (Herrera, 2021).

Durante a produção do biocarvão, o aumento de teor relativo de carbono fixo do sólido ocorre pela evaporação da água e a liberação de voláteis. A solidez do carvão pode ser aumentada pela formação de carbonização secundária, causada pela polimerização de compostos orgânicos em vapores e gases. Em um processo tradicional de produção de carvão vegetal (carvoaria), podem ser necessárias várias semanas até que a carbonização seja completa (Weber; Quicker, 2018). Verifica-se que o *biochar* produzido a elevada temperatura, possui maior área superficial e alto teor de carbono, principalmente devido ao aumento do volume de microporos relacionado com a remoção de compostos orgânicos voláteis. Contudo, os rendimentos de biocarvão decaem com o aumento da temperatura, sendo necessário ótimas estratégias de controle (Wang; Wang, 2019).

O rendimento da biomassa está relacionado também às estabilidades térmicas e a composição de celulose, hemicelulose e lignina da matéria-prima utilizada. Assim, todas as propriedades do *biochar* resultam das características da matéria-prima e das condições empregadas durante o processo de carbonização, que podem ser modificadas e selecionadas para alcançar as propriedades desejadas (Weber; Quicker, 2018).

Já o processo de ativação do carbono, pode ser realizado através de uma ou duas etapas, podendo ser ativado por ativação física, utilizando-se $H_2O$ e $CO_2$, ou por ativação química usando KOH, $ZnCl_2$, $H_3PO_4$ entre outros compostos. A ativação química com KOH através do método de duas etapas é um dos mais utilizados, em aplicações de armazenamento de energia, gerando melhores rendimentos de carvões com maior área superficial, com distribuição regular dos poros e a melhora do armazenamento de camada dupla com a proporção adequada de micro e mesoporos (Jerez *et al*., 2023).

### 2.4.1 Erva-mate e o biocarvão

A biossorção é classificada como de baixo custo, considerando-se as condições de abundância na natureza, o pouco ou nenhum tratamento necessário e o tipo de material utilizado, que pode ser um resíduo ou subproduto de indústrias. Entretanto, um dos desafios da técnica da biossorção é determinar o biossorvente adequado para o metal pesado presente na água e a forma de melhorar o rendimento, combinando técnicas físicas, químicas ou biológicas. Ademais, é necessário selecionar a biomassa adequada proveniente dos resíduos agroindustriais amplos e variados, de baixo custo. Assim, apenas materiais biológicos com elevada capacidade de realizar a ligação com metais pesados, podem ser utilizados para biossorção em grande escala (Barros; Carvalho; Ribeiro, 2017).

Para a produção do biocarvão que pode ser empregado no tratamento de efluentes, é possível utilizar qualquer material de origem carbonáceo, sendo que no Brasil os resíduos agroindustriais mais utilizados são de origem vegetal, como madeiras de pinus, acácia e cascas de coco. Em especial no Rio Grande do Sul, considerando-se o elevado consumo da erva-mate para o chimarrão, estudos investigativos têm sido realizados sobre o uso dos resíduos provenientes da erva-mate na produção de biocarvão (Grangé; Holz; Damin, 2016).

A erva-mate (*Ilex paraguariensis Saint Hilaire*), um dos chás mais consumidos na região sul do Brasil, no Paraguai, no Uruguai e na Argentina, gera alta quantidade de resíduos agroindustriais, devido à produção e ao alto consumo do chimarrão, como é conhecido no Rio Grande do Sul (Meurer; Silva, 2019). Conforme dados da Tabela do Sistema do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de Recuperação Automática (Sidra), a região sul é a maior produtora de erva-mate do Brasil, já que no ano de 2021 em todo país foram produzidas 557.987 toneladas, sendo 556.891 toneladas produzidas no sul. Ademais, cabe ressaltar que dentre os estados produtores de erva-mate do sul, destacam-se o Rio Grande do Sul e o Paraná (IBGE, 2023).

A erva-mate possui propriedades estimulantes do sistema nervoso central, pois apresenta cafeína e teobromina em sua composição, além de propriedades antioxidantes, como ácidos fenólicos. Além disso, é composta por polifenóis, flavonoides, triterpenos, água, celulose, lignina, glicose, pentose, aminoácidos e substâncias graxas. Já as folhas, possuem alto teor de nitrogênio, cálcio, magnésio, ferro, manganês, cobre e zinco, e têm maior quantidade de sais minerais comparadas às hastes (Oliveira, 2018).

São três processos pelos quais a erva-mate passa na indústria: sapeco, secagem e cancheamento. O primeiro processo (sapeco), utiliza o fogo com a intenção de retirar a umidade nas folhas, a partir da madeira de eucalipto, evitando que adquira sabor. Durante a secagem, a etapa mais longa, a erva-mate passa por uma esteira para separar as folhas dos palitos. As folhas são encaminhadas para a etapa de cancheamento, em que ocorre a trituração e os palitos são adicionados à erva-mate destinada ao chimarrão, ao tererê e aos chás (Bortuluzzi, 2019).

Durante a industrialização da erva-mate, os resíduos gerados correspondem a cerca de 2% da produção em massa, gerando aproximadamente 10.000 toneladas por ano (Gonçalves *et al.*, 2007). Os palitos de erva-mate, derivados das etapas de secagem e cancheamento das folhas, destacam-se no reaproveitamento na forma de adsorventes de contaminantes, como ocorre na remoção de corantes de curtumes, em soluções aquosas. Todavia, este resíduo é utilizado também para geração de energia em caldeiras industriais ou na forma de adubo orgânico. Dessa forma, a produção da erva-mate e o aumento de resíduos desse ramo de indústria iniciou com o crescimento industrial e o aumento da população (Grangé; Holz; Damin, 2016).

É importante destacar que a capacidade de um bioadsorvente depende de vários fatores, como o tipo de biossorvente (espécie, idade), o sorbato, a presença de demais íons metálicos concorrentes e a forma de preparo da biomassa, além de fatores físico-químicos os quais incluem temperatura, pH e concentração iônica (Veit *et al.,* 2014). Diante disso, é necessário manter o controle e otimizar as variáveis de forma que permitam taxas mais altas de remoção por biossorção (Jeronimo *et al.*, 2019). Já para garantir a eficiência do processo adsortivo, é essencial o estudo da

cinética, que fornece informações acerca do mecanismo envolvido na adsorção (Veit *et al.,* 2014).

Para definir os adsorventes adequados ao processo e também para avaliar a capacidade de adsorção dos sólidos adsorventes são utilizados dados termodinâmicos. Assim, considerando-se que existem diversos modelos de isotermas que podem ser utilizados para determinar o equilíbrio da operação adsortiva, a escolha de um modelo específico depende de fatores como a concentração do soluto na solução e a explicação acerca da adsorção através do modelo adotado (Tadini *et al*., 2019).

Entre os modelos mais utilizados para a adsorção entre líquido e sólido, estão os modelos e equações de Langmuir e Freundlich. O modelo de Langmuir é mais favorável para representar adsorção em que existe um número definido de sítios e que possuem energia somente para adsorver uma molécula, sendo que as moléculas que são adsorvidas não interagem entre si, configurando adsorção em monocamada. O modelo de Freundlich, por sua vez, não necessita da formação de monocamada e estima que o valor da capacidade de adsorção (qe) pode aumentar proporcionalmente ao aumento da concentração de adsorvente, contudo o modelo não é adequado para valores elevados de concentração de adsorvato (Silva *et al*., 2020).

Em relação ao modelo de BET, de acordo com Nascimento *et al*. (2014), ressalta-se que é uma extensão do modelo de Langmuir, que considera a formação de uma ou mais camadas sobre a superfície, envolvendo forças de Van der Waals, permitindo a formação de multicamadas. Este modelo indica a presença de superfícies não porosas ou macroporosas nos sólidos, e o ponto de inflexão do gráfico obtido ocorre quando a primeira camada de cobertura estiver coberta. De acordo com o aumento da pressão relativa, formam-se camadas até que seja atingido o ponto de saturação, em que o número de camadas torna-se infinito (Tadini *et al*., 2019).

### 2.4.2 Aplicações dos resíduos e dos palitos de erva-mate

Considerando-se o contexto da redução do aquecimento global e da diminuição da poluição ambiental, há diversos pontos positivos na prática de reutilização de resíduos agroindustriais, como a redução dos custos, o preço baixo do produto final e a disponibilidade ilimitada, além da capacidade de geração de energia, após a vida útil. Dessa maneira, a utilização de materiais lignocelulósicos pode agregar valor aos produtos, por exemplo quando ocorre a substituição de fibras sintéticas por fibras naturais, incentivando o desenvolvimento de produtos sustentáveis. De encontro a esse reaproveitamento dos resíduos, encontram-se os resíduos agroindustriais da erva-mate, que possuem um papel fundamental na redução de poluição ambiental, e são compostos sobretudo por hemicelulose, lignina, ceras, pectinas, entre outros componentes. Ainda, cabe ressaltar que os palitos de erva-mate são compostos por 34,85% de α-celulose, 24,77% de hemicelulose, 25,78% de lignina, 10,11% de extrativos e 4,49% de cinzas (Borsoi *et al*., 2021).

Quanto à utilização dos resíduos de erva-mate, estes podem ser aplicados em biocompósitos fúngicos, que consiste em inocular os resíduos numa espécie fúngica selecionada em uma moldeira por alguns dias, até que haja a colonização completa (Rocha *et al.*, 2020). Outra aplicação encontra-se como matéria-prima para a produção de briquetes, que objetiva gerar energia limpa através da substituição da lenha de forma vantajosa. Dessa maneira, a quantidade de resíduos é reduzida, ao mesmo tempo que otimiza processos de geração de energia (Bortuluzzi, 2019).

Ademais, os palitos de erva-mate podem ser utilizados como reforço em compósitos termoplásticos de matriz polimérica, de polipropileno. Devido às propriedades antioxidantes da erva-mate, a fibra vegetal deste composto torna-se uma alternativa para redução da passagem de oxigênio nas embalagens flexíveis ou termoformadas e é capaz de evitar a rancificação de produtos gordurosos (Casagranda, 2019). Os resíduos da erva-mate também podem ser utilizados como potencial de produção anaeróbica de biogás na otimização da metanização da biomassa. Através da valorização destes resíduos, podem ser reduzidos os gases

de efeito estufa (GEE) (Penteado *et al.*, 2021).

Estes resíduos também podem ser aplicados na confecção de painéis com o uso de resíduos agrícolas, como alternativa ecologicamente correta para o setor tecnológico do setor de painéis, com propriedades semelhantes às dos produtos tradicionais. A utilização dos resíduos agrega valor aos compósitos, sem prejuízos à qualidade do produto. Assim, a incorporação dos materiais lignocelulósicos em escala industrial gera redução de custos de matéria-prima e complementa o uso da madeira, com mesclas de materiais lignocelulósicos (Souza *et al.*, 2019).

Em relação ao tratamento de água, estudos comprovam que o carvão ativado produzido através de palito de erva-mate pode ser um adsorvente satisfatório para contaminantes orgânicos em meio aquoso (Veit *et al.*, 2014). De acordo com Werlang *et al.* (2013), a utilização de resíduo de erva-mate como matéria-prima para o carvão ativado, mostrou-se efetivo na remoção de três efluentes distintos, sendo estes compostos por corante vermelho reativo, por corante azul de metileno e por herbicida atrazina. Os materiais adsorventes obtidos apresentaram elevada área superficial específica, com quantidade significativa de microporos e eficiência adequada de remoção dos poluentes, em especial do azul de metileno.

# 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

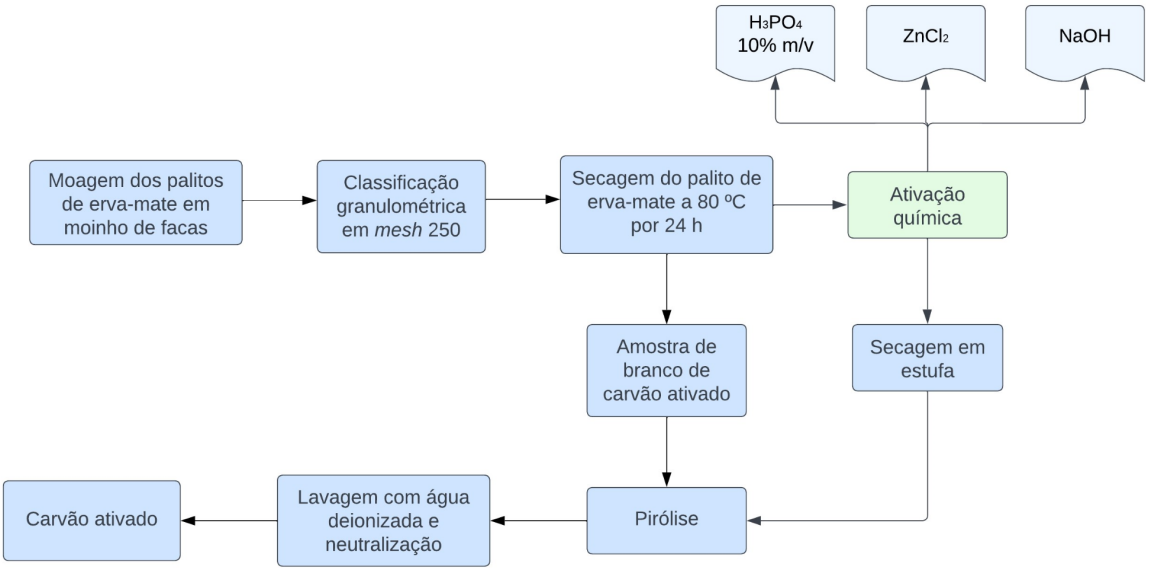
## 3.1 Materiais

As soluções utilizadas neste presente estudo foram preparadas utilizando-se água destilada e os reagentes de grau analítico, sendo estes: ácido clorídrico (HCl) (Química Moderna), ácido fosfórico 85% P.A ($H_3PO_4$) (Nuclear), cloreto de zinco ($ZnCl_2$) (Inlab Confiança), hidróxido de sódio (NaOH) (Qhemis), ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) (Química Moderna), dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) (Química Moderna) e acetona ($C_3H_6O$) (Química Moderna), além do indicador 1,5-difenilcarbazida ($C_{13}H_{14}N_4O$) (Sigma-Aldrich). Os palitos de erva-mate para a produção do carvão ativado foram fornecidos pela ervateira Elacy, localizada em Venâncio Aires, no Rio Grande do Sul. Também foi utilizado carvão ativado comercial em pó (Synth).

## 3.2 Método

Para desenvolver o carvão ativado a partir de resíduos de erva-mate, elaborou-se um fluxograma, que pode ser observado de forma simplificada na Figura 1. Nele, estão representadas as etapas, os reagentes que foram utilizados para a ativação química e a etapa de ativação física (pirólise) da amostra de branco de carvão ativado e das demais ativadas quimicamente.

Figura 1 - Fluxograma simplificado da obtenção do carvão ativado a partir de palitos de erva-mate.




Fonte: Da autora (2023).

### 3.2.1 Obtenção do carvão ativado

Para realizar o preparo do carvão ativado a partir dos palitos de erva-mate, foi adaptada a metodologia de Meurer e Silva (2019). Assim, primeiramente, foi necessário realizar a moagem dos palitos em moinho de facas (TE 361, Tecnal), e em seguida classificar as partículas através da classificação granulométrica com peneiras vibratórias (Ber Tel), com 9 vibrações por 11 minutos, utilizando-se o material retido na peneira de 250 *mesh,* após passar pelas peneiras de 150, 170 e 200 *mesh*, devido a disponibilidade de amostra moída. Em seguida, o material foi seco em estufa (DeLeo TLK 40), durante 24 h a 80 ºC e, ao final desse período, manteve-se o material em dessecador, até a utilização.

Para a obtenção das amostras de carvão ativado, foram realizadas ativações químicas e físicas (pirólise) e todas etapas foram realizadas pesando-se os materiais e reagentes em balança analítica (Bel Engineering). Primeiramente, foi preparada

uma amostra de branco (CAF) com palitos de erva-mate previamente secos em estufa, a 80 ºC, que foi submetida apenas a pirólise em forno mufla, a 700 ºC, por 45 min, com baixo teor de $O_2$, utilizando-se atmosfera inerte de nitrogênio ($N_2$) a 180 mL/min.

Em seguida, foi sintetizada a amostra de carvão ativado denominada $CA_{ZnCl2}$, que foi ativada quimicamente com cloreto de zinco ($ZnCl_2$) (Inlab), numa proporção de 1:1, adaptando-se a metodologia utilizada por Meurer e Silva (2019). Para isso, preparou-se a solução a partir da dissolução de 33,34 g de $ZnCl_2$ em água, utilizando-se balão volumétrico de 100 mL e utilizou-se 85,5 mL dessa solução, com 28,5 g de palitos de erva-mate previamente secos, agitando-se de forma manual a mistura com auxílio de um bastão de vidro durante 5 min, em temperatura ambiente de 25 ºC. Logo, a mistura permaneceu em repouso em temperatura ambiente, durante 24 h. Após, a amostra formada foi disposta em placas de Petri revestidas com filme teflon e seca em estufa a 60 ºC por 24 h. Ao final desse período, a amostra foi mantida em dessecador e encaminhada para a pirólise a 700 ºC em forno mufla (SP Labor SP-1200), por 45 minutos, com taxa de aquecimento de 30 ºC/min, utilizando-se atmosfera com baixo teor de $O_2$, sendo utilizado o fluxo de nitrogênio ($N_2$) a 180 mL/min.

Após a ativação, lavou-se o material obtido com uma solução de HCl 2,5% v/v, para eliminar íons de zinco e desobstruir os poros, a 70 ºC, durante 1 h sob agitação magnética, com auxílio de uma chapa aquecedora (Fisatom). Na próxima etapa, foi realizada lavagem com água deionizada quente (70 °C), com posterior filtração em filtro à vácuo (MA-058, Marconi), até o pH atingir 7. Para finalizar, o carvão ativado obtido foi seco em estufa a 105 ºC por 24 h, e mantido em dessecador para resfriamento até a utilização.

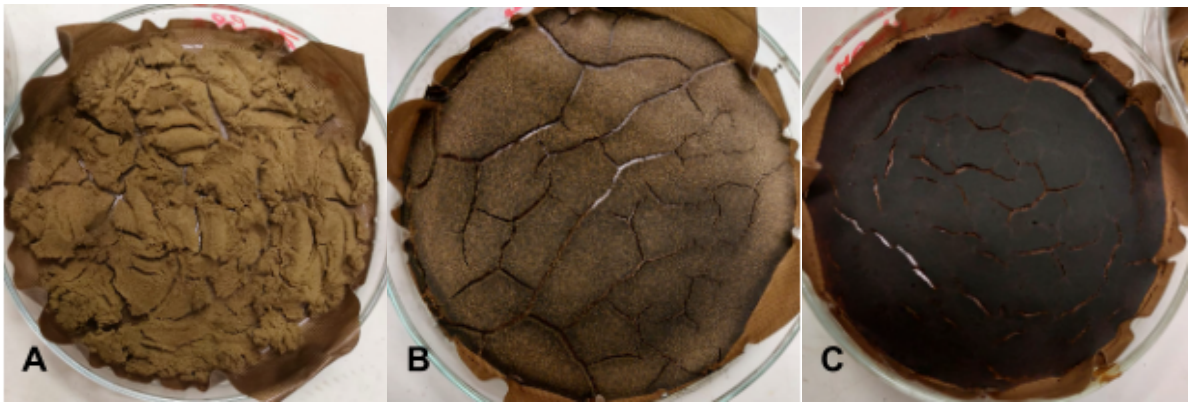
Para obter a segunda amostra de carvão ativado ($CA_{H3PO4}$), a metodologia foi adaptada de Brandão, Queiroz e Silva (2020) e consistiu na utilização de uma solução aquosa de ácido fosfórico ($H_3PO_4$) 10% em massa para ativação do carvão, Assim, foram adicionados 20 g de palitos de erva-mate e 200 mL da solução de ácido fosfórico, ou seja, a razão utilizada para a massa de agente ativante para os palitos de erva-mate foi de 1:1. A suspensão foi mantida sob agitação manual com

auxílio de um bastão de vidro por 5 min a uma temperatura de 25 ºC. Após o repouso de 24 h, a suspensão foi seca em estufa a 60 ºC por 21 h, com posterior ativação física em mufla a 700 ºC, por 45 min, nas mesmas condições da amostra $CA_{ZnCl2}$. Depois da obtenção do material, realizou-se a lavagem do carvão obtido, a partir da solução de NaOH 0,1 mol/L para a neutralização, conforme estudo de Narita (2022). Por fim, foi realizada lavagem com água deionizada quente, a 70 ºC, até que o pH atingisse 7. Para completar esta etapa, o carvão ativado obtido foi seco em estufa a 105 ºC por 24 h, e mantido em dessecador até a utilização.

Já a terceira amostra de carvão ativado ($CA_{NaOH}$), foi ativada quimicamente com hidróxido de sódio (NaOH), conforme a adaptação da metodologia de Brandão, Queiroz e Silva (2020), numa proporção de 1:1 de agente ativante em relação aos palitos de erva-mate. Assim, foram utilizados 20 g de palitos de erva-mate e 20 g de hidróxido de sódio dissolvidos em 100 mL de água deionizada avolumada em balão volumétrico. Depois de ser realizada a mistura, a solução permaneceu sob agitação manual com bastão de vidro durante 5 min, a 25 ºC e foi mantida em repouso. Após 24 h, a mistura foi disposta em bases de placas de Petri revestidas com filme de teflon, e foi seca em estufa a 60 ºC por 21 h e depois foi levada ao dessecador, até a posterior ativação física em forno mufla a 700 ºC, por 45 min, nas mesmas condições anteriores. O material obtido permaneceu em dessecador para resfriamento e posteriormente foi realizada a lavagem com solução contendo ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) 1% m/v de acordo com a metodologia de Narita (2022) e, por fim, foram realizadas sucessivas lavagens com água deionizada quente (70 ºC) até o pH atingir 7. Por fim, o carvão ativado obtido foi seco a 105 ºC por 24 h, e mantido em dessecador até ser utilizado.

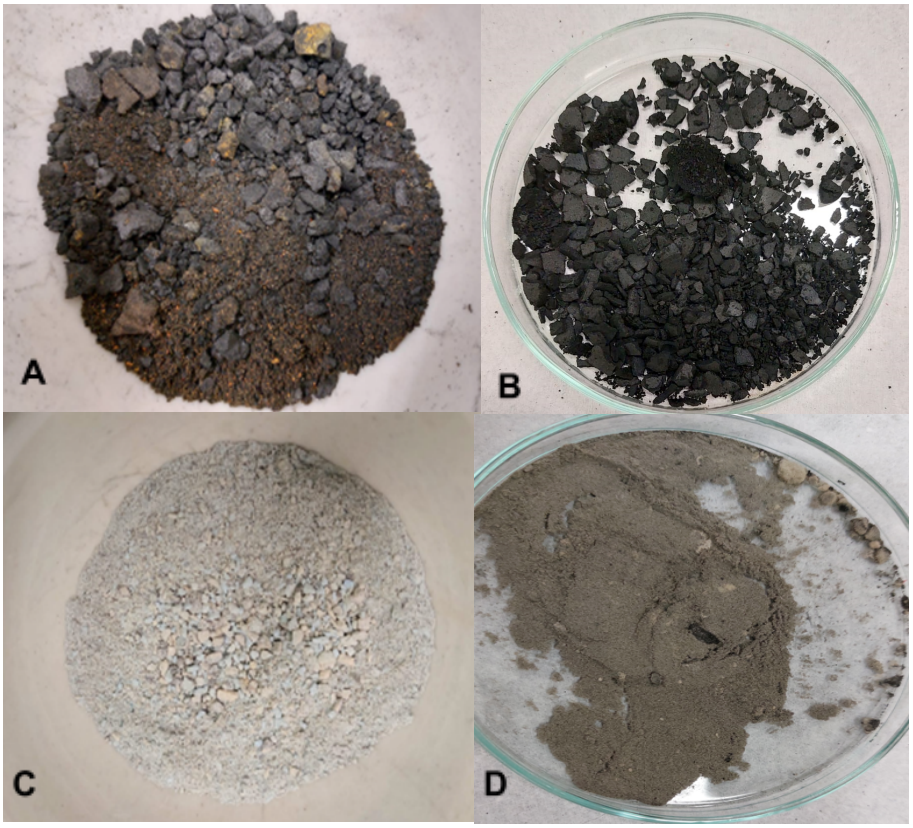
O resultado das amostras após o tratamento químico, pode ser observado na Figura 2 e após o tratamento físico na Figura 3. Além das amostras preparadas, com o objetivo de comparar o desempenho dos diferentes tipos de carvão ativado produzidos a partir dos palitos da erva-mate, foi utilizado o carvão ativado comercial em pó, denominado CAC.

Figura 2 - Amostras após ativação química com $ZnCl_2$ (A), $H_3PO_4$ (B) e NaOH (C).




Fonte: Da autora (2023).

Figura 3 - Amostras após a etapa de pirólise, ativadas com $ZnCl_2$ (A), $H_3PO_4$ (B), NaOH (C) e sem ativação química (D).




Fonte: Da autora (2023).

A Tabela 1 apresenta a identificação e os agentes ativantes utilizados para o desenvolvimento das amostras.

Tabela 1 - Identificação das amostras de carvão ativado produzidas com palitos de erva-mate.

| Amostra | Agente ativante |
|---|---|
| CAF | - |
| $CA_{ZnCl2}$ | $ZnCl_2$ |
| $CA_{H3PO4}$ | $H_3PO_4$ |
| $CA_{NaOH}$ | NaOH |

Fonte: Da autora (2023).

### 3.2.2 Análises de adsorção

Para dar início às análises, primeiramente foram avaliados os aspectos físicos e visuais das amostras obtidas em comparação ao CAC e o rendimento destas, relacionando-se a massa (m) utilizada para ativação química, ou seja, de matéria-prima, e a massa obtida após a etapa de neutralização e secagem. Assim, para avaliar a perda de material, utilizou-se a Equação 1, em que Rc refere-se ao rendimento (Brandão; Queiroz; Silva, 2020).

$$Rc = \left(\frac{m\ final\ do\ carvão\ ativado}{m\ inicial\ de\ matéria-prima}\right) x\ 100 \quad (1)$$

Para estabelecer a massa de carvão ativado a ser utilizada durante as análises de adsorção e o tempo de equilíbrio, realizou-se testes preliminares com CAC, sendo estabelecida a massa de 0,2 g/L e o tempo de 3 min de adsorção, para as análises que não envolveram variação do tempo de equilíbrio.

Para análise dos resultados, elaborou-se a curva de calibração em espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis) (Genesys 10S UV-Vis, Thermo Scientific), utilizando comprimento de onda de 540

nm (Moreira *et al*., 2018). Para isso, foram preparadas soluções utilizando dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) para obter-se as seguintes concentrações de Cr (VI): 1,77, 3,54, 5,31, 7,07, 8,84 e 10,61 mg/L. Para realizar a curva de calibração, diluiu-se as soluções 10 vezes, partindo de 5 mL de cada concentração de dicromato de potássio diluídos em balão volumétrico de 50 mL. Como indicador, foi utilizada uma solução preparada de acordo com a metodologia de Andreis (2011), utilizando-se 1 g de 1,5-difenilcarbazida dissolvido em 200 mL de acetona, sendo a solução armazenada em frasco âmbar, e foram utilizados 2 mL dessa solução para cada 100 mL de solução de dicromato de potássio.

Foi avaliado o desempenho dos adsorventes produzidos a partir da alteração do pH da solução em 2, 4 e 6, sendo que o primeiro valor é comumente constatado em efluentes de galvanoplastia, de acordo com Moreira *et al.* (2018). Já o segundo valor, aproxima-se do pH correspondente ao efluente de curtumes (Jeronimo *et al*., 2019). Portanto, para essa avaliação, foi mantida a concentração de cromo em 1,77 mg/L, a temperatura em 25 ºC e foram utilizados 0,2 g/L de carvão ativado, com agitação magnética constante durante 3 min e a avaliação foi realizada em espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis), com cubetas de plástico. Sabendo-se que o pH da solução é de 5, foi utilizado ácido fosfórico para o ajuste do pH em 2, nas análises em que não ocorreu alteração de pH (Andreis, 2011).

Com o objetivo de analisar a adsorção do Cr (VI) em diferentes soluções a partir de dicromato de potássio, foram estipuladas as concentrações em 1,77, 3,54, 5,31, 7,07, 8,84 e 10,61 mg/L, mantendo-se a concentração de carvão ativado em 0,2 g/L, com agitação magnética constante, durante 3 min, em pH igual a 2, a temperatura ambiente, adaptando-se a metodologia proposta por Moreira *et al*. (2018). De forma imediata, foi realizada a filtração com auxílio de filtro à vácuo e foram realizadas as leituras no espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis) do filtrado, utilizando-se cubetas de material polimérico.

Além dessas análises, verificou-se também os efeitos da variação do tempo de equilíbrio de adsorção com 1, 3, 5, 10, 15 e 30 min, com agitação magnética

constante, mantendo-se o pH em 2, a concentração de Cr (VI) em 1,77 mg/L e a temperatura ambiente. Após a obtenção do filtrado obtido com auxílio de filtro à vácuo, foi realizada a leitura em espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis), em 540 nm, com cubetas de plástico, adaptando-se a metodologia de Moreira *et al*. (2018). Na Tabela 2, podem ser observados os parâmetros utilizados para cada análise de adsorção.

Tabela 2 - Parâmetros empregados para as análises de adsorção, envolvendo pH, tempo de equilíbrio e variação de concentração de Cr (VI).

| Parâmetro | Variação de pH | Variação do tempo de equilíbrio | Variação de concentração de Cr (VI) |
|---|---|---|---|
| pH | 2, 4 e 6 | 2 | 2 |
| Concentração de Cr (VI) | 1,77 mg/L | 1,77 mg/L | 1,77, 3,54, 5,31, 7,07, 8,84 e 10,61 mg/L |
| Tempo de equilíbrio | 3 min | 1, 3, 5, 10, 15 e 30 min | 3 min |

Fonte: Da autora (2023).

Com a intenção de avaliar a concentração restante de Cr (VI) na solução e a quantidade do componente que foi adsorvida utilizou-se a Equação 2 (Bittencourt *et al.,* 2018).

$$qeq = \frac{(Co - Ceq)*V}{m} \quad (2)$$

Nesta equação, $q_{eq}$ corresponde a quantidade de cromo adsorvida por grama de carvão ativado utilizada (mg/g); $C_o$ e $C_{eq}$ equivalem, respectivamente, às concentrações iniciais e no equilíbrio do íon de cromo presente na solução (mg/L); V ao volume em litros (L) da solução e m a massa do carvão em gramas (g).

Já a Equação 3, conforme Meurer e Silva (2019), foi utilizada para calcular o percentual de cromo removido ao final do experimento com o carvão ativado. Nesta equação, Co representa a concentração inicial de cromo, Ce a concentração final

residual (ambos expressos em mg/L) e % Remoção o percentual de cromo removido da solução.

$$\% \, Remoção = \left(\frac{Ci - Ce}{Ci}\right) x \, 100 \quad (3)$$

### 3.2.3 Isotermas de adsorção

Para analisar os resultados, foram analisados três tipos de isotermas. Para avaliar o modelo de Freundlich, foi utilizada a Equação 4, desenvolvida em 1906 (Geremias *et al*., 2023). Essa equação pode ser linearizada, de acordo com o que demonstra Morais *et al.* (2019), aplicando-se o logaritmo nos dois termos.

$$qe = Kf * Ce^{1/n} \quad (4)$$

Nesta equação, Kf é a constante de Freundlich (mg/L); Ce é a concentração de cromo no equilíbrio e 1/n é a constante de heterogeneidade.

Conforme Veit *et al*. (2014), o modelo de isoterma de Langmuir, devido a sua simplicidade, não considera o material como heterogêneo, o que é importante em sistemas reais. Já para avaliar sistemas com números definidos e finitos de sítios idênticos com distribuição homogênea e para adsorção em monocamadas, o modelo é válido. A equação que foi utilizada para avaliar o desempenho do carvão ativado conforme esse modelo, pode ser observada a seguir, na Equação 5.

$$qe = \frac{qe\ máx * KL * Ce}{1 + KLCe} \quad (5)$$

Nesta equação, $qe_{máx}$ é a capacidade máxima de adsorção, expressa em mg/g; $K_L$ é a constante de equilíbrio de adsorção, dada em L/mg, e *Ce* é a concentração de equilíbrio do cromo na solução (Veit *et al.*, 2014).

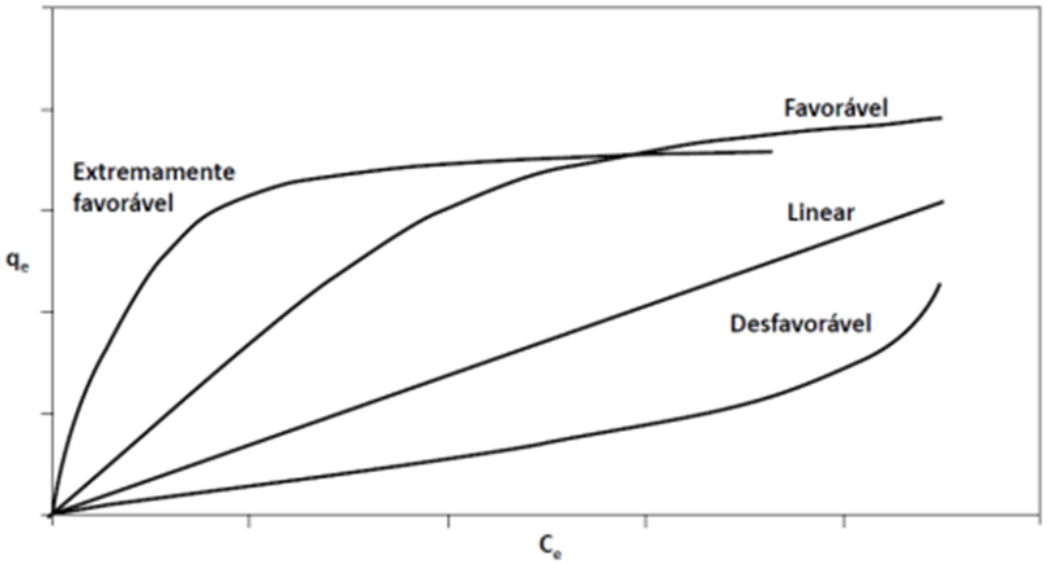
Também foi avaliada a isoterma de adsorção de Brunauer, Emmett e Teller (BET), que leva em consideração as multicamadas da interação entre sólido e

líquido e ambas as isotermas de Freundlich e Langmuir, de acordo com o que apresenta a Equação 6 (Santos, 2022).

$$qc = \frac{qmáx\ KsCe}{(1+KbetCe)[1+(Ks-Kbet)Ce]} \quad (6)$$

Nesta equação, qc representa a quantidade total de cromo adsorvida no adsorvente (mg/g); $q_{máx}$ a quantidade de cromo adsorvida nos sítios disponíveis da superfície do adsorvente (mg/g); Ks a constante de equilíbrio de adsorção em monocamada (L/mg); Kbet a constante de adsorção em multicamada (L/mg) e Ce a concentração de cromo na fase líquida em equilíbrio (mg/L) (Santos, 2022). Com a intenção de identificar o quão favorável pode ser a isoterma, utilizou-se como base o gráfico da Figura 4, em que observa-se o quão favorável pode ser a adsorção, com base na quantidade de adsorvato removida, em relação a quantidade de adsorvente utilizada (Dalberto *et al*., 2021).

Figura 4 - Diferentes formatos das isotermas.




Fonte: Dalberto *et al*. (2021).

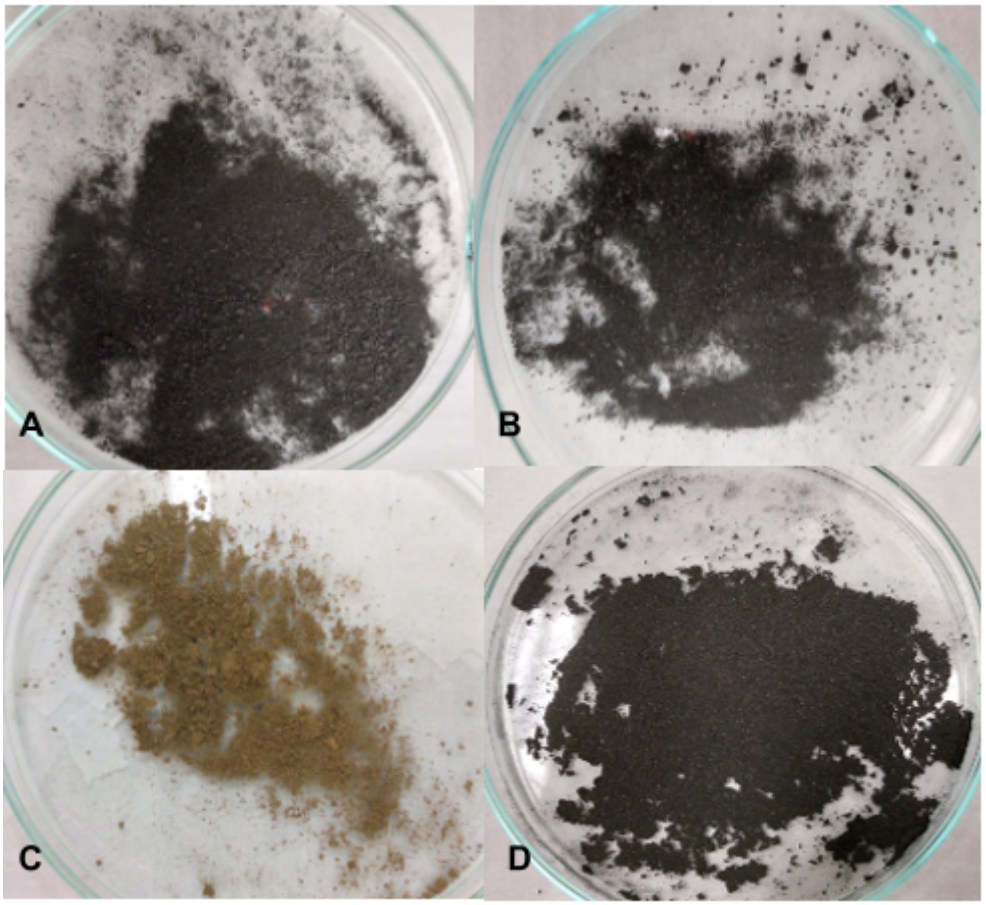
# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de verificar a eficiência das amostras de carvão ativado produzidas com palitos de erva-mate em comparação ao CAC, analisou-se o aspecto visual das amostras, o rendimento e avaliou-se a interferência da variação de pH da solução, realizou-se testes com diferentes concentrações da solução de efluente sintético (soluções de dicromato de potássio) e diferentes tempos de equilíbrio de adsorção, além das análises das isotermas de adsorção.

## 4.1 Aspecto visual das amostras desenvolvidas e rendimento

Através da Figura 5, observa-se que as amostras de carvão ativado produzidas com palitos de erva-mate apresentam diferentes tamanhos de partículas e aspectos físicos, comparadas ao CAC (D). Além disso, observa-se que apenas as amostras $CA_{ZnCl2}$ (A) e $CA_{H3PO4}$ (B) apresentaram características físicas de carvão.

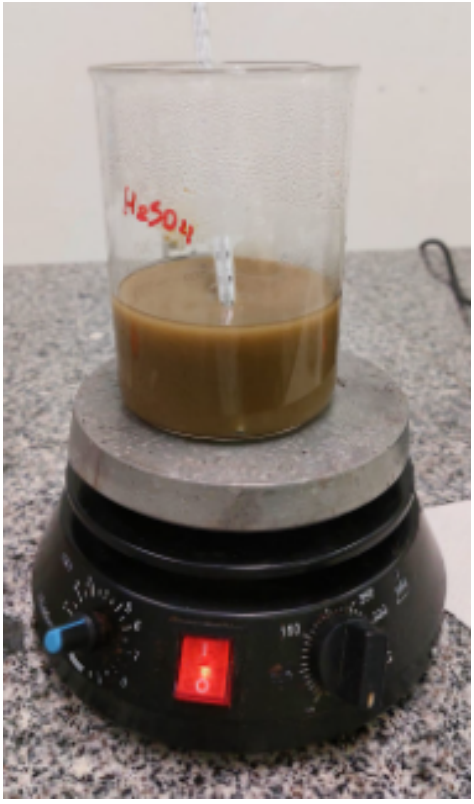
Figura 5 - Carvão ativado obtido com palitos de erva-mate funcionalizados com: $ZnCl_2$ (A), $H_3PO_4$ (B), NaOH (C) e Carvão ativado comercial (D).




Fonte: Da autora (2023).

Em relação a coloração apresentada pela amostra ativada quimicamente com NaOH (C), verificou-se que durante a lavagem a amostra se dissolveu na solução de $H_2SO_4$ 1% m/v, o que resultou na coloração marrom observada na Figura 6.

Figura 6 - $CA_{NaOH}$ durante lavagem de neutralização com agente neutralizante.




Fonte: Da autora (2023).

Já as alterações verificadas visualmente nos tamanhos de partículas das amostras em comparação ao CAC, podem ser resultado do tratamento químico realizado para ativar as amostras, considerando-se que as soluções e os agentes ativantes utilizados são agressivos, como o NaOH e o $H_3PO_4$. A amostra CAF foi submetida à mufla e tornou-se cinza, conforme é observado na Figura 7. Uma das causas pode ser a característica física da matéria-prima utilizada, retida na peneira de 250 *mesh*, dado que o diâmetro do *mesh* utilizado é de 0,063 mm, o que classifica as partículas como ultrafinas (Dalberto *et al*., 2021). Assim, devido a amostra obtida não se tratar de carvão, optou-se por não dar continuidade nas análises de adsorção com esta amostra.

Figura 7 - Aspecto da amostra sem ativação química, apenas por pirólise.

Fonte: Da autora (2023).

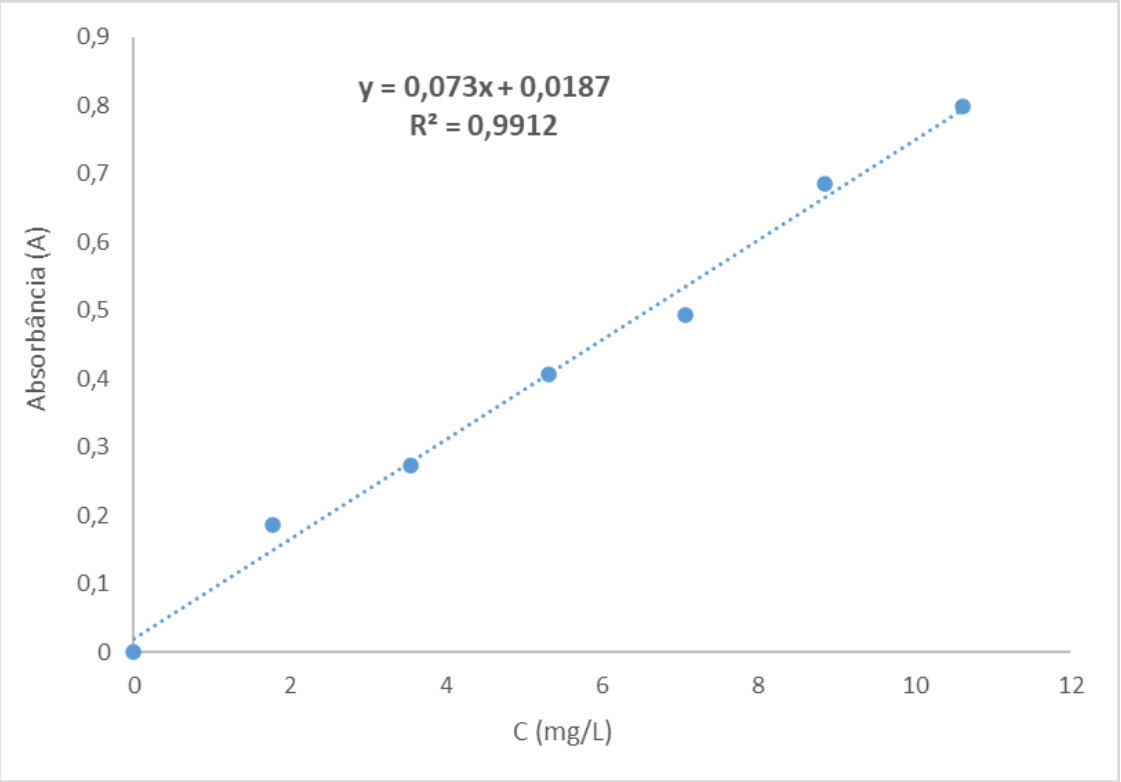
Em relação ao rendimento (Rc) das amostras de carvão ativado, obteve-se os resultados a partir das massas iniciais de palitos de erva-mate e da quantidade resultante após as lavagens com os agentes neutralizantes, utilizando-se a Equação 1. Assim, para a amostra $CA_{H3PO4}$ o rendimento foi de 1,77%; para a amostra $CA_{NaOH}$, 0,76% e 8,93% para amostra $CA_{ZnCl2}$. Os valores baixos de rendimento são resultado da perda de amostra ocorrida durante o processo de filtração à vácuo, realizado após a lavagem com os agentes neutralizantes e com água deionizada. Dessa maneira, os resultados apontam que a amostra $CA_{ZnCl2}$ foi a que apresentou maior rendimento, possivelmente devido às menores perdas no processo de lavagem. Com isso, esse rendimento não pode ser considerado para o processo, pois as perdas foram inerentes ao método e técnicas de ativação utilizadas.

Brandão, Queiroz e Silva (2020), obtiveram rendimento de carvão ativado de 41,98% para amostra ativada com NaOH e 54,40% para amostra ativada com $H_3PO_4$, utilizando como matéria-prima a casca de pequi. Estes resultados também demonstram menor rendimento para amostra ativada com base e a causa para o menor rendimento é o efeito gerado pelo agente ativante, já que é uma base forte que causa alterações severas no material e quanto maior a desidratação e a despolimerização, menor será o rendimento, pois maior será a perda de massa (Brandão; Queiroz; Silva, 2020).

## 4.2 Curva de calibração

Para avaliar as análises de adsorção, elaborou-se a curva de calibração com auxílio do Microsoft Excel, da qual se obteve a equação da reta utilizada nos cálculos de concentração de cromo final, após a adsorção com as amostras de carvão ativado, a partir dos valores de absorbância. Para isso, foram realizadas leituras no espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis) no comprimento de onda de 540 nm, a partir das soluções preparadas com dicromato de potássio. Como coeficiente de correlação ($R^2$) obteve-se 0,9912, e como coeficientes angular e linear obteve-se 0,073 e 0,0187, respectivamente, de acordo com o que está representado na Figura 8, em que o eixo X refere-se a concentração (C) de Cr (VI) em mg/L e no eixo Y estão representados os resultados de absorbância (A).

Figura 8 - Curva de calibração elaborada a partir de diferentes concentrações de Cr (VI).




Fonte: Da autora (2023).

## 4.3 Análises de adsorção

Foram realizados ensaios de adsorção com a intenção de verificar a eficiência das amostras obtidas em comparação ao CAC em pó, porém as análises não foram realizadas com o $CA_{NaOH}$, visto que o rendimento e a quantidade obtida após a etapa de neutralização foram muito baixos, o que permitiu apenas a avaliação física. Já para o CAC e para o $CA_{ZnCL2}$ as análises foram realizadas em duplicata, enquanto que para as análises referentes a amostra $CA_{H3PO4}$ foi realizada apenas uma leitura em espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis) para cada parâmetro avaliado, devido a baixa disponibilidade de amostra.

### 4.3.1 Efeitos da variação de pH da solução

Realizou-se avaliações com soluções contendo Cr (VI) em pH 2, 4 e 6 para analisar a eficiência de cada amostra, utilizando-se 0,2 g/L de carvão ativado, solução com concentração inicial de Cr (VI) de 1,77 mg/L e 3 min de adsorção, com agitação magnética, utilizando-se volume de 50 mL em temperatura ambiente de aproximadamente 25 ºC. Os resultados acerca da capacidade de adsorção foram avaliados através da leitura da solução filtrada em espectrofotômetro de absorção molecular da região do Ultravioleta/Visível (UV-Vis), em 540 nm, e foram determinados através da Equação 2, sendo que os valores obtidos podem ser observados na Tabela 3, considerando-se o desvio padrão para CAC e para $CA_{ZNCL2}$.

Tabela 3 - Capacidade de adsorção das amostras avaliadas.

| Capacidade de adsorção | pH | $CA_{ZnCl2}$ | $CA_{H3PO4}$ | CAC |
|---|---|---|---|---|
| qe (mg/g) | 2 | 5,91 ± 1,27 | 6,19 | 9,33 ± 0,84 |
| | 4 | 6,62 ± 1,78 | 6,20 | 10,23 ± 0,04 |
| | 6 | 10,39 ± 0,17 | 10,57 | 5,47 ± 0,02 |

Fonte: Da autora (2023).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, é possível aferir que em pH 2 o $CA_{H3PO4}$ apresenta resultado mais próximo ao CAC, enquanto que em pH 4, o $CA_{ZnCl2}$ apresenta capacidade acima do $CA_{H3PO4}$. Já em pH 6, os resultados das amostras produzidas com palitos de erva-mate apresentam capacidade adsortiva superior ao CAC. Observando-se os resultados de outros autores, nota-se que Rai *et al*. (2016) obtiveram capacidade adsortiva de 7,8 mg/g em pH 2, a partir da adsorção com carvão ativado com $H_3PO_4$ produzido com caroço de manga, para remoção de Cr (VI). Já Kumar e Jena (2017) utilizaram carvão ativado produzido com casca de noz e alcançaram capacidade adsortiva de Cr (VI) de 43,45 mg/g, em pH 2. De acordo com os resultados destes autores, o pH 2 proporcionou maior eficiência nos resultados de adsorção, enquanto que para este trabalho os resultados máximos foram atingidos em pH 6 para o $CA_{ZnCl2}$ e o $CA_{H3PO4}$ e em pH 4 para o CAC.

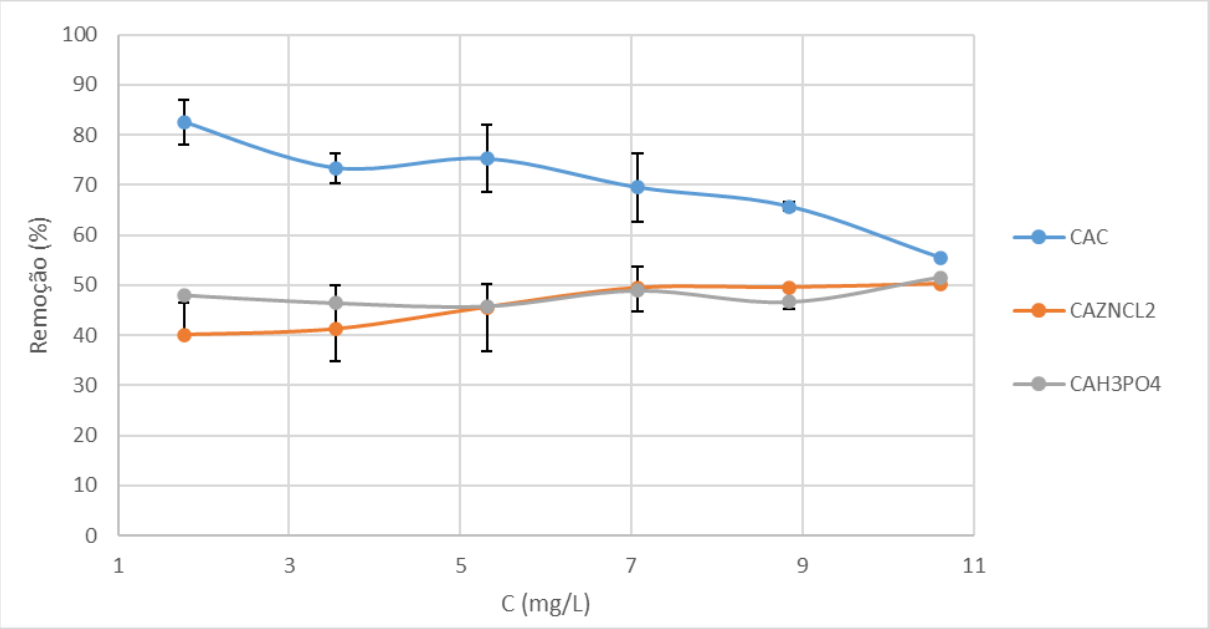
Os resultados obtidos por Gamboa *et al*. (2022), utilizando casca de arroz como adsorvente, revelam que em caráter ácido ocorre maior adsorção do cromo e conforme aumenta o pH, a remoção decresce. O efeito de variação de pH está relacionado às espécies de cromo e a carga presente na superfície do adsorvente. Em meio ácido, esta superfície encontra-se com elevada protonação, o que facilita a adsorção do Cr (VI), devido à atração eletrostática presente entre a superfície e as espécies aniônicas de cromo hexavalente, como $HCrO^{4-}$, $Cr_2O7^{2-}$, $CrO_4^{2-}$, $Cr_3O_{10}^{2-}$ e $Cr_4O_{13}^{2-}$, que estão presentes em soluções. Quando ocorre o aumento do pH, as hidroxilas têm preferência pelos sítios ativos do adsorvente e geram competição entre íons OH e espécies aniônicas de Cr (VI). Ademais, a medida que o pH se

eleva, ocorre a redução na atração eletrostática entre ânions de Cr (VI) e o adsorvente, reduzindo a adsorção (Gamboa *et al*., 2022). O cromo encontra-se na forma de íon hidrogenocromato ($HCrO^{4-}$), em pH 2, considerando-se a concentração inicial de 5 mg/L de Cr (VI). Quando ocorre o aumento do pH, pode haver repulsão entre o sólido e os íons da solução, pois a superfície adquire carga negativa (Barbosa, D. 2017).

### 4.3.2 Efeitos da variação de concentração de Cr (VI) da solução

Com a intenção de avaliar a influência na adsorção da variação da concentração de efluente sintético (adsorvato), estabeleceu-se as seguintes concentrações de Cr (VI): 1,77, 3,54, 5,31, 7,07, 8,84 e 10,61 mg/L, mantendo-se o pH em 2, o tempo de equilíbrio de 3 min, o volume de solução de 50 mL e a temperatura ambiente. Os resultados obtidos estão representados na Figura 9, considerando-se o desvio padrão para CAC e $CA_{ZnCl2}$.

Figura 9 - Avaliação da variação de concentração de adsorvato.




Fonte: Da autora (2023).

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que há uma tendência de decréscimo na adsorção, exceto para a amostra $CA_{ZnCl2}$, e que as três amostras analisadas culminam em remoção próxima de 50% ao atingir 10,61 mg/L de Cr (VI). Verifica-se que a amostra $CA_{H3PO4}$ apresentou percentual superior de remoção de 8 e 5% em relação ao $CA_{ZnCl2}$ em concentrações de 1,77 e de 3,54 mg/L. Já em comparação ao CAC, o $CA_{H3PO4}$ obteve eficiência inferior, com cerca de 30% a menos de remoção com concentração de Cr (VI) igual a 1,77 mg/L e nas concentrações de 7,07 e 8,84 mg/L, apresentou redução de aproximadamente 20% na adsorção. Além disso, verifica-se que a partir de 7,07 mg/L o CAC demonstra redução na porcentagem de remoção, atingindo percentual inferior a 70%. Considerando-se apenas o CAC, observa-se que é possível atingir em torno de 82% de remoção de Cr (VI) em concentração de 1,77 mg/L.

De acordo com Schmitz, Machado e Moura (2021), que realizaram estudos utilizando resíduo de carvão de acácia negra, observa-se que em baixas concentrações de Cr (VI) a razão entre a disponibilidade total deste componente e a superfície de adsorção é elevada, e, assim, ocorre a interação com o adsorvente e o metal presente na solução. Já em concentrações mais elevadas, a tendência é que os complexos disponíveis de adsorção se saturem, resultando na queda de remoção do Cr (VI).

Conforme Gamboa *et al*. (2022), com o aumento da concentração de cromo, eleva-se o número de íons da solução que competem por sítios ativos, o que leva à saturação destes. Resultados obtidos por estes mesmos autores utilizando casca de arroz como adsorvente do Cr (VI), mostram maior eficiência do carvão ativado com ácido $H_2SO_4$ (1% m/v) em diferentes concentrações (5, 20 e 45 mg/L) e pH 1, o que corrobora com os resultados apresentados neste trabalho, quando são avaliadas as amostras produzidas com os palitos de erva-mate, já que o $CA_{H3PO4}$ apresentou resultados levemente superiores a amostra $CA_{ZnCl2}$.

Com o objetivo de avaliar a capacidade adsortiva dos adsorventes para diferentes concentrações de Cr (VI), elaborou-se a Tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo das capacidades de adsorção dos adsorventes $CA_{ZnCl2}$, $CA_{H3PO4}$ e CAC.

| Capacidade de adsorção | Concentração (mg/L) | $CA_{ZnCl2}$ | $CA_{H3PO4}$ | CAC |
|---|---|---|---|---|
| qe (mg/g) | 1,77 | 3,33 ± 0,09 | 3,89 | 6,96 ± 0,04 |
| | 3,54 | 6,97 ± 1,57 | 7,75 | 12,79 ± 0,70 |
| | 5,31 | 13,57 ± 5,26 | 11,68 | 21,32 ± 4,98 |
| | 7,07 | 18,79 ± 5,43 | 17,28 | 27,04 ± 2,21 |
| | 8,84 | 22,40 ± 4,47 | 19,81 | 30,07 ± 0,24 |
| | 10,61 | 25,38 ± 0,08 | 26,05 | 28,27 ± 0,31 |

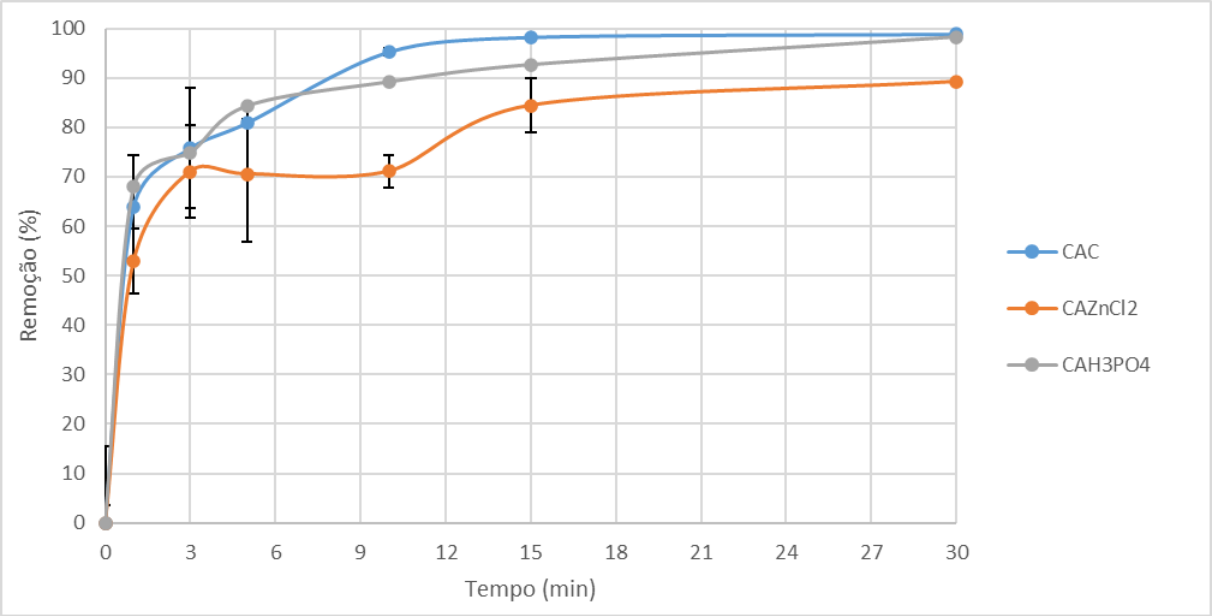
Fonte: Da autora (2023).

Através dos resultados apresentados, calculados a partir da Equação 2, é possível notar que em concentrações elevadas a capacidade adsortiva aumenta, ou seja, maior é a concentração de Cr (VI) por grama de carvão ativado utilizada, e que o valor máximo foi atingido utilizando-se CAC, na concentração de 8,84 mg/L de Cr (VI), enquanto que para o $CA_{H3PO4}$ e para o $CA_{ZnCl2}$ o maior resultado foi alcançado com concentração de 10,61 mg/L de Cr (VI). Verifica-se que a concentração inicial proporciona a força motriz necessária para que haja transferência de massa do soluto, na fase sólida e na fase líquida, e com o aumento da concentração, ocorre maior interação entre o metal e o adsorvente, resultando em maior capacidade de adsorção (Schmitz; Machado; Moura, 2021). Esta maior interação, pode ser explicação para os resultados deste trabalho, em que se observa que os valores da capacidade de adsorção aumentam de forma proporcional à concentração do metal.

### 4.3.3 Análise do tempo de equilíbrio

Com a intenção de verificar a interferência do tempo de equilíbrio na adsorção do cromo, realizou-se análises com 1, 3, 5, 10, 15 e 30 min de agitação, com concentração de Cr (VI) fixa em 1,77 mg/L, com pH 2 e concentração de adsorvente de 0,2 g/L, em volume de 50 mL. Os resultados obtidos podem ser avaliados através da Figura 10, levando em consideração o desvio padrão para CAC e $CA_{ZnCl2}$.

Figura 10 - Interferência do tempo de equilíbrio na adsorção do Cr (VI).




Fonte: Da autora (2023).

Diante dos resultados, observa-se que a porcentagem de remoção aumenta proporcionalmente com o aumento do tempo de contato entre adsorvente e adsorvato. Verifica-se que a amostra $CA_{ZnCl2}$ apresentou desempenho inferior às demais, embora apresente remoção significativa do cromo a partir de 15 min de adsorção. Observa-se também que a amostra $CA_{H3PO4}$ demonstrou a maior remoção com 5 min e obteve resultados próximos ao adsorvente CAC, com mais de 90% de remoção de Cr (VI) a partir de 10 min de adsorção. Além disso, verifica-se que com 15 min atinge-se o tempo de equilíbrio, já que não há aumento significativo de remoção de Cr (VI) com 30 min. Assim, nota-se que com o CAC e o $CA_{H3PO4}$ é

possível atingir a concentração permitida nos efluentes líquidos pela Resolução 355/2017 do CONSEMA (2017) estabelecida para o Rio Grande do Sul, considerando-se 15 e 30 min, respectivamente, com remoção de 98% de Cr (VI), resultando numa concentração de 0,030 mg/L.

Resultados obtidos por Moreira *et al*. (2018), apontam que com 10 min foi possível atingir 99% de remoção de Cr (VI), utilizando-se rejeitos de beneficiamento do carvão como adsorvente e pH 2. Já Meurer e Silva (2019), utilizando carvão ativado produzido com resíduos de erva-mate para a remoção de cobre da água, obtiveram resultados inferiores a partir da amostra tratada com $ZnCl_2$, como ocorreu neste trabalho.

Resultados com comportamento semelhante a este trabalho foram obtidos pelos estudos de Rai *et al*. (2016) utilizando caroço de manga como adsorvente de Cr (VI), já que aumenta a adsorção com o aumento do tempo de contato até aproximadamente 50 min e após tende a um valor constante. Isto sugere que com o passar do tempo, os sítios ativos vão sendo ocupados até atingir o ponto de saturação, em que ocorre a ocupação de todos os sítios ativos (Moreira *et al*., 2018). A partir disto, verifica-se que no início da adsorção, os sítios ativos estão vazios e a adsorção tende a ser mais rápida, enquanto que a dessorção apresenta taxa mais baixa, assim, quando os sítios ativos são ocupados, as taxas de adsorção e dessorção tornam-se iguais e a adsorção reduz até atingir o equilíbrio. O acréscimo de adsorção além disso ocorre pela difusão intrapartícula, um processo mais lento (Rai *et al*., 2016).

### 4.3.4 Isotermas de adsorção

Quanto às isotermas de adsorção, foram avaliados os modelos de Freundlich, Brunauer, Emmett e Teller (BET) e Langmuir, com auxílio de Microsoft Excel e do software Solver, numa temperatura aproximada de 25 ºC. Para obter as isotermas conforme o modelo de Freundlich, utilizou-se a Equação 4; para o modelo de Langmuir, a Equação 5 e para BET, a Equação 6. Para comparar os resultados dos

parâmetros obtidos de cada modelo de isoterma para cada uma das três amostras analisadas, elaborou-se a Tabela 5, sendo que ∑SQE refere-se ao somatório dos quadrados dos erros.

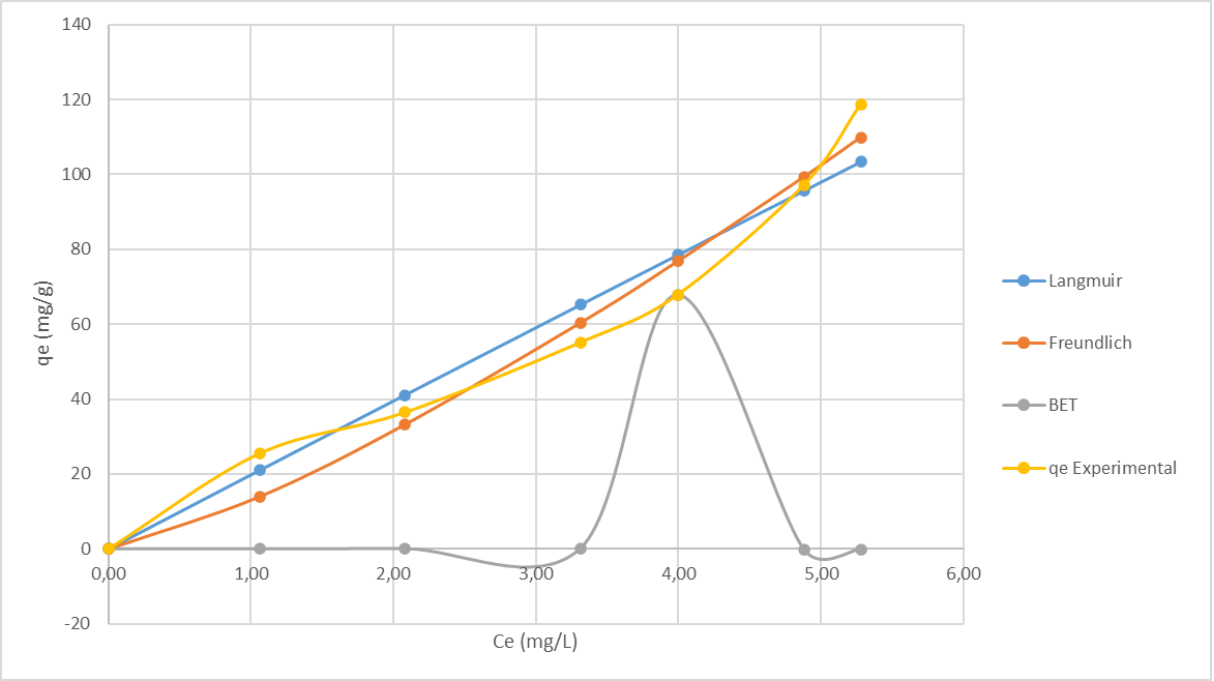
Tabela 5 - Parâmetros das isotermas de adsorção obtidos de acordo com os modelos avaliados, para os adsorventes $CA_{ZnCl2}$, $CA_{H3PO4}$ e CAC.

| Modelo | Parâmetros | $CA_{ZnCl2}$ | $CA_{H3PO4}$ | CAC |
|---|---|---|---|---|
| Freundlich | $K_F$ | 12,96 | 19,03 | 14,06 |
| | n | 0,78 | 0,91 | 2,13 |
| | ∑SQE | 332,26 | 121,75 | 12,29 |
| Langmuir | $q_{máx}$ (mg/g) | 6866,41 | 3456,25 | 38,88 |
| | $K_L$ | 0,0029 | 0,0065 | 0,55 |
| | ∑SQE | 492,91 | 165,18 | 26,90 |
| BET | $K_1$ | 0,024 | 7,53 | 2,10 |
| | $K_2$ | 0,25 | 0,14 | 0,08 |
| | $q_{BET\ máx}$ (mg/g) | 0,024 | 32,96 | 19,34 |
| | ∑SQE | 28566,82 | 173,81 | 17,57 |

Fonte: Da autora (2023).

Os resultados adquiridos utilizando-se a amostra $CA_{ZnCl2}$, estão visíveis na Figura 11, em que se identifica que os modelos de Langmuir e de Freundlich tendem a configuração linear.

Figura 11 - Isotermas de adsorção da amostra $CA_{ZnCl2}$.




Fonte: Da autora (2023).

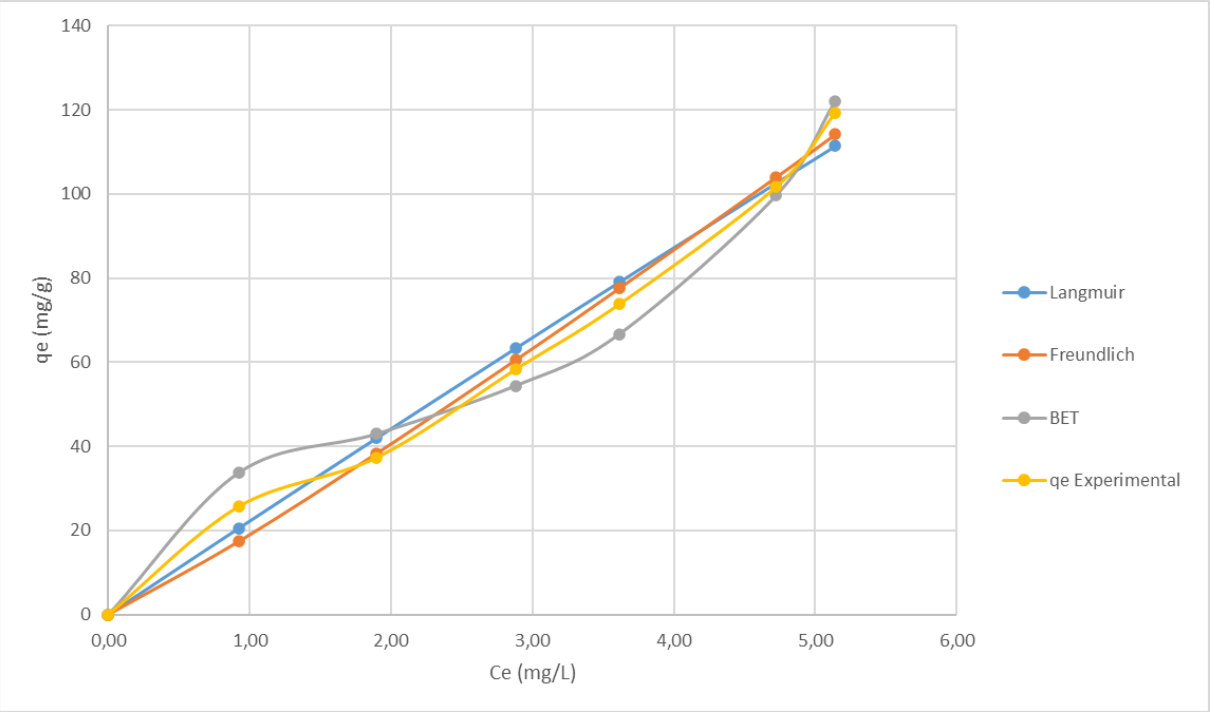
Diante dos resultados, avaliando-se a constante (n), cujo valor provém do modelo de Freundlich e é de 0,78, observa-se a tendência linear. Isto indica que a massa de adsorvato retida pela massa de adsorvente é baixa, quando a concentração de adsorvato é alta na fase líquida, no equilíbrio, e sabe-se que quanto maior o valor de n, maior é a interação entre adsorvente e adsorvato. Além disso, quando o processo é classificado como favorável, significa que a massa do adsorvato retida por massa de adsorvente é alta, em baixa concentração de adsorvato na fase líquida, e verifica-se, neste caso, que o processo de adsorção é predominantemente físico (n>1). Ao avaliar a isoterma de Langmuir, observa-se que a massa de adsorvato retida pela massa de adsorvente utilizada é proporcional à concentração de adsorvato no equilíbrio, já que a isoterma apresenta-se de forma linear (Meurer; Silva, 2019).

Quanto aos valores apresentados pelo ∑SQE, observa-se que o modelo de Freundlich é o que apresenta maior similaridade com os dados experimentais, já que apresenta o menor valor de soma dos quadrados dos erros entre os resultados dos demais modelos. Assim, a curva observada indica que o processo de adsorção

caracteriza-se como físico (Tadini *et al*., 2019). O resultado deste trabalho corrobora com o resultado obtido por Bezerra *et al*. (2020), utilizando carvão ativado produzido com lodo doméstico para adsorção do cobre (III), no qual o modelo de Freundlich apresentou o melhor ajuste.

Através dos resultados observados na Figura 12 para a amostra $CA_{H3PO4}$, é possível concluir que os modelos avaliados tendem a configuração linear, exceto pelo modelo de BET.

Figura 12 - Isotermas de adsorção utilizando-se o $CA_{H3PO4}$.



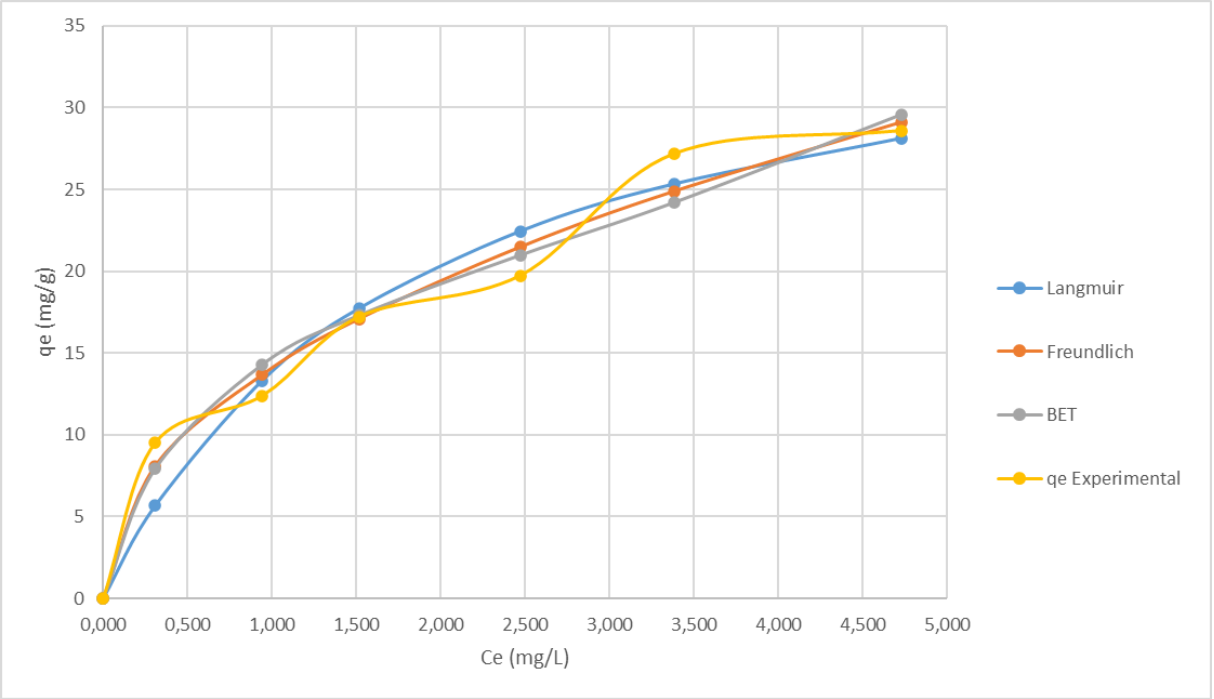

Fonte: Da autora (2023).

Para esta amostra, é possível analisar que o modelo de Freundlich apresenta valor de constante igual a 0,91, ou seja, está próximo de 1, o que comprova que é proporcional a quantidade de adsorvato retida pela quantidade de adsorvente utilizada (Meurer; Silva, 2019). Ao avaliar a isoterma que apresenta o melhor ajuste para o $CA_{H3PO4}$, verifica-se que é o modelo de Freundlich, pois apresenta o menor do ∑SQE (121,75) em comparação aos modelos de Langmuir e BET, que apresentam valores de 165,18 e 173,81, respectivamente. Dessa maneira, comprova-se que com o aumento da concentração de soluto, eleva-se a interação entre as moléculas

adsorvidas e deixa de existir a relação linear entre as concentrações na fase sólida e fluida, sendo que a sólida tende a saturação (Tadini *et al*., 2019).

Os resultados obtidos a partir das isotermas de adsorção utilizando CAC, podem ser observados na Figura 13.

Figura 13 - Isotermas de adsorção obtidas para o CAC.




Fonte: Da autora (2023).

Analisando-se o gráfico, verifica-se que os três modelos de isotermas avaliados apresentam-se como favoráveis ao processo de adsorção, já que configuram-se como uma curva, confirmando a afinidade entre adsorvente e adsorvato, mesmo em baixas concentrações. Diante disso, verifica-se que em baixas concentrações é possível adsorver quantidade de cromo considerável a cada grama de carvão ativado.

Com a intenção de verificar o modelo satisfatório aos dados experimentais para este carvão ativado, avaliou-se o valor do somatório dos quadrados dos erros (∑SQE) presente na Tabela 5, que foi menor para o modelo de Freundlich (12,29) em comparação ao modelo de Langmuir (26,90) e BET (17,57), e ao avaliar a constante de Freundlich (n), verificou-se que o CAC obteve constante de 2,13. Este

último resultado estabelece que a adsorção configura-se como favorável, visto que a constante tende a um valor entre 1 e 10 quando o processo é favorável, e quanto maior o valor de n, maior é a interação entre adsorvente e adsorvato (Nascimento *et al*., 2014).

Com base nos trabalhos de outros autores, verifica-se que vários resultados obtidos ajustam-se melhor ao modelo de Freundlich, de acordo com o que está representado no Quadro 1, como é o caso deste presente trabalho, em que todas amostras avaliadas apresentaram melhor ajuste a este modelo de isoterma. Dessa forma, pode-se afirmar que a adsorção é favorável e predominantemente física, considerando-se este modelo matemático.

Quadro 1 - Estudos de adsorção que apresentaram ajuste satisfatório para o modelo de isoterma de Freundlich.

| **Adsorvente** | **Soluto** | **Referências** |
|---|---|---|
| Sementes de *Moringa oleifera* | Cr (III) | Costa; Coelho; Coelho, 2021 |
| Biossólido de curtume | Cromo | Jeronimo *et al*., 2019 |
| Cascas de arroz | Cr (VI) | Gamboa *et al*., 2022 |
| Carvão ativado granular | 2,4,6-Tribromofenol (TBF) | Almeida *et al*., 2023 |
| Carvão ativado de lodo doméstico | Cobre (II) | Bezerra *et al*., 2020 |

Fonte: Da autora (2023).

# 5 CONCLUSÃO

Através do presente estudo, nota-se que os objetivos propostos foram atingidos, visto que foi possível produzir carvão ativado a partir dos resíduos da indústria ervateira, através de tratamento químico e físico (pirólise). Além disso, foram realizadas as análises propostas com a intenção de avaliar a eficiência das amostras produzidas, comparando-as ao carvão ativado comercial, em relação à remoção do Cr (VI) de efluentes, a partir de efluente sintético.

Em relação às amostras produzidas com palitos de erva-mate, a amostra $CA_{H3PO4}$ apresentou os melhores resultados, em comparação ao $CA_{ZnCl2}$ e foi capaz de atingir remoção de Cr (VI) próxima ao CAC. Porém, ressalta-se que ocorreu perda de amostra durante a filtração após a lavagem de neutralização, o que prejudicou os ensaios envolvendo a amostra $CA_{NaOH}$ e também os resultados de rendimento das amostras produzidas.

Após as análises, foi possível aferir que a melhor condição para eficiência do carvão ativado é em pH 6, para $CA_{ZnCl2}$ e $CA_{H3PO4}$, com tempo de adsorção de 3 min e concentração de carvão ativado de 0,2 g/L, apesar de que outros autores indicam valores de pH mais baixos como sendo os de maior efetividade. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que com diferentes concentrações de Cr (VI), a amostra produzida com palitos de erva-mate ativada com $H_3PO_4$ apresentou desempenho levemente superior à amostra $CA_{ZnCl2}$, apesar de haver diferenças comparando-se a eficiência significativa do CAC na porcentagem de remoção. Já em relação ao tempo de adsorção, obteve-se resultados satisfatórios com o $CA_{H3PO4}$, porém a partir de 15 min a adsorção entra em equilíbrio e não há alterações

consideráveis na porcentagem de Cr (VI) removida ao alcançar 30 min, atingindo-se cerca de 98% de adsorção com CAC. Ademais, ressalta-se que ocorreu perda de amostra durante a filtração após a lavagem de neutralização, o que prejudicou os ensaios envolvendo a amostra $CA_{NaOH}$ e também os resultados de rendimento das amostras produzidas.

Ao avaliar as isotermas de adsorção elaboradas a partir dos modelos de Freundlich, Langmuir e BET, nota-se que o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais é o de Freundlich, para todas as amostras avaliadas. Dessa maneira, ao finalizar os ensaios experimentais, conclui-se que é possível utilizar o carvão ativado produzido com palitos de erva-mate, dados os resultados satisfatórios, porém seria necessário realizar ensaios com efluentes líquidos industriais para comprovar a eficiência em escala industrial. Além disso, como sugestão de estudo futuro, pode ser avaliada a possibilidade de regeneração do carvão ativado e de dessorção do Cr (VI), que pode retornar ao processo produtivo.

# REFERÊNCIAS

**ABNT**. NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação. Disponível em: https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf. Acesso em: 10 maio 2023.

ALMEIDA, Ian R. de; KELLER, Geovana E. M.; TAVARES, Lígia C.; GUEDES, Maria T. de J. C.; BENETTI, Antônio D. Adsorção de 2,4,6-Tribromofenol em carvão ativado de osso - parâmetros cinéticos e isotérmicos. **ABES - Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. 32. 2023. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/263815/001173548.pdf?sequence=1. Acesso em: 11 nov. 2023.

ANANIAS, Alanny L. M.; OLIVEIRA, Ana K. C. de; BRITO, Giovanna S.; NUNES, Henrique J.; DANTAS, Maria C. da S.; XAVIER, Myvia dos S. Tratamentos e análise de efluentes industriais. **18 º Congresso de Meio Ambiente - Justiça Climática no Antropoceno.** Poço de Caldas. v. 13, n. 1, set. 2021. ISSN on-line 2317-9686. Disponível em: http://www.meioambientepocos.com.br/ANAIS%202021/29_tratamento-e-anlise-de-efluentes-industriais.pdf. Acesso em: 13 abr. 2023.

ANDREIS, Felipe. **Redução dos níveis de cromo em águas residuais utilizando *Saccharomyces Cerevisiae* como bioadsorvente**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, jul. 2011. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36914/000793022.pdf. Acesso em: 31 ago. 2023.

BARBOSA, Dafne L. **Aplicação do rejeito do beneficiamento do carvão moatize (Moçambique) como sólido sorvente na remoção de cromo (VI)**. 2017. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia) - Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2017. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/172302/001058111.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 11 nov. 2023.

BARBOSA, Isabela M. V. **O cromo no meio ambiente e tratamentos de efluentes contaminados com metais pesados**. 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química) - Curso de Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/36519/4/CromoMeioAmbiente.pdf. Acesso em: 28 fev. 2023.

BARROS, D. C.; CARVALHO, G.; RIBEIRO, M. A. Processo de biossorção para remoção de metais pesados por meio de resíduos agroindustriais: uma revisão. **Revista Biotecnologia & Ciência**. Goiás - Campus Ceres, v.6, n.1, p.01-15, 2017. Disponível em: https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/6161/4695#:~:text=A%20biossor%C3%A7%C3%A3o%20 consiste%20na%20adsor%C3%A7%C3%A3o,LESMANA%20et%20al%2C%202009. Acesso em: 06 abr. 2023.

BEZERRA, J. K. A.; LOPES, R. P. F.; BARROS NETO, E. L.; SOUZA, M. A. S. B.; NUNES, A. O. Remoção de cobre (II) em solução aquosa por adsorção usando carvão ativado produzido a partir do lodo doméstico. **Revista Virtual de Química**, Natal, RN, v. 11, n. 6, p. 1-13, 2020. ISSN 1984-6835. DOI: 10.21577/1984-6835.20190135. Disponível em: http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/JessycaNoPrelo.pdf. Acesso em: 05 nov. 2023.

BITTENCOURT, TRS; SILVEIRA, FJL; MENDES, FMT; TONIOLO, FS; GASPAR, AB. . Adsorção de cromo hexavalente com carvão ativado proveniente de diferentes biomassas. **XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo, set. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fabio-Toniolo/publication/327901573_ADSORCAO_DE_CROMO_HEXAVALENTE_COM_CARVAO_ATIVADO_PROVENIENTE_DE_DIFERENTES_BIOMASSAS/links/5e81ed55458515efa0b9299c/ADSORCAO-DE-CROMO-HEXAVALENTE-COM-CARVAO-ATIVADO-PROVENIENTE-DE-DIFERENTES-BIOMASSAS.pdf. Acesso em: 12 maio 2023.

BORSOI, Cleide; HANSEN, Betina; GEMMER, Ruan E.; JUNIOR, Marcos A. D.; FRANCISQUETTI, Edson L.; ZATTERA, Ademir J.; SANTANA, Ruth M. C.; CATTO, André L. Effect of different surface treatments on polypropylene composites reinforced with yerba mate fibers: Physical, mechanical, chemical, and morphological properties. **Journal of Applied Polymer Science.** p. 1-12. jun. 2021. DOI: 10.1002/app.51350. Disponível em: https://sci-hub.se/http://dx.doi.org/10.1002/app.51350. Acesso em: 07 maio 2023.

BORTULUZZI, Camila M. Propriedades energéticas de briquetes de resíduos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*). **Revista Gestão & Sustentabilidade - Grupo de Estudos em Operações e Sustentabilidade**, v. 1, n. 1, p. 149 - 161, 4 jun. 2019. Disponível em: https://periodicos.uffs.edu.br/index.php/RGES/article/view/10716/7165. Acesso em: 29 abr. 2023.

BRANDÃO, Ana C. T.; QUEIROZ, Vânia; SILVA, Ramon G. C. Síntese e caracterização de carvão ativado quimicamente com $H_3PO_4$ e NaOH à partir da casca de pequi (*Caryocar brasiliense*). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, RS, v.6, n.8, p. 60945-60962, ago. 2020. ISSN 2525-8761. DOI: 10.34117/bjdv6n8-493. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/15444/12713. Acesso em: 21 ago. 2023.

**BRASIL**. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 10 maio 2023.

CASAGRANDA, Magali C. **Estudo da incorporação de resíduos e de extrato de erva-mate em poli(ácido láctico)**. 2019. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2019. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/211400/001113753.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 17 jun. 2023.

**CONAMA**. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627. Acesso em: 10 maio 2023.

COSTA, Evellyn C. M.; OLIVEIRA, Hamilton A. Gestão de resíduos industriais sobre o enfoque da produção mais limpa. **Anais do Simpósio Interdisciplinar Ambiente e Sociedade (SIAS).** v. 1, n. 1, p. 245-268. 2017. Disponível em: https://www.anais.ueg.br/index.php/sias/article/view/12019. Acesso em: 07 fev. 2023.

COSTA, Bruno E. S.; COELHO, Nívia M. M.; COELHO, Luciana M. Avaliação do perfil cinético e do equilíbrio de adsorção de Cr (III) pelas sementes de *Moringa oleifera* aplicadas em sistemas aquosos. **Revista Processos Químicos**, v. 15, n. 29, p. 29-41, 2021. DOI: https://doi.org/10.19142/rpq.v15i29.565. Disponível em: https://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/565/541. Acesso em: 11 nov. 2023.

DALBERTO, Bianca, T.; BALDASSARI, Lucas L.; COUGO, Christian M. dos S.; SIMOMUKAY, Elton; COSTA, Josiane D.; FARINA, Luciano A.; FERRAZ, Mariana S. A.; MEDINA, Midilane S. **Operações unitárias de separação e transporte**. Porto Alegre: Sagah, 2021, 215 p. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556902333. Acesso em: 30 nov. 2023.

DE SALES, P. F.; BERTOLI, A. C.; PINTO, F. M.; MAGRIOTIS, Z. M. 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**, v. 7, n. 4, p. 1174-1188, 2015. ISSN 1984-6835. DOI: http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150066. Disponível em: https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/831/567. Acesso em: 02 nov. 2023.

FIGUEIREDO, Elisabeth de A.; NASCIMENTO, Lucio Fabio C. Resíduos sólidos e a responsabilidade ambiental. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.12, p.114642-114659, dez. 2021. ISSN: 2525-8761. DOI: 10.34117/bjdv7n12-301. Disponível em: https://scholar.archive.org/work/knncvdq2nnfqzoem5wbpz7msou/access/wayback/https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/download/40994/pdf. Acesso em: 03 set. 2023.

GAMBOA, Vanessa S.; GASPARIN, Fabiano P.; KINAST, Éder J.; BENVENUTTI, Edilson V.; RIES, Lúcia A. da S. Aplicação da casca de arroz como adsorvente para remoção de cromo hexavalente em soluções aquosas. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 8, n. 03, p. 206-217, 2022. ISSN 2448-0479. DOI: http://dx.doi.org/10.21674/2448-0479.83.206-217. Disponível em: http://revista.uergs.edu.br/index.php/revuergs/article/view/3443/568. Acesso em: 07 nov. 2023.

GANEM, Roseli Senna. **Políticas setoriais e meio ambiente**. Brasília: Câmara, 2015, 374 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=XRfhDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA48&dq=meio+ambiente+e+as+industrias&ots=YecKPcRNJM&sig=1kjdmdDUB5_mYL2uiief9HnVOu8#v=onepage&q=meio%20ambiente%20e%20as%20industrias&f=false. Acesso em: 07 abr 2023.

GEREMIAS, Rodrigo; PELISSARI, Catiane; LIBARDI, Nelson; CARPINÉ, Danielle; RIBANI, Rosemary H. Chromium adsorption studies using brewer's spent grain biochar: kinetics, isotherm and thermodynamics. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 53:10. jan. 2023. ISSN e-1678-4596. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210914. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/9DqPXcmY4LrSsbTgV34KYvs/?format=pdf&lang=en. Acesso em: 16 maio 2023.

GONÇALVES, Maraísa; GUERREIRO, Mário César; BIANCHI, Maria Lúcia; OLIVEIRA, Luiz C. A.; PEREIRA, Elaine I.; DALLAGO, Rogério M. Produção de carvão a partir de resíduo de erva-mate para a remoção de contaminantes orgânicos de meio aquoso. **Ciências Agrárias**. Lavras, v. 31, n. 5, p. 1386-1391, set./out., 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cagro/a/WDLpLNftBPSNdL53wpgtwvz/?format=pdf&lang=p. Acesso em: 29 abr. 2023.

GRANGÉ, Felipe F. de O.; HOLZ, Juliana P.; DAMIN, Isabel C. F. Obtenção de carvão ativado a partir do resíduo de erva-mate (Ilex paraguariensis) - economia e

meio ambiente. **10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**. Porto Alegre, 19-21 out. 2016. Disponível em: http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160905184305000000946.pdf. Acesso em: 28 fev. 2023.

HERRERA, Santiago G. **Remoção de íons cromo de soluções aquosas por biochar produzido de casca de café**. 2021. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, SP, 2021. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/522eb367-776e-4d16-88d5-f66ef55393a8/content. Acesso em: 18 set. 2023.

HOWE, Kerry J.; HAND, David W.; CRITTENDEN, John C.; TRUSSEL, R. R.; TCHOBANOGLOUS, George. **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo: Cengage Learning, 2017. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522124084/pageid/35. Acesso em: 07 abr. 2023.

**IBGE.** SIDRA: Sistema de Recuperação Automática. Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. Produção Agrícola Municipal. 2021. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado. Acesso em: 29 abr. 2023.

JEREZ, Florencia; RAMOS, Pamela B.; CÓRDOBA, Verónica E.; PONCE, M.Feferico; ACOSTA, Gerardo G.; BAVIO, Marcela A. Yerba mate: from waste to activated carbon for supercapacitors. **Journal of Environmental Management.** Buenos Aires, vol. 330, p.1-15, 15 mar. 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722027311. Acesso em: 16 fev. 2023.

JERONIMO, Guilherme J.; LIMA, Giselle M. de; LIMA, Alexandre de F.; LUZ, Andréia M.; FERREIRA, Deusmaque C. Remoção de cromo por biossólido: tratamento de efluente de curtume. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 8, n. 1, p.730-752, jan/mar. 2019. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6640/4346. Acesso em: 04 abr. 2023.

KUMAR, Arvind; JENA, Hara. M. Adsorption of Cr(VI) from aqueous phase by high surface area activated carbon prepared by chemical activation with ZnCl2. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, n. Vi, p. 63 - 71, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.032. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582017300988. Acesso em: 01 nov. 2023.

LERMEN, Andréia M.; FRONZA, Carolina S.; DIEL, Júlia C.; SCHEIN, Dalva; CLERICI, Naiara J.; GUIMARÃES, Raíssa E.; BOLIGON, Suzana D. A utilização de resíduos agroindustriais para adsorção do corante azul de metileno: uma breve

revisão. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v.5, n.1, p. 273-288, jan-fev 2021. ISSN: 2525-3621. DOI: 10.34115/basrv5n1-017. Disponível em: https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/download/23457/18839. Acesso em: 28 out. 2023.

MACHADO, Ariadne P.; LEITE, Ygor G. dos S.; DUARTE, Rosangela V. de L. **Avaliação quantitativa dos níveis de emissões de CO2: um estudo de caso em termelétricas no Amazonas no ano de 2019**. Ciências dos Materiais: Pesquisas e desenvolvimento no âmbito da UFAM. 1 ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2021, 183 p. Disponível em: https://web.archive.org/web/20211112044913id_/https://poisson.com.br/livros/individuais/Ciencia_dos_Materiais/Ciencia_dos_Materiais.pdf#page=71. Acesso em: 02 set 2023.

MEURER, Mariana Cassel; SILVA, Fernanda Vargas e. Uso de erva-mate como biossorvente de contaminantes no tratamento da água. **Revista Tecnologia e Tendências**. Novo Hamburgo, a. 10, n. 1, p. 35-60, jan./jun. 2019. DOI: https://doi.org/10.25112/rt&t.v10i1.1486. Disponível em: https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistatecnologiaetendencias/article/view/1486/2338. Acesso em: 01 abr. 2023.

MORAIS, Rayssa de M.; SANTANA, Gregório M.; LELIS, Roberto C. C.; PAES, Juarez B.; SCHUELER, Maria V. E.; MORBECK, Fernanda L. Produção e desempenho de carvão ativado fisicamente a partir de *Bambusa vulgaris*. **Pesquisa Florestal Brasileira.** Colombo, v. 39, e201801668, p. 1-7, 2019. DOI: 10.4336/2019.pfb.39e201801668. Disponível em: https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/download/1668/830/19008. Acesso em: 19 maio 2023.

MOREIRA, Patrícia A.; BUENO, Silvia M. Presença de cromo hexavalente na água potável. **Revista Corpus Hippocraticum**. v. 1, n. 1, 2019. Disponível em: http://189.112.117.16/index.php/revista-medicina/article/view/140. Acesso em: 30 mar. 2023.

MOREIRA, Thaís B.; VECCHIO, Paola D.; ROSA, Ivan R.; FÉRIS, Liliana A. Remoção de cromo VI em batelada usando rejeitos do beneficiamento do carvão como adsorvente. **11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental.** Porto Alegre, out. 2018. Disponível em: http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_2_5627_20180805135335.pdf. Acesso em: 13 abr. 2023.

NARITA, Carla K. C. Y. **Síntese de carvão ativado a partir de resíduos de tecido de algodão**. 2022. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, PR, 2022. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28311/1/sintesecarvaoativadoresiduos.pdf. Acesso em: 22 ago. 2023.

NASCIMENTO, Ronaldo F. do; LIMA, Ari C. A. de; VIDAL, Carla B.; MELO, Diego de Q.; RAULINO, Giselle S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014, 256 p. Disponível em:

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf. Acesso em: 02 nov. 2023.

OLIVEIRA, Nayara Melquiades de. **Avaliação da erva-mate como biossorvente.** Londrina: Eduel, 2018. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=bNl7DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1996&dq=quantidade+de+res%C3%ADduos+da+erva-mate&ots=pu_BigpKC2&sig=d8h6ug4SbMJjNHn8r6oZ_Kof788#v=onepage&q=quantidade%20de%20res%C3%ADduos%20da%20erva-mate&f=false. Acesso em: 29 abr. 2023.

OLIVEIRA, Thiago dos Santos; SOUSA, Cynthia Arielly Alves de; OLIVEIRA, José Lucas dos Santos. Poluição atmosférica: impactos no meio ambiente e na saúde humana. **Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências - V CONPESC.** dez 2020. Disponível em: https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/72792. Acesso em: 16 fev. 2023.

PENTEADO, Maurício C.; LIMA, Gabriel M.; ZARPELLON, Felipe R.; GUERI, Matheus V. D.; SCHIRMER, Waldir N. Potencial energético do biogás gerado a partir da biodigestão de resíduos do processamento industrial de erva-mate. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. vol. 14, n. 2, 767-785, ago. 2021. ISSN 0718-378X. DOI: http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.2.72889. Disponível em: https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/72889. Acesso em: 29 abr. 2023.

PEREIRA, Eduardo Vinícius. **Resíduos sólidos**. São Paulo: Senac, 2019. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=U_W2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8&dq=dados+RES%C3%8DDUOS+S%C3%93LIDOS+INDUSTRIAIS&ots=z0NMWVHn1U&sig=rt2A5PI6ySzNjA7BL4PP0HoPh_s#v=onepage&q=dados%20RES%C3%8DDUOS%20S%C3%93LIDOS%20INDUSTRIAIS&f=false. Acesso em: 07 fev. 2023.

QIAN, Kezhen; KUMAR, Ajay; ZHANG, Hailin; BELLMER, Danielle; HUHNKE, Raymond. Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Oklahoma, vol. 42, p. 1055-1064, fev. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114008995?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=7a576437aee401c1. Acesso em: 04 mar. 2023.

RAI, M. K.; SHAHI, G.; MEENA, V.; CHAKRABORTY, S.; SINGH, R. S.; RAI, B. N. Removal of hexavalent chromium Cr (VI) using activated carbon prepared from mango kernel activated with $H_3PO_4$. **Resource Efficient Technologies**, v. 2, Varanasi, Índia, p. S63-S70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.011. Disponível em: https://sci-hub.se/10.1016/j.reffit.2016.11.011. Acesso em: 29 out. 2023.

RIES, Lúcia A. da S.; SILVEIRA, Joyce H. da. Remoção de Cr(VI) por adsorção empregando carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca

de arroz. **Brazilian Journal of Development.** Curitiba, v. 5, n. 6, p. 6477-6494, jun. 2019. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/1878/2073. Acesso em: 15 fev. 2023.

ROCHA, Maria I.; BENKENDORF, Sara; GERN, Regina M. M.; RIANI, Josiane C.; WISBECK, E. Desenvolvimento de biocompósitos fúngicos utilizando resíduos industriais. **Revista Matéria.** v. 25, n.4, p. 1-12, ago. 2020. ISSN 1517-7076 artigos e-12840. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/Ph3GD6cTsTTZ3D9JqHrvJtM/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 29 abr. 2023.

SANTOS, Igor O. **Adsorção de cromo hexavalente sobre carvão ativado obtido do bagaço de cana-de-açúcar: estudo por processos em batelada e leito fixo**. 2021. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Minas Gerais, Frutal, MG, 2021. Disponível em: https://mestrados.uemg.br/images/ppgciamb/Disserta%C3%A7%C3%B5es/Turma_2019/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Igor_Oliveira_CiambFrutal.pdf. Acesso em: 18 set. 2023.

SANTOS, Jaqueline Ferreira. **Estudo da cinética e equilíbrio de adsorção de corante reativo sobre carvão ativado magnético**. 2022. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Processos Químicos) - Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos (COPEQ), Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Toledo, 2022. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/30420/1/adsorcaocorantecarvaomagnetico.pdf. Acesso em: 27 maio 2023.

SANTOS, Pedro V. S.; ARAÚJO, Maurílio A. de. A Metodologia de produção mais limpa (P+L): um estudo de caso em uma indústria de curtume. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. 1, p. 524-547, jan/mar. 2020. DOI: 10.19177/rgsa.v9e12020524-547. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6374/4960. Acesso em: 18 set. 2023.

SCHMITZ, Thaís; MACHADO, Luiza S.; MOURA, Angela B. D. **Remoção de cromo hexavalente utilizando carvão obtido de resíduo de carvão de acácia negra**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2021. Disponível em: https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Qu%C3%ADmica/REMO%C3%87%C3%83O%20DE%20CROMO%20HEXAVALENTE%20UTILIZANDO%20CARV%C3%83O%20ATIVADO%20OBTIDO%20DE%20RES%C3%8DDUO%20DE%20CARV%C3%83O%20DE%20AC%C3%81CIA%20NEGRA.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

Secretaria do Meio Ambiente Conselho Estadual do Meio Ambiente - **Resolução Consema Nº 334/2016**. Estado do Rio Grande do Sul. [2016]. Disponível em: https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201612/23082801-334-2016-revoga-a-resolucao-129-2006.pdf. Acesso em: 10 maio 2023.

Secretaria do Meio Ambiente Conselho Estadual do Meio Ambiente - **Resolução Consema Nº 355/2017**. Estado do Rio Grande do Sul. [2017]. Disponível em: https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201707/19110149-355-2017-criterios-e-padroes-de-emissao-de-efluentes-liquidos.pdf. Acesso em: 10 maio 2023.

SILVA, Alexandre F. da; VIEIRA, Carlos A. Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. **Ciência e Sustentabilidade - CES,** Juazeiro do Norte, v. 3, n. 1, p. 166-189, jan/jun 2017. ISSN 2447-4606. Disponível em: https://scholar.archive.org/work/cp5pbrj5eneptnc2fzgx23ffwq/access/wayback/https://periodicos.ufca.edu.br/ojs/index.php/cienciasustentabilidade/article/download/180/pdf%20180. Acesso em: 09 mar. 2023.

SILVA, Emerson L.; PIPI, Angelo R. F.; MAGDALENA, Aroldo G.; SILVA, Marina P. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso. **Revista Matéria**, v.25, n.2, p. 1-12, 2020, ISSN 1517-7076. DOI: 10.1590/S1517-707620200002.1056. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/MP7WGSHLyydJzGBpTNR77Rp/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 02 nov. 2023.

SINIR. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos.** Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos. 2020. Disponível em: https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/. Acesso em: 09 fev. 2023.

SOARES, Eliseu A.; ARAÚJO, Geraldino C. de. Gestão de resíduos sólidos no processo produtivo: um estudo de caso em uma indústria calçadista. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 14, n. 2, p. 171-181, ago./dez. 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v14i2.2622. Disponível em: http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/2622. Acesso em: 09 fev. 2023.

SOUZA, Joel T.; TALGATTI, Maiara; SILVEIRA, Amanda G. da; MENEZES, Walmir M. de; HASELEIN, Clóvis R.; SANTINI, Elio J. Propriedades mecânicas do MDP produzido com partículas de madeira de Ilex paraguariensis, Pinus elliottii e Eucalyptus grandis. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 122, p. 273-285, jun. 2019. DOI: doi.org/10.18671/scifor.v47n122.10. Disponível em: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr122/cap10.pdf. Acesso em: 29 abr. 2023.

TADINI, Carmen C.; TELIS, Vânia R. N.; MEIRELLES, Antonio J. de A.; FILHO, Pedro de A. P. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, LTC: 2019. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521632689/epubcfi/6/46[%3Bvnd.vst.idref%3Dchapter23]!/4/138/3:152[mad%2Ca. Acesso em: 11 nov. 2023.

VEIT, Márcia T.; BEDIN, S.; GONÇALVES, G. C.; PALÁCIO, S. M.; KLEIN, M. R. F. Utilização do resíduo de erva-mate como material adsorvente do corante azul de metileno. **Eclética Química**. Araraquara, v. 39, 2014, p. 227-243. ISSN: 0100-4670.

Disponível em: https://www.redalyc.org/pdf/429/42955127017.pdf. Acesso em: 06 abr. 2023.

WANG, Jianlong; WANG, Shizong. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. **Journal of Cleaner Production.** Beijing**,** v. 227, p. 1002-1022, 01 ago. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619313733?casa_token=wCqQoK5tx0wAAAAA:HrPm3nNpDQAV7xJ4ZBtXHQHYQ-x-fl58d64NHaeyHVN9j8tjbiluyEcaxopQlK4TbLc6_4cpaItn. Acesso em: 22 fev. 2023.

WEBER, Kathrin; QUICKER, Peter. Properties of biochar. **Fuel**. V. 217, p. 240-261, 01 abr. 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236117316216?casa_token=su7BEYVhVd8AAAAA:EUceVGVLXab-MxcxJm3daLIbH3cUcSaBk71j5VimYWIsseHByeY_pNtSWODQ3p1q5ZLlYEzYiw. Acesso em: 07 abr. 2023.

WERLANG, Eliana B.; SCHNEIDER, Rosana de C. S.; RODRIGUEZ, Adriane L.; NIEDERSBERG, Carolina. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**, Santa Cruz do Sul, v. 3, n. 1, p. 156-167, 2013. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/228507768.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.

UNIVATES

velino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09