



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS CRATEÚS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**ALESSANDRA OLIVEIRA TIMBÓ ALVES**

**PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO, A PARTIR DAS PODAS DO ZIZIPHUS  
JOAZEIRO E AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTES RESIDENCIAIS DE CRATEÚS**

**CRATEÚS**

**2025**

ALESSANDRA OLIVEIRA TIMBÓ ALVES

PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO, A PARTIR DAS PODAS DO ZIZIPHUS  
JOAZEIRO E AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES  
RESIDENCIAIS DE CRATEÚS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, como requisito à obtenção do título de grau em bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Profa. Dra. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias.

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A477p Alves, Alessandra Timbó.  
Produção do carvão ativado, a partir das podas do ziziplus joazeiro e avaliação da utilização no tratamento de efluentes residenciais de crateús / Alessandra Timbó Alves. – 2025.  
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias .

1. Carvão ativado. 2. Tratamento de efluente. 3. DCCR. I. Título.

CDD 628

---

ALESSANDRA OLIVEIRA TIMBÓ ALVES

PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO, A PARTIR DAS PODAS DO ZIZIPHUS  
JOAZEIRO E AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES  
RESIDENCIAIS DE CRATEÚS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, como requisito à obtenção do título de grau em bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Profa. Dra. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dra. Luisa Gardênia Alves Tomé Farias (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Janaína Lopes Leitinho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Ana Clara Rosendo de Sousa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria das Graças Oliveira Timbó (*in memoriam*).

Uma mãe maravilhosa, guerreira e de muita fé. Seus ensinamentos, princípios e bondade permanecerão para sempre em minha vida.

Este é apenas o início de grandes conquistas, todas dedicadas à sua memória.

Com todo o meu amor, dedico esta pequena parte da minha vida à sua presença eterna.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda a sua bondade para comigo; por me fortalecer e manter resiliente diante dos diversos percalços desta caminhada.

À minha mãe maravilhosa, por ter me dado a dádiva da vida, por continuar sendo meu exemplo de amor, bondade, sensibilidade, dedicação e de todos os incontáveis adjetivos que existem neste mundo.

À minha família, em especial ao meu irmão Bruno Timbó, por ser meu ponto de apoio e referência de dedicação, irmandade e amor, e por ter me dado o maior presente da minha vida: minha sobrinha Maria Laura.

Agradeço também todo o apoio dos meus tios, primos/irmãos: Lúcia, Jesus, José, Regina, Aglaice, Thays, Carol, Caio, Levi e Sávio.

Ao meu irmão de alma e vida, João Victor Martins, por me motivar, acreditar em mim e me ajudar a ser uma pessoa melhor ao longo dessa jornada.

Aos meus amigos de vida: Iasmim, Letícia, Erika, Vanutti, Jordana, Dheymes, Sinhá e Iara. Obrigada por estarem comigo em tantos momentos importantes.

À Professora Dra. Luisa Gardênia, pela orientação, paciência e por acreditar em meu potencial como aluna e bolsista. Expresso aqui minha sincera admiração por toda a sua trajetória e profissionalismo.

À Professora Dra. Janaina Leitinho, pelos ensinamentos durante a graduação e, agora, por sua valiosa colaboração nesta reta final.

A todos os docentes que contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal, em especial: Raimunda Franca, Márcio Melo e Alan Michell, meu sincero agradecimento.

À Secretaria da Agricultura, Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Tamboril, pela oportunidade de estágio e por todo o aprendizado proporcionado.

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficácia do carvão ativado obtido das podas do *Ziziphus Joazeiro* para o tratamento de efluentes residenciais em Crateús, Ceará. A produção de carvão foi realizada com base nas condições otimizadas previamente determinadas por Pereira (2021) utilizando o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) em conjunto com a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), o que possibilitou a obtenção de carvão com menor custo e maior eficiência adsortiva. Posteriormente, foram construídos biofiltros utilizando materiais pétreos, fibra de coco e carvão ativado sintetizado. As análises físico-químicas do efluente mostraram que o biofiltro com carvão ativado foi eficaz, resultando em uma diminuição de 87,7% na demanda bioquímica de oxigênio (DBO), 35% nos sulfatos e 27% na alcalinidade. A análise morfológica do carvão ativado por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrou uma superfície áspera, estrutura irregular e elevada porosidade, com um tamanho médio de grão de 3,46  $\mu\text{m}$  e diâmetro médio de poros de 21 nm, sugerindo a predominância de mesoporos. Essa configuração facilita a eficácia da adsorção. Ademais, notou-se um aumento da porosidade em comparação com o material precursor, o que demonstra a eficácia do agente ativante e do processo térmico utilizado. Pode-se afirmar que o carvão ativado de origem vegetal, especialmente produzido a partir do *Ziziphus Joazeiro*, representa uma opção viável, sustentável e tecnicamente eficiente para o tratamento de águas residuais.

**Palavras-Chave** – Carvão ativado, Tratamento de efluente, DCCR.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effectiveness of activated carbon obtained from the pruning of *Ziziphus joazeiro* for the treatment of domestic wastewater in Crateús, Ceará. The production of the activated carbon was based on the optimized conditions previously determined by Pereira (2021), using a Central Composite Rotational Design (CCRD) in conjunction with Response Surface Methodology (RSM), which enabled the production of carbon with lower cost and higher adsorptive efficiency. Subsequently, biofilters were constructed using stone materials, coconut fiber, and the synthesized activated carbon. The physicochemical analyses of the effluent showed that the biofilter with activated carbon was effective, resulting in an 87.7% reduction in biochemical oxygen demand (BOD), 35% in sulfates, and 27% in alkalinity. The morphological analysis of the activated carbon through Scanning Electron Microscopy (SEM) revealed a rough surface, irregular structure, and high porosity, with an average grain size of 3.46  $\mu\text{m}$  and an average pore diameter of 21 nm, suggesting a predominance of mesopores. This configuration enhances adsorption efficiency. Furthermore, an increase in porosity was observed compared to the precursor material, demonstrating the effectiveness of the activating agent and the thermal process used. It can be concluded that plant-based activated carbon, especially that produced from *Ziziphus joazeiro*, represents a viable, sustainable, and technically efficient option for wastewater treatment.

**Keywords;** Activated carbon; Wastewater treatment; DCCR.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Diagrama simplificado ilustrando as etapas principais do processo de ativação química.....  | 21 |
| Figura 2 – Esquematização dos tamanhos dos poros.....  | 22 |
| Figura 3 – <i>Ziziphus Joazeiro</i> ; com a presença de frutos, sementes e folhagem.....   | 24 |
| Figura 4 – Principais grupos funcionais encontrados na superfície dos carvões.....   | 26 |
| Figura 5 – Representação de filtro de areia de camada simples e dupla.....   | 31 |
| Figura 6 – Poda do <i>Ziziphus Joazeiro</i> , incluindo galhos e folhagem, utilizados como matéria-prima para a produção do carvão ativado.....  | 36 |
| Figura 7 – Etapas do processo de produção do carvão ativado: (1) preparo da amostra com o agente ativante; (2) carbonização do material em mufla, utilizando cadinhos de 30 mL; (3) carvão ativado após o processo de carbonização.....    | 38 |
| Figura 8 – Esquematização dos protótipos do biofiltro compostos por camadas de brita 0, areia grossa, areia fina e carvão ativado.....   | 47 |
| Figura 9 – Protótipo do biofiltro composto por brita 0, areia grossa, areia fina e carvão ativado.....   | 47 |
| Figura 10 – Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado produzido a partir do <i>Ziziphus joazeiro</i> , com aumento de 700 $\mu\text{m}$ , evidenciando a estrutura superficial porosa do material..... | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 11 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado.....  | 51 |
| Figura 12 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado comercial.....  | 53 |
| Figura 13 – Análise de infravermelho das amostras de carvão - (a) amostra natural do Ziziphus Joazeiro e carvão ativado sob as condições definidas do experimento .....                                   | 54 |
| Figura 14 – pH do ponto de carga zero estabelecidos pelo planejamento DCCR.....   | 56 |
| Figura 15 – Análise do parâmetro alcalinidade em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.....                         | 57 |
| Figura 16 – Análise do parâmetro Cloretos em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.....                             | 59 |
| Figura 17 – Análise do parâmetro Dureza em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.....                               | 60 |
| Figura 18 – Curva de calibração para a determinação do parâmetro sulfatos.....  | 63 |
| Figura 19 – Análise do parâmetro Sulfatos em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.....                             | 64 |
| Figura 20 – Análise do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado..... | 65 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Classificação das águas e suas destinações.....   | 33 |
| Tabela 2 – Temperatura de pirólise, rendimento do carvão ativado e teor de cinzas dos ensaios selecionados com melhor desempenho.....  | 37 |
| Tabela 3 – Condições de temperatura e proporção ativante/precursor utilizadas em cada ensaio do planejamento experimental (DCCR) para a otimização do processo de produção do carvão ativado.....                  | 39 |
| Tabela 4 – Níveis codificados para as duas variáveis independentes: temperatura e razão do precursor/ativante.....   | 40 |
| Tabela 5 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado precursor de <i>Ziziphus joazeiro</i> , apresentando os diâmetros médios dos poros identificados na superfície do material..... | 51 |
| Tabela 6 – Características morfológicas dos poros do carvão ativado de <i>Z. Joazeiro</i> obtidas por MEV.....   | 52 |
| Tabela 7 – Valores de pH dos carvões ativados produzidos nos ensaios de melhor rendimento, conforme os parâmetros estabelecidos pelo planejamento DCCR.....  | 56 |
| Tabela 8 – Valores de absorvância e concentração das amostras analisadas.....  | 63 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                    |  |
|--------------------|--|
| ABNT               | Associação Brasileira de Normas Técnicas       |
| BSF                | Bio Sand Fillers                               |
| CA                 | Carvão Ativado                                 |
| CONAMA             | Conselho Nacional de Meio Ambiente             |
| DCCR               | Delineamento Composto Central Rotacional       |
| DBO                | Demanda Bioquímica de Oxigênio                 |
| IUPAC              | União Internacional de Química Pura e Aplicada |
| MEV                | Microscopia Eletrônica de Varredura            |
| MSR                | Metodologia de Superfície Resposta             |
| NBR                | Norma Brasileira Regulamentadora               |
| pH                 | Potencial Hidrogeniônico                       |
| rpm                | Rotações por minuto                            |
| UFC                | Universidade Federal do Ceará                  |
| <i>Z. Joazeiro</i> | <i>Ziziphus Joazeiro</i>                       |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                   | <b>15</b> |
| 1.1 Contextualização                                  | 15        |
| 1.2 Justificativa                                     | 17        |
| 1.3 Objetivos   | 18        |
| 1.3.1 Objetivo geral                                  | 18        |
| 1.3.1 Objetivos específicos                           | 18        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                        | <b>20</b> |
| 2.1 Produção do carvão ativado                        | 20        |
| 2.1.1 Carvão ativado                                  | 20        |
| 2.1.2 Porosidade                                      | 21        |
| 2.1.3 Matéria-Prima                                   | 23        |
| 2.1.4 Adsorção  | 25        |
| 2.2 Reúso de água                                     | 27        |
| 2.2.1 Características das águas cinzas                | 28        |
| 2.2.2 Tratamento por filtração                        | 30        |
| 2.2.1 Legislação de reúso no Brasil                   | 31        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>                          | <b>35</b> |
| 3.1 Matéria-Prima                                     | 35        |
| 3.2 Ativação Química e Planejamento fatorial aplicado | 35        |
| 3.3 Análises Experimentais do Carvão Ativado (CA)     | 36        |
| 3.3.1 Teor de Cinzas                                  | 40        |
| 3.3.2 Densidade Aparente                              | 41        |
| 3.3.3 Rendimento do Carvão Ativado (CA)               | 41        |
| 3.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)       | 42        |
| 3.3.5 pH e pH de carga zero                           | 42        |
| 3.4 Análise Química                                   | 42        |
| 3.4.1 Alcalinidade                                    | 42        |
| 3.4.2 Cloretos  | 43        |
| 3.4.3 Dureza  | 43        |
| 3.4.4 Sulfatos  | 44        |
| 3.4.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)            | 44        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4 Biofiltro .....  | 45        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                      | <b>49</b> |
| 4.1 Análises experimentais do Carvão Ativado (CA).....                     | 49        |
| 4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....                      | 49        |
| 4.1.2 Caracterização do infravermelho do carvão ativado.....               | 53        |
| 4.1.3 pH e pH do ponto de carga zero do carvão ativado .....               | 55        |
| 4.2 Avaliação da Eficiência do Tratamento - Análises Físico-Químicas ..... | 57        |
| 4.2.1 Alcalinidade .....   | 57        |
| 4.2.2 Cloretos .....   | 58        |
| 4.2.3 Dureza .....   | 60        |
| 4.2.4 Sulfatos.....  | 62        |
| 4.2.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....                            | 65        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>  | <b>67</b> |
| <b>6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>                               | <b>69</b> |
| <b>7 REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>70</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A água é um recurso natural indispensável para a preservação da vida nos ecossistemas e para o bem-estar humano, exercendo um papel crucial nos processos biológicos, econômicos e sociais. No entanto, tem sido um dos recursos mais afetados pela deterioração ambiental, agravada principalmente pelo crescimento populacional descontrolado, urbanização rápida e uso impróprio dos recursos hídricos (VON SPERLING, 2005). Esse contexto intensifica os problemas ligados à disponibilidade e à qualidade da água, tornando imprescindível a implementação de estratégias de conservação e gestão sustentável.

No Brasil, essa urgência é particularmente acentuada na região do Semiárido Nordeste, onde a seca e a crise da água são desafios persistentes para a população, como observado no polígono das secas que abrange a Caatinga, bioma onde o *Ziziphus Joazeiro* é nativo e amplamente distribuído. Nesse sentido, a busca pela sustentabilidade nas cidades tem incentivado a implementação de medidas para conservar os recursos hídricos.

Nesse sentido, a busca pela sustentabilidade nas cidades tem incentivado a implementação de medidas para conservar os recursos hídricos. Entre essas medidas, destacam-se o uso de fontes alternativas, como o reaproveitamento de águas residuárias, e a separação, na origem, dos diversos tipos de efluentes domésticos. A separação entre águas cinzas e negras, possibilita a utilização de tratamentos específicos conforme o nível de contaminação, tornando mais fácil sua reutilização para usos não potáveis, como irrigação paisagística, descargas sanitárias e limpeza urbana (GONÇALVES *et al.*, 2006).

As águas residuárias originadas de lavatórios, chuveiros, tanques e equipamentos para lavar roupas e louças, são as que mais frequentemente passam pelo processo de reúso. Contudo, esse conceito ainda não possui uma definição padronizada internacionalmente. Hespanhol (2002) adota uma perspectiva mais rigorosa, declarando que efluentes que contêm resíduos de bacias sanitárias só podem ser reutilizados para os mesmos propósitos após receberem um tratamento apropriado. Por outro lado, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2016)

caracteriza as águas cinzas como aquelas provenientes de tanques, máquinas de lavar, banhos e lavatórios, excluindo explicitamente as águas das pias de cozinha e dos vasos sanitários.

Segundo o Manual da FIESP (Brasil et al., 2005), a água residuária destinada ao reuso é definida como efluente doméstico que não é afetado por resíduos provenientes da bacia sanitária. Em outras palavras, refere-se às águas provenientes de chuveiros, lavatórios, e máquinas de lavar roupas. Para algumas finalidades de reuso doméstico, é possível empregar metodologias diferentes para a utilização dessas águas, empregando tratamentos simples, como a filtração.

Para Rapoport (2004), o sistema de reuso doméstico mais utilizado é o que armazena as águas residuárias de forma temporária, sem modificar significativamente sua composição química. A adsorção, particularmente com carvão ativado, um dos adsorventes mais eficientes na eliminação de poluentes e micropoluentes em águas residuais, é um método complementar notável (XIANG *et al.*, 2019). Assim, a água de reuso é considerada um recurso hídrico alternativo e complementar, contribuindo para a conservação dos recursos naturais e a redução da demanda por água potável.

Devido à sua elevada capacidade de adsorção, o carvão ativado é muito usado no tratamento de água e efluentes. Danish e Ahmad (2018) afirmam que, devido à sua alta capacidade de adsorção, o carvão ativado é amplamente empregado como adsorvente em processos de purificação, desintoxicação, filtração, descoloração, separação e concentração de substâncias líquidas ou gasosas.

Entretanto, a fabricação desses adsorventes pode ter um valor elevado, especialmente devido à procedência e ao custo da matéria-prima (GONÇALVES, 2007 E HAMEED, 2011). Ademais, o uso pode se tornar ainda mais caro devido às perdas durante o processo de recuperação do adsorvente. Baccar *et al.* (2009) ressaltam que, por essa razão, há um aumento no interesse em buscar materiais alternativos de baixo custo para a produção de carvão ativado.

Dessa forma, com o aumento significativo na diversidade do uso de matérias-primas, com precursores como casca de arroz, caroço de frutas e madeiras em geral, destacando-se por

seu alto teor de carbono. Werlang (2013) ressalta que as madeiras de pinus e eucalipto, em particular, apresentam um desempenho notável como adsorventes.

Para melhorar esses processos, frequentemente são aplicadas técnicas multivariadas de otimização, que analisam a relação entre os fatores escolhidos (CUNICO *et al.*, 2008). Assim, ao utilizar planejamentos experimentais fundamentados em princípios estatísticos, consegue-se obter uma quantidade maior de informações relevantes com o mínimo de experimentos, permitindo a avaliação simultânea de fatores ((NEBES, 2019; BARROS NETO *et al.*, 2001).

## 1.2 Justificativa

Um dos maiores desafios enfrentados pela população do Semiárido Nordeste é a seca, que agrava a crise da água. Nesse contexto, é imprescindível a reutilização da água, até mesmo em tarefas domésticas, como estratégia para reduzir os impactos. A utilização de águas residuárias se mostra uma opção viável para ampliar a disponibilidade de água, reduzir a poluição ambiental e possibilitar o cultivo de plantas, especialmente na recuperação de áreas degradadas (MELAKU; NATARAJAN, 2019; SOUZA *et al.*, 2020).

Nesse cenário, cresce também o interesse por espécies vegetais adaptadas ao clima semiárido e que, além do papel ecológico, apresentem propriedades funcionais. Nos últimos anos, juntamente com a diversificação dos precursores, destaca-se a busca por plantas com princípios ativos de potencial antimicrobiano ou que contribuam para o controle microbiológico (MENDES, 2010).

O *Ziziphus Joazeiro* é uma planta nativa e endêmica da Caatinga, amplamente distribuída pelos estados do sertão nordestino que integram o polígono das secas. A espécie possui porte médio, com uma expectativa de vida de cerca de 100 anos, além de apresentar características adaptativas. Embora seja típica de regiões áridas e semiáridas, ela também consegue se desenvolver em solos mais úmidos. Seus galhos se formam-se desde perto do solo até o topo, podendo alcançar aproximadamente 10 metros de altura (MONIZ, 2002).

Diante dessas propriedades, o *Ziziphus Joazeiro* apresenta um grande potencial para o tratamento de efluentes, especialmente no combate a microrganismos patogênicos. Assim, essa

espécie se destaca como uma alternativa promissora para ser utilizada como adsorvente, uma vez que, além de possuir um alto teor de matéria carbonácea, também conta com propriedades antimicrobianas naturais.

É fundamental otimizar as condições para a produção de carvão ativado a partir do *Ziziphus Joazeiro*, pois o processo envolve altas temperaturas e reagentes, o que pode afetar a viabilidade econômica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo produzir carvão ativado a partir do *Ziziphus Joazeiro* seguindo as condições ideais (de menor concentração de agente oxidante, temperatura e tempo de forno para maximizar o rendimento e reduzir o teor de cinzas) previamente estabelecidas por planejamento estatístico experimental (DCCR e MSR), e avaliar sua aplicação no tratamento de efluentes residenciais.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo geral**

Este trabalho objetivou analisar a eficiência do carvão ativado das podas do *Ziziphus Joazeiro*, produzido sob as condições otimizadas por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) de Pereira (2021), avaliando sua eficiência no tratamento de efluentes residenciais através de análises físico-químicas

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Realizar o preparo do material precursor (*Ziziphus Joazeiro*), incluindo a coleta, secagem, trituração e armazenamento, para a produção do carvão ativado.
- Executar a ativação química do precursor por meio do cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ).
- Caracterizar a estrutura porosa do carvão ativado através do pH e do pH de carga zero, Espectroscopia da região de Infravermelho e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Produzir três biofiltros distintos, utilizando brita, areia fina e areia grossa, variando apenas o material filtrante entre carvão ativado de *Ziziphus Joazeiro* e fibra de coco.
- Avaliar e comparar a eficiência de retenção de poluentes de três tipos de biofiltros: filtro padrão, fibra de coco e *Ziziphus joazeiro*, por meio da análise dos parâmetros físico-

químicos do efluente (alcalinidade, cloretos, DBO, dureza e sulfatos), antes e após a filtração.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

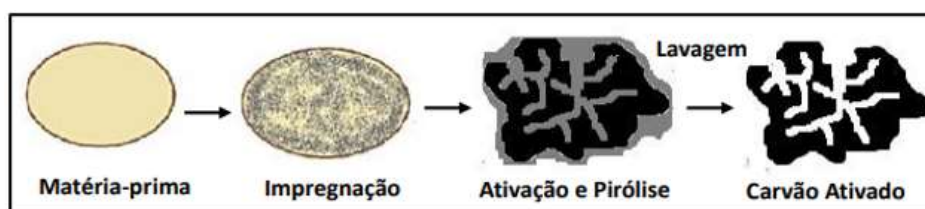
### 2.1 Produção do Carvão Ativado

#### 2.1.1 Carvão ativado

O carvão ativado (CA) é um material poroso à base de carbono, com uma estrutura cristalina não grafítica, amplamente utilizado em diversos setores, como o saneamento ambiental, direcionado ao tratamento de água e efluentes, além das indústrias farmacêutica, química e alimentícia. Suas principais propriedades incluem alta porosidade, grande área de superfície e características químicas na superfície que influenciam sua reatividade, variando conforme a matéria-prima e os precursores utilizados. Para alcançar alta porosidade, a matéria-prima passa por um processo de ativação, dividido em duas fases: ativação química e ativação física (LOPES, 2017).

Na fase de ativação química, o procedimento é realizado utilizando ativadores específicos, sendo os mais comuns o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), o ácido sulfúrico ( $H_3PO_4$ ), o cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ) e o hidróxido de sódio ( $NaOH$ ). Os agentes facilitam a ativação do material por meio de reações químicas que, ao contrário da ativação física, não requerem altas temperaturas. A temperatura do processo varia dependendo do tipo de agente oxidante utilizado e da relação entre a massa do agente e a do precursor, dependendo do tipo de agente oxidante utilizado e da relação entre a massa do agente e a do precursor (COSTA, 2014). O mecanismo químico de ativação é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama simplificado ilustrando as etapas principais do processo de ativação química.



Fonte: Oliveira, 2016.

A fabricação de carvão ativado (CA) ocorre em duas fases principais. A primeira fase, denominada pré-tratamento, dá início à formação dos poros através de processos de moagem

e/ou impregnação. Na ativação, que pode ser realizada de forma química ou física, utilizam-se agentes oxidantes e altas temperaturas para eliminar os gases voláteis restantes da fase de pré-tratamento, favorecendo assim uma maior geração de matéria carbonácea. Já a fase de pós-tratamento visa à remoção dos resíduos do agente ativante, além de garantir a desobstrução dos poros (GONÇALES, 2008; SILVA, 2015; COSTA JUNIOR, 2014).

### **2.1.2 Porosidade**

O carvão por si só já apresenta microporos em sua estrutura, no entanto, a dimensão desses microporos (< 2nm) torna esse material demasiadamente seletivo a pequenas moléculas. Assim, a necessidade de síntese de carvão ativado, uma vez que este possui, além dos microporos, os macros e os mesoporos, diminuindo, consideravelmente, a sua seletividade (SILVA, 2015).

Assim, é importante ressaltar que a porosidade é um dos principais fatores que afetam o desempenho do gatilho ativado. A distribuição e o tamanho dos poros estão diretamente ligados à sua estrutura e capacidade de adsorção. A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), ciente dessa relevância, criou uma classificação para o gatilho ativado com base nas propriedades dos poros, como dimensões e formato.

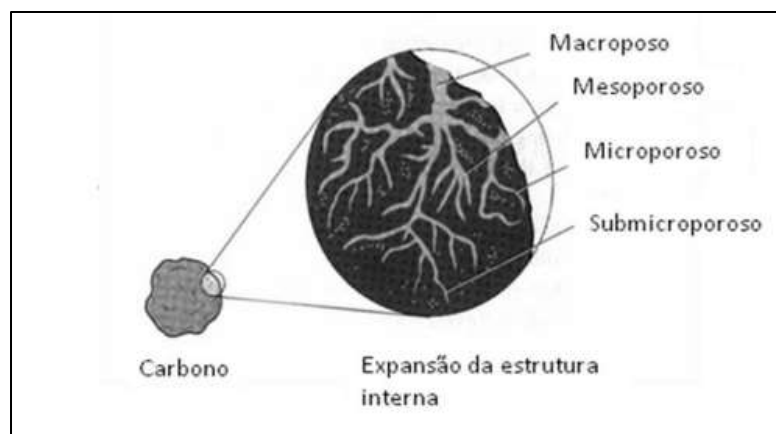
Os poros do CA são classificados conforme a sua forma, a saber: aberto, fechado, de transporte e gaiola. Os poros abertos possuem cavidades ligadas à superfície externa do CA, já os poros fechados possuem essas cavidades isoladas da parte externa ou mesmo com outros poros. Os poros de transporte são aqueles que facilitam o transporte do fluido dentro do CA, enquanto os poros que possuem ramificações são classificados como gaiola (GONÇALES, 2008). A Figura 3 apresenta as principais formas dos poros.

A segunda classificação é referente ao tamanho dos poros, classificados, de acordo com a IUPAC, como:

- Microporos: diâmetros inferiores a 2 nm;
- Mesoporos: diâmetros na faixa de 2 a 50 nm;
- Macroporos: diâmetros maiores que 50 nm.

A Figura 2 apresenta a classificação dos poros quanto ao tamanho.

Figura 2 - Esquematização dos tamanhos dos poros



Fonte: Lima, 2013.

Os microporos apresentam grande capacidade de adsorver gases e solventes comuns devidos às suas dimensões pequenas ( $< 2\text{nm}$ ). Os mesoporos são indicados para adsorção de moléculas de corantes, já os macroporos não são indicados para a adsorção, normalmente são aplicados para o transporte de moléculas gasosas (SILVA, 2015; MURANAKA, 2010).

Nesse contexto, para o tratamento de efluentes residenciais, a predominância de mesoporos é de particular relevância. Efluentes residenciais, como os provenientes de pias de cozinha e lavanderia (águas cinzas escuras), contêm uma complexa mistura de substâncias orgânicas (como restos de alimentos, óleos e gorduras) e íons inorgânicos (como sulfatos e os que contribuem para a alcalinidade). Moléculas orgânicas maiores e agregados de poluentes, que contribuem significativamente para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), podem ser demasiadamente grandes para serem eficientemente adsorvidos em microporos ( $< 2\text{ nm}$ ). Os mesoporos (2-50 nm), com um diâmetro como o de 21 nm observado no carvão ativado de *Ziziphus Joazeiro*, oferecem o espaço e os canais de transporte ideais para a adsorção direta dessas macromoléculas, facilitando sua remoção do efluente.

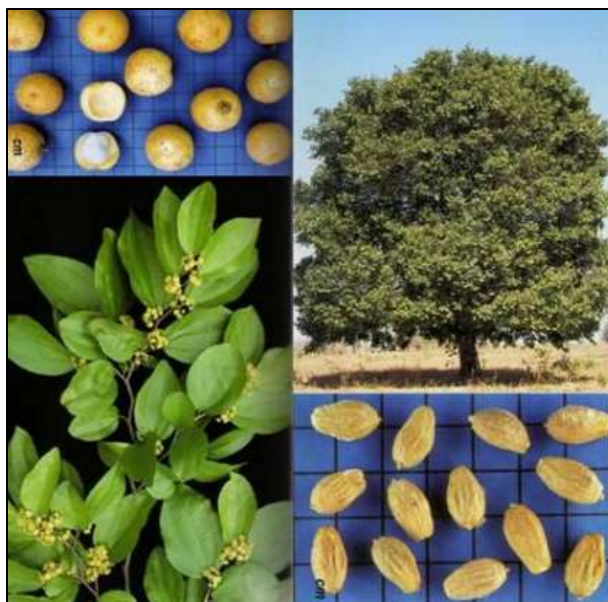
Além disso, para íons menores como sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e os que influenciam a alcalinidade ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), a rede de mesoporos é crucial. Ela facilita a difusão e o transporte desses íons através da estrutura do adsorvente, permitindo que alcancem os sítios ativos internos, incluindo os microporos e a superfície dos próprios mesoporos. Essa estrutura porosa interconectada garante uma maior área de contato e acessibilidade para uma ampla gama de contaminantes, reduzindo a seletividade do material e ampliando sua aplicabilidade no tratamento de águas residuais complexas, como demonstrado pela eficácia na redução de DBO, sulfatos e alcalinidade.

### 2.1.3 Matéria-Prima

De acordo com a literatura (BRUM et al., 2008; NEBES, 2019; WERLANG, 2013), os precursores indicados para a síntese do carvão ativado são aqueles que possuem um alto teor de matéria carbonácea, sendo os precursores das cascas de arroz, de caroços de frutas e madeiras, em geral, pelo alto teor de carbono, os mais referenciados pela literatura, por serem ricos em lignina, celulose e hemicelulose. O elevado custo do carvão ativado produzido em escala industrial inviabiliza sua utilização em larga escala, o que torna imperativa a busca por matérias primas e/ou resíduos locais com potencial para precursor (BOLIGON, 2015).

O *Ziziphus Joazeiro* é uma espécie brasileira, endêmica da Caatinga, localizada na grande parte do sertão nordestino, compreendendo áreas do polígono das secas. É uma planta de porte mediano, característica de regiões áridas e semiáridas, além de ser adaptada a solos úmidos. Possui formação de galhos próximo ao solo até o topo, com ramos flexuosos e subdivididos e com um sistema radicular profundo (MONIZ, 2002). A Figura 3 apresenta o *Ziziphus Joazeiro*.

Figura 3 - *Ziziphus Joazeiro*; com a presença de frutos, sementes e folhagem.



Fonte: Lorenzi, Matos, 2002.

A citada espécie é regionalmente utilizada para fins medicinais, odontológicos e cosméticos, a saber: como antisséptico bucal, no tratamento de problemas dermatológicos, do sistema respiratório e digestivo, além de ser usado como cicatrizante (SILVA, 2009). Essas aplicações caseiras embasaram estudos nas áreas dos setores alimentícios, farmacêuticos e de controle de doenças (MENDES, 2010).

Para Silva (2009), em estudos sobre atividade antifúngica da entrecasca, verificou-se a eficiência e a comprovada ação contra monilíase e dermatoses, aferindo a um bom desempenho dos princípios ativos da entrecasca ao combate a *Candida albicans*, *Cryptococcus neoformans*, *Fonsecaea pedrosoi*, sendo a eficiência desta similar à utilização de antibiótico específico para o tratamento. O extrato aquoso da entrecasca do *Z. Joazeiro* foi estudado para avaliar sua atividade antibacteriana sobre a microbiota oral, apresentando resultados promissores no combate às bactérias relacionadas a doenças periodontais, fundamentando cientificamente o uso popular dessa espécie (SILVA, 2009).

Ainda de acordo com Silva (2009), Moniz (2002) e Mendes (2010), a espécie endêmica da Caatinga, possui princípios ativos que demonstram uma atividade antifúngica e antibacteriana, sendo usados todos os componentes das plantas desde as raízes até as folhas. Dessa forma, o *Ziziphus Joazeiro*, além de apresentar matéria carbonácea, que é essencial para a produção do carvão ativado, possui princípios ativos que podem auxiliar no tratamento de fluidos.

#### **2.1.4 Adsorção**

De acordo com Temoteo Segundo (2018), a adsorção é um dos principais métodos no tratamento de efluentes, com maior eficiência na remoção de poluentes, quando comparado aos métodos convencionais de tratamento, como precipitação e filtração por membrana. Para este autor, o processo de adsorção é empregado quando os métodos convencionais não conseguem adequar-se aos limites da CONAMA nº 357 (2005), que trata dos parâmetros de descarte de efluentes.

A adsorção é uma operação de transferência de massa, em que é explorada a capacidade de certos sólidos em concentrar determinados componentes de um fluido em sua superfície, permitindo a separação destes do fluido. Dessa forma, pode-se definir adsorção

como um fenômeno físico-químico de retenção de moléculas. A quantidade total adsorvida varia entre 5 e 30% do peso do adsorvente, e em alguns casos especiais pode alcançar a 50% (SCHNEIDER, 2008; MORAIS, 2014). Para fins de definição, o material utilizado nesse processo é chamado adsorvente, enquanto as moléculas nele retidas são denominadas adsorbato (TEMOTEO SEGUNDO, 2018).

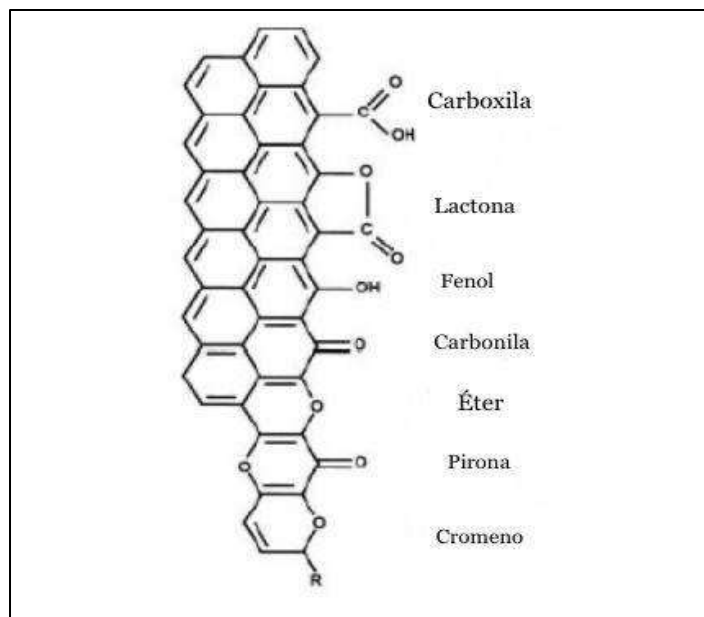
Segundo Costa Júnior (2014), o mecanismo de adsorção realizado por um adsorbato pode ser descrito pela transferência de massa e/ou difusão intrapartícula, ocorrendo em três etapas: 1. A transferência de massa pela uma formação de uma camada ou filme ao redor do adsorvente; 2. A transferência de massa pela parte interna do adsorvente, durante o transporte até os sítios ativos; 3. Adsorção nos sítios ativos do adsorvente.

A transferência de massa inicialmente ocorre no contato do adsorbato com o adsorvente, nas camadas externas deste, em contrapartida, a difusão ocorre em camadas mais internas (COSTA JUNIOR, 2014). As propriedades do adsorvente são fatores determinantes no processo de adsorção, a saber: área superficial, porosidade, volume específico dos poros, distribuição do tamanho dos poros e dos grupos funcionais na superfície do adsorvente e natureza do material precursor (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Além dessas propriedades, a química da superfície apresenta papel fundamental na adsorção. A química da superfície apresenta grupos funcionais orgânicos, com heteroátomos, como oxigênio, hidrogênio e componentes inorgânicos na estrutura da camada superficial do adsorvente, e, de acordo com Mangueira (2014), os grupos oxigenados se apresentam em maior quantidade, logo, possuem maior influência na área superficial do CA. Esses grupos possuem natureza ácida ou básica, que determinam o caráter ácido-base do adsorvente (COSTA JUNIOR, 2014; MORAIS, 2014).

De acordo com Morais (2014), superfícies com grande quantidade de oxigênio em sua estrutura molecular, possuem um caráter ácido e favorecem a troca de ânions. Já a basicidade dessas superfícies estão relacionadas a baixas concentrações de oxigênio, propiciando a troca de cátions. A Figura 4 apresenta os principais grupos funcionais encontrados na superfície do carvão ativado.

Figura 4 - Principais grupos funcionais encontrados na superfície dos carvões.



Fonte: Adaptado de Morais, 2014.

A adsorção física é considerada um processo rápido e é caracterizada por ligações intermoleculares, dipolos permanentes e/ou dipolos induzidos. Esse processo não envolve reações que modifiquem a estrutura do adsorvente e adsorbato, uma vez que abrange apenas forças de atração, como as forças de van der Waals, por exemplo. Dessa forma, o processo pode ser reversível, uma vez que a interação é eletrostática (MORAIS, 2014).

Já na adsorção química há interações entre as moléculas do adsorvente e do adsorbato, ocorrendo transferência de elétrons, semelhantemente à formação de ligações químicas. Normalmente, as ligações são covalentes e têm como principais características a formação de uma única camada sobre a superfície do adsorvente e a irreversibilidade da reação (MANGUEIRA, 2014).

## 2.2 Reúso de água

De acordo com a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), o reúso de água, anteriormente considerado uma medida emergencial, tem-se estabelecido como uma solução estrutural diante das constantes crises de água. Essa alteração está fortemente ligada ao aumento da população e ao progresso econômico do país (ANA, 2019). A demanda por água no Brasil é crescente, excedendo a demanda humana. Estima-se um aumento

de aproximadamente 80% no consumo de água comparado ao total obtido nas últimas duas décadas.

Segundo Telles *et al.* (2010), o reúso de águas é o aproveitamento do volume originado de um efluente. Em alguns processos, esse efluente pode ser reutilizado sem tratamento prévio; em outros, é necessário um tratamento específico. A decisão de tratar ou não a água dependerá dos padrões de qualidade exigidos para o uso pretendido. De acordo com a classificação da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), existem três tipos de reúso de efluentes:

- Reúso direto planejado: depois de tratado, o efluente é encaminhado diretamente ao local de reutilização, sem ser despejado antes no meio ambiente;
- Reúso indireto planejado: consiste na disposição intencional do efluente tratado em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos, com o objetivo de sua futura captação e reutilização a jusante, de forma controlada;
- Reúso indireto não planejado: acontece quando o efluente é descartado no meio ambiente e, posteriormente, é reaproveitado a jusante, de maneira diluída, não intencional e sem supervisão;

Assim, a reutilização de águas residuais diminui os gastos relacionados à poluição e auxilia na conservação do meio ambiente (CNRH, 2005). De acordo com Carvalho *et al.* (2013), as águas residuárias tratadas podem ser empregadas na irrigação, desde que sejam respeitados alguns cuidados fundamentais, como a realização de um tratamento eficaz do efluente, a seleção e o manejo apropriados do sistema de irrigação, a limitação quanto ao tipo de cultura irrigada e a implementação de boas práticas durante a colheita, o transporte e o manuseio dos produtos.

### ***2.2.1 Características das águas residuárias***

As águas residuais produzidas pelas atividades domésticas apresentam características diversas. Nesse contexto, elas podem ser divididas em dois grupos principais: água negra e água cinza. A água negra, originária do vaso sanitário, possui uma concentração consideravelmente maior de microrganismos e matéria orgânica (LUDWIG, 2006). Por outro lado, Nolde (2000) define a água cinza como o esgoto residencial que não inclui o esgoto sanitário. Ele a categoriza

como de baixa carga ao desconsiderar as águas da cozinha e da lavanderia, e como de alta carga ao incluí-las, sendo esta última tida como mais contaminada.

De acordo com Rapoport (2004), esse tipo de efluente inclui restos de alimentos, óleos e gorduras, podendo ser considerado, em certas situações, mais poluente do que as águas negras. Isso é resultado das altas concentrações de coliformes termotolerantes e detergentes, que podem tornar a água alcalina.

Quando se avalia a água originada de pias de cozinha revela um crescimento considerável na concentração de compostos devido à alta quantidade de matéria orgânica, óleos e graxas contidos. Esse tipo de efluente, que favorece a proliferação de bactérias, é classificado como água cinza escura (ALLEN *et al.*, 2010).

Em ambientes residenciais, as águas cinzas oriundas de pias de cozinha e lavanderia são classificadas como água cinza escura ou de alta carga. Estas se distinguem das águas cinzas de baixa carga por apresentarem uma concentração consideravelmente maior de compostos orgânicos e inorgânicos. Especificamente, o efluente de pias de cozinha, como o coletado no Restaurante Universitário, é notavelmente enriquecido com matéria orgânica, óleos, e graxas, além de poder conter detergentes e apresentar altas concentrações de coliformes termotolerantes, o que frequentemente eleva sua alcalinidade.

A presença de matéria orgânica complexa, óleos e graxas representa um desafio significativo para o tratamento, uma vez que essas substâncias são frequentemente compostas por macromoléculas. A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), um parâmetro chave para avaliar a poluição orgânica, reflete a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação biológica dessa matéria presente. Níveis elevados de DBO, como o de 5,78 mgO<sub>2</sub>/L observado no efluente bruto, indicam um alto grau de contaminação orgânica. Além disso, a presença de íons como sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) e aqueles que contribuem para a alcalinidade (OH<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), embora menores em tamanho, também exige tratamento eficaz para a melhoria da qualidade da água.

A eliminação de contaminantes presentes em águas residuais afetadas por produtos industriais, de higiene pessoal, plásticos, entre outros, transformou-se em um dos maiores desafios enfrentados por cientistas ao redor do globo. Essa questão exige a criação de métodos

de tratamento que sejam sustentáveis, eficazes, adaptáveis e financeiramente viáveis para uso nas bacias hidrográficas (MIRANDA *et al.*, 2021)

Complementando essas diretrizes, a Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020 (Brasil, 2020), que atualiza o marco legal do saneamento básico, destacou o reúso de água como tema a ser regulamentado por normas de referência estabelecidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Esse novo marco do saneamento pode ser visto como um estímulo ao reúso, já que a universalização dos serviços deve aumentar a disponibilidade de efluentes tratados, facilitando a expansão do reúso.

A água cinza representa de 41% a 91% do esgoto gerado em residências (BOYJOO *et al.*, 2013). De acordo com Rampelotto (2014), é fundamental que as pesquisas explorem alternativas para sistemas de aproveitamento e reúso de água, com o objetivo de avaliar tanto a quantidade de água disponível (oferta) quanto a destinada às atividades principais (demanda), com base nas fontes selecionadas.

Atualmente, há uma falta de tecnologias padronizadas para o tratamento de águas residuais e de padrões de qualidade estabelecidos, o que enfatiza a demanda por novas soluções. Em muitos casos, as opções de tratamento propostas por várias empresas não são claras (ALLEN, CHRISTIAN-SMITH e PALANIAPPAN, 2010). Segundo Rabêlo (2011), uma alternativa viável para o uso de água em finalidades não potáveis é a separação dos efluentes, sendo que os efluentes domésticos são os mais adequados para reaproveitamento devido à sua baixa carga orgânica.

O carvão ativado (CA), amplamente reconhecido por sua elevada capacidade de adsorção, grande área de superfície e alta porosidade, é uma solução notável para a eliminação desses poluentes e micropoluentes. A eficácia do carvão ativado está diretamente ligada à sua estrutura porosa. O carvão ativado produzido a partir do *Ziziphus Joazeiro* demonstrou uma superfície áspera e irregular com elevada porosidade, caracterizada por um diâmetro médio de poros de 21 nm, sugerindo a predominância de mesoporos.

Essa configuração mesoporosa (2-50 nm) é particularmente vantajosa para o tratamento de efluentes de cozinha. Enquanto os microporos (< 2 nm) são mais seletivos a moléculas muito pequenas, os mesoporos de 21 nm são ideais para a adsorção de moléculas de tamanho intermediário e maiores, como as que compõem os restos de alimentos, óleos, graxas e outras

macromoléculas orgânicas que contribuem para a DBO. Adicionalmente, os mesoporos atuam como canais de transporte, facilitando a difusão e o acesso dos adsorvatos (tanto moléculas orgânicas quanto íons inorgânicos como sulfatos e os íons da alcalinidade) aos sítios ativos internos do material, incluindo os microporos remanescentes. A variedade de tamanhos de poros observada nas imagens de MEV amplia ainda mais a capacidade do carvão ativado de Z. Joazeiro em adsorver uma gama diversificada de contaminantes, tornando-o eficaz na remoção de DBO, sulfatos e alcalinidade. Essa adaptabilidade entre a problemática do efluente e a solução proposta demonstra a relevância e o potencial do material.

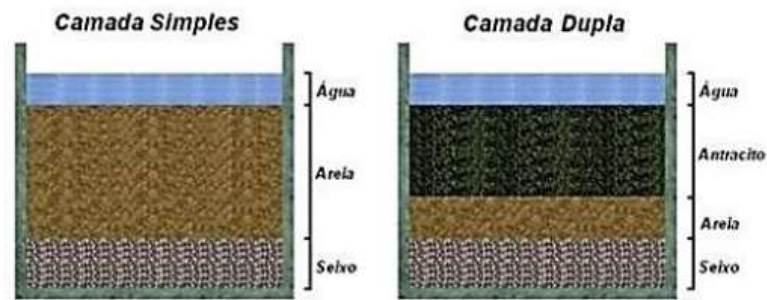
### **2.2.2 Tratamento por filtração**

A filtração de água para reúso envolve a passagem da água por um meio granular, visando eliminar impurezas de natureza física, química e biológica. Nesse cenário, o biofiltro, uma variação do filtro lento de areia, se destaca por sua simplicidade, custo reduzido e eficácia no tratamento de efluentes. Embora tenha potencial, especialmente em áreas semiáridas, seu uso ainda é restrito no Brasil. Tecnologias acessíveis que utilizam esse tipo de filtração foram estudadas e apresentadas em trabalhos divulgados por Silva (2006) e Pelegrini *et al.* (2007).

De acordo com Gonçalves (2001), com várias simplificações em comparação aos processos empregados na Europa, os novos biofiltros criados no Brasil podem ter aplicabilidade em diversas áreas, inclusive em estações de tratamento. Esses sistemas se sobressaem por apresentarem custos reduzidos de implantação, operação e manutenção, não demandarem mão de obra especializada, além de possuírem baixo consumo de energia e geração mínima de lodo.

Os filtros de areia são eficazes na remoção de bactérias, cor e turbidez, apesar de sua eficácia na eliminação de odores e sabores ser limitada (PIMENTA, 2019). Adicionalmente, o carvão ativado é amplamente utilizado para melhorar a remoção da cor e diminuir a formação de subprodutos tóxicos, por meio da adsorção desses compostos (BRITO; RANGEL, 2008).

Figura 5 - Representação de filtro de areia de camada simples e dupla.



Fonte: Orozco (2012).

### 2.2.3 Legislação de reúso no Brasil

O desenvolvimento social, industrial e agrícola enfrenta um desafio considerável nas regiões semiáridas devido à escassez de água. Nesse contexto, é essencial incorporar os princípios do reúso da água às estratégias nacionais de gestão dos recursos hídricos e ao planejamento agrícola, principalmente em regiões onde a demanda por água não é completamente suprida (HESPANHOLH, 2002). Ademais, é fundamental estabelecer normas e regulamentações específicas para a qualidade da água a fim de reduzir os riscos relacionados ao seu uso (COUTO *et al.*, 2015).

De acordo com a NBR-13.969/97, o reúso de água para certas atividades domésticas deve atender a critérios de qualidade de água não potável, porém sanitariamente segura, podendo ser utilizada para irrigação de jardins, lavagem de pisos, lavagem de veículos automotivos, descarga de vasos sanitários, irrigação de campos agrícolas, entre outras finalidades.

No Brasil, a Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), determina a classificação dos corpos hídricos e estabelece as diretrizes ambientais para seu enquadramento, além de estipular as condições e os padrões para o lançamento de efluentes (BRASIL, 2005).

- Águas doces: apresentam salinidade igual ou inferior a 0,5%;
- Águas salobras: possuem salinidade superior a 0,5% e inferior a 30%;
- Águas salinas: caracterizam-se por salinidade igual ou superior a 30%;

A partir da caracterização, é possível direcionar as águas para distintos usos, conforme apresentado no Quadro 1.

Tabela 1 - Classificação das águas e suas destinações.

| <b>Classificação</b> | <b>Destinação</b>  |
|----------------------|--|
| Classe Especial      | Abastecimento para consumo humano, após passar pelo processo de desinfecção; Manutenção do equilíbrio ecológico das comunidades aquáticas; Preservação dos ecossistemas aquáticos em áreas de proteção integral.   |
| Classe 1             | Abastecimento destinado ao consumo humano, desde que passe por um tratamento simplificado; Proteção das comunidades aquáticas, inclusive das que habitam as Terras Indígenas; Atividades de lazer que envolvem contato primário, como natação, esqui aquático e mergulho, de acordo com a Resolução CONAMA n.º 274/2000; A irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que crescem próximas ao solo e são consumidas sem a remoção da película.   |
| Classe 2             | Abastecimento para consumo humano, após passar por tratamento convencional; Preservação das comunidades aquáticas; Atividades recreativas de contato primário, como natação, esqui aquático e mergulho, de acordo com a Resolução CONAMA n.º 274, de 2000; Hortaliças e plantas frutíferas, bem como parques, jardins, campos esportivos e áreas de lazer, devem ser irrigados, pois têm potencial para contato direto com o público. Aquicultura e pesca. |
| Classe 3             | Fornecimento para consumo humano, desde que submetido a um tratamento convencional ou avançado; Irrigação de culturas lenhosas, de grãos e forrageiras; Atividade de pesca recreativa; Recreação de contato indireto; Fornecimento de água para animais.   |
| Classe 4             | Atividades de navegação; Composição e valorização do paisagismo.   |

Fonte: Brasil (2011).

Em âmbito estadual, o Art. 37º da Resolução COEMA nº 2/2017 estabelece as seguintes modalidades de reúso da água (CEARÁ, 2017):

1. Reúso para fins urbanos: destinado à irrigação de áreas verdes, limpeza de espaços públicos e veículos, desobstrução de tubulações, atividades da construção civil, uso em edificações e combate a incêndios em áreas urbanas;

2. Reúso para fins agrícolas e florestais: utilização de águas de reúso na produção agrícola e no cultivo de florestas plantadas;
3. Reúso para fins ambientais: uso em iniciativas destinadas à recuperação do meio ambiente;
4. Reúso para fins industriais: utilização da água de reúso em processos, atividades e operações do setor industrial;
5. Reúso na aquicultura: aplicação da água de reúso na produção de organismos aquáticos e no cultivo de plantas aquáticas.

O Art. 42º da Resolução COEMA n.º 2/2017 determina que, para o reúso de efluentes não sanitários, os padrões de qualidade devem variar de acordo com a modalidade de reúso, cumprindo o estabelecido nos Arts. 38º a 41º e, quando necessário, aos parâmetros adicionais do Art. 11º (CEARÁ, 2017). Essa diretriz tem como objetivo assegurar a segurança do reúso e a preservação ambiental.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Matéria-Prima

As podas do *Z. Joazeiro* foram coletadas na zona rural do município de Crateús, no estado do Ceará.

A escolha das podas da espécie *Ziziphus Joazeiro* como matéria-prima para a produção do carvão ativado neste estudo foi estrategicamente fundamentada. Além da abundância dessa planta nativa e endêmica da Caatinga na região do semiárido nordestino, especialmente em Crateús, e de suas propriedades intrínsecas como um precursor rico em matéria carbonácea e com potencial antimicrobiano, buscou-se a valorização de um resíduo vegetal. As podas representam um material de baixo custo e facilmente disponível, que frequentemente seria descartado, e sua utilização contribui para a sustentabilidade ambiental ao transformar um subproduto em um adsorvente valioso para o tratamento de efluentes.

As podas foram recolhidas com um comprimento médio de 1,0 m e após o processo de limpeza para retirada das folhagens, foram submetidas a cortes em tamanhos na faixa de 2 a 5 cm. Em seguida, a umidade do material foi eliminada utilizando uma estufa a 30 °C, por um período de 24 horas (MORAIS, 2014).

Após a secagem, o quantitativo de 5 kg do *Z. Joazeiro* foi triturado e separado granulometricamente (4,75 mm; 2,36 mm e 1,18 mm) em agitador vibratório, com peneiras padrão ABNT (NBR NM 248) (COSTA JUNIOR, 2014). A massa da matéria total utilizada foi de 1858,9g. Após a trituração e separação do material com peneiras e agitador vibratório, foi novamente pesado, resultando em 1160,70g. As peneiras utilizadas foram (2,00 mm; 1,20 mm e 600  $\mu\text{m}$ ), vale destacar que o material utilizado foi o passante na peneira de 600  $\mu\text{m}$ .

Figura 6 - Poda do *Ziziphus Joazeiro*, incluindo galhos e folhagem, utilizados como matéria-prima para a produção do carvão ativado.



Fonte: Autor, 2024.

### 3.3 Ativação Química e Planejamento fatorial aplicado

É importante ressaltar que o processo de otimização da produção de carvão ativado por meio do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) não foi conduzido experimentalmente neste estudo. As condições de produção do carvão ativado de *Ziziphus Joazeiro* utilizadas neste trabalho foram baseadas e adotadas a partir dos resultados de otimização previamente estabelecidos por Pereira (2021). O presente estudo focou na aplicação do carvão ativado produzido sob essas condições otimizadas para a avaliação de sua eficiência no tratamento de efluentes residenciais

Para Pereira (2021), a ativação química foi conduzida utilizando cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ), destacando-se que, previamente a esse processo, foi realizado um pré-tratamento para favorecer a formação de poros. O precursor foi impregnado por meio de sua imersão em solução de cloreto de zinco, por um período de 24 horas, a uma temperatura de 100 °C (BRUM *et al.*, 2008).

Considerando as proporções entre a massa do precursor e do agente ativante: 1:2 (-1), 1:1 (0) e 3:2 (+1). Neste estudo, foi escolhida a menor relação entre precursor e ativante. De acordo com Pereira (2021), as faixas ideais para maximizar o rendimento, com desempenho acima de 20%, variam de 1,4 a 1,8 g/g para a razão ativante/precursor, e de 300 °C a 600 °C para a temperatura de pirólise. Dessa forma, foi estabelecido um valor mínimo de 1,4 g/g, indicando que são necessários 14 g de ZnCl<sub>2</sub> para cada 10 g de precursor, uma proporção maior do que a razão 1:1 (PEREIRA, 2021).

O rendimento variou de 10,9% a 25,2%, com o menor rendimento registrado no ensaio 6 e o maior no ensaio 8. Os ensaios de número 01, 02, 05 e 08 exibiram os melhores rendimentos de produção do carvão ativado, de acordo com essa otimização. Os valores de teor de cinzas para a produção do CA variaram de 4,41 a 6,75%, representando um bom resultado, pois precursores com valores elevados podem afetar negativamente o processo de combustão, pela presença de grande quantidade de matéria inorgânica. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Temperatura de pirólise, rendimento do carvão ativado e teor de cinzas dos ensaios selecionados com melhor desempenho.

| Ensaio | Temperatura (C°) | Rendimento do carvão ativado (%) | Teor de Cinza (%) |
|--------|------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1      | 400              | 17,91                            | 6,75              |
| 2      | 400              | 19,2                             | 4,72              |
| 5      | 358,58           | 17,32                            | 5,08              |
| 8      | 500              | 25,19                            | 4,41              |

Fonte: Adaptado Pereira, 2025.

Embora o estudo de Pereira (2021) tenha focado principalmente na maximização do rendimento e na redução do teor de cinzas como parâmetros de otimização, as condições (razão ativante/precursor de 1:1,4 e temperatura de 600°C) foram adotadas neste trabalho como ponto de partida. A escolha baseou-se na premissa de que um maior rendimento e um menor teor de cinzas resultam em um material carbonáceo de melhor qualidade e pureza, o que é fundamental para o desempenho adsorptivo. A validade dessa escolha para a eficiência adsorptiva foi posteriormente comprovada e caracterizada através das análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), espectroscopia de infravermelho e pH do ponto de carga zero, além da avaliação direta no tratamento de efluentes residenciais.

Figura 7 - Etapas do processo de produção do carvão ativado: (1) preparo da amostra com o agente ativante; (2) carbonização do material em mufla, utilizando cadinhos de 30 mL; (3) carvão ativado após o processo de carbonização.



Fonte: Autor, 2024.

A solução de cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ) foi empregada para ativar quimicamente o precursor. Para isso, foram utilizados 200 g do material triturado e 280 g de  $ZnCl_2$ , seguindo a proporção de 1:1,4 (precursor: ativante). Posteriormente, adicionou-se 1,5 L de água destilada. A mistura foi coberta com papel-alumínio e mantida na estufa a 105 °C por 24 horas. Após a impregnação, a carbonização foi realizada em uma atmosfera inerte de nitrogênio ( $N_2$ ), com uma vazão de 150 mL/min. O procedimento foi realizado em mufla, empregando cadinhos de sílica com capacidade de 30 mL.

Posteriormente a ativação, as amostras foram lavadas com uma solução de HCl 1 M e água destilada até que o pH se aproximasse de 7,0. O HCl empregado foi o concentrado a 37%, e a quantidade requerida foi determinada com base na seguinte equação:

$$M = \frac{m}{MM \times V(L)} \quad (1)$$

Onde:

$M$  = molaridade da solução (mol/L);

$m$  = massa do soluto (g);

$MM$  = massa molar (g/mol);

$V(L)$  = volume da solução (L);

Os níveis codificados e decodificados de cada variável, bem como os resultados de rendimento e teor de cinzas alcançados por Pereira (2021) por meio do planejamento experimental do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para a otimização do processo de produção do carvão ativado, estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições de temperatura e proporção ativante/precursor utilizadas em cada ensaio do planejamento experimental (DCCR) para a otimização do processo de produção do carvão ativado.

| Ensaio | Temperatura |        | Proporção do precursor/ativante |        | Rendimento do CA (%) | Teor de Cinzas (%) |
|--------|-------------|--------|---------------------------------|--------|----------------------|--------------------|
|        | Codificado  | Real°C | Codificado                      | Real°C |                      |                    |
| 1      | -1          | 400    | -1                              | 5      | 17,91                | 6,75               |
| 2      | -1          | 400    | 1                               | 15     | 19,2                 | 4,72               |
| 3      | 1           | 600    | 1                               | 5      | 12,02                | 5,23               |
| 4      | -1,41       | 600    | 1                               | 15     | 16,71                | 4,44               |
| 5      | -1,41       | 358,58 | 0                               | 10     | 17,32                | 5,08               |
| 6      | 0           | 641,42 | 0                               | 10     | 10,96                | 6,1                |
| 7      | 0           | 500    | -1,41                           | 2,93   | 12,96                | 5                  |
| 8      | 0           | 500    | 1,41                            | 17,07  | 25,19                | 4,41               |
| 9      | 0           | 500    | 0                               | 10     | 12,77                | 6,03               |
| 10     | 0           | 500    | 0                               | 10     | 11,18                | 5,45               |
| 11     | 0           | 500    | 0                               | 10     | 13,6                 | 6,67               |
| 12     | 0           | 500    | 0                               | 10     | 12,85                | 4,86               |

Fonte: Adaptado Pereira, 2021.

Com relação aos níveis codificados empregados no estudo, Pereira (2021) escolheu valores que se situavam dentro dos intervalos experimentais definidos para as variáveis temperatura de pirólise e razão entre precursor e ativante. Conforme mostrado na Tabela 4, os valores selecionados oscilaram entre 358,58 °C (-1,41) e 641,42 °C (+1,41) para a temperatura, e entre 0,29 (-1,41) e 1,71 (+1,41) para a relação precursor/ativante.

Tabela 4 - Níveis codificados para as duas variáveis independentes: temperatura e razão do precursor/ativante

| DCCR                            |        |     |     |     |        |
|---------------------------------|--------|-----|-----|-----|--------|
| Fator                           | -1,41  | -1  | 0   | 1   | 1,41   |
| Temperatura                     | 358,58 | 400 | 500 | 600 | 641,42 |
| Proporção do precursor/ativante | 0,29   | 0,5 | 1   | 1,5 | 1,71   |

Fonte: Adaptado Pereira,2021.

### 3.4 Análises Experimentais do Carvão Ativado (CA)

#### 3.4.1 Teor de Cinzas

O teor de cinzas é calculado por um método gravimétrico que consiste em estimar a perda de material quando este for submetido à calcinação. No procedimento, pesa-se 1,0 g de amostra do carvão ativado em cadinhos de porcelana e calcina-os em forno tipo mufla a 900°C, por uma hora. Após o resfriamento dos cadinhos, pesa-se a massa residual (MANGUEIRA, 2014). O teor de cinzas pode ser calculado pela equação (2).

$$Cz (\%) = \frac{R}{mca} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$Cz(\%)$  = teor de cinza (%);

$R$  = resíduo da calcinação (g);

$mca$  = massa do carvão ativado (g);

#### 3.4.2 Densidade Aparente

A densidade aparente é a relação entre massa e volume, considerando os espaços vazios do material. Em uma proveta de 5 mL, o volume de 10,0 g do carvão ativado será aferido. Esse aparato será submetido a leves batidas da proveta, até que o material apresente uma uniformidade. Posteriormente, a massa do material será pesada, e a relação entre a massa pesada e o volume averiguado será calculada ( $g/cm^3$ ) (MANGUEIRA, 2014).

### **3.4.3 Rendimento do Carvão Ativado (CA)**

Para Pereira (2021) o rendimento do CA será calculado pela relação da massa da matéria prima antes da carbonização e a massa final do CA. A equação (3) apresenta a relação.

$$R (\%) = \frac{mca}{mmp} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$R (\%)$  = rendimento do carvão ativado (%)

$mca$  = massa do precursor (g);

$mmp$  = massa do carvão ativado (g);

### **3.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A morfologia do carvão ativado (CA) foi examinada utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As análises microestruturais das amostras foram conduzidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando um microscópio eletrônico de bancada HITACHI TM 3000, dotado de periférico EDS SWIFT ED 3000.

Com uma resolução nominal de 1 nm, o equipamento permite observar as estruturas porosas do material, incluindo microporos, mesoporos e macroporos, de acordo com a classificação da IUPAC. As imagens capturadas foram analisadas utilizando o software gratuito ImageJ, versão 1.36b (Wayne Rasband, National Institutes of Health, EUA), acessível em: <http://rsbweb.nih.gov/ij/index.html>.

### **3.4.5 pH e pH de carga zero**

A determinação do pH foi realizada adicionando 1,0g de CA em um erlenmeyer de 200 mL, contendo 100 mL de água deionizada, sob 100 °C, por 5 min.. Em seguida, a solução será resfriada, por meio da adição de 100 ml de água deionizada ao erlenmeyer, possibilitando a aferição do pH (PEREIRA, 2021). A análise foi realizada utilizando um pHmetro digital de bancada Datasonic, com resolução 1 mV (MANGUEIRA, 2014).

Para determinar o pH do ponto de carga zero, o experimento foi realizado em erlenmeyer de 200 mL, em duplicatas, onde serão adicionados, em cada erlenmeyer, 20 mL de NaCl 0,1 M e para promover o ajuste do pH para uma variação de 3 a 9, será adicionada solução de HCl 0,1 M. Após o ajuste dos pHs, 1 g de CA será adicionado aos erlenmeyers, que serão submetidos à agitação de 200 rpm, por um período de 24 horas a 25°C (PEREIRA, 2021). Em seguida, o pH será aferido novamente e, com os valores do pH inicial e final, será construído um gráfico que relacionará a variação aferida. O ponto da curva onde os pH inicial e final se encontram é o ponto de carga zero (MANGUEIRA, 2014; POSTAI et al, 2016; FREITAS; CÂMARA; MARTINS; 2015).

### **3.5 Análise da Qualidade da Água**

Todas as análises físico-químicas descritas a seguir foram realizadas em triplicata para cada amostra de efluente (bruto e tratado pelos diferentes biofiltros), com o objetivo de assegurar resultados assertivos e minimizar erros experimentais.

#### **3.5.1 Alcalinidade**

A alcalinidade é a habilidade da água de neutralizar ácidos adicionados, funcionando como um sistema tampão na presença de íons H<sup>+</sup> (BRASIL, 2013). A determinação da alcalinidade foi realizada por titulação potenciométrica, empregando solução padronizada de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0,0105 mol/L, com acompanhamento por condutimetria. A equação utilizada para o cálculo encontra-se apresentada a seguir:

$$\text{Alcalinidade Total (mg. L. CaCO)} = \frac{V_2 \cdot M \cdot 100.00}{V_a} \quad (4)$$

$V_2$  = volume em mL de ácido gasto na titulação até pH 4,3;

$M$  = molaridade do ácido empregado;

$V_a$  = volume da amostra em mL;

### 3.5.2 Cloretos

Os cloretos estão presentes em todas as águas naturais em diferentes concentrações, sendo que águas de montanha e regiões de terras altas tendem a apresentar baixos níveis, enquanto rios, águas subterrâneas e residuais podem ter concentrações mais elevadas. Em contrapartida, mares e oceanos possuem teores muito altos de cloretos, que são introduzidos nas águas subterrâneas pela percolação através de solos e rochas (CERVO, 2001).

Dessa forma, A quantificação dos íons cloreto nos efluentes analisados foi realizada pelo método de Mohr, utilizando solução padronizada de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) 0,01 mol/L. A equação empregada para o cálculo encontra-se apresentada a seguir:

$$C_{Cl^-}^{ppm} = \frac{M_{AgNO_3} \cdot (V_{AgNO_3}^{amostra} - V_{AgNO_3}^{branco}) \cdot MM \cdot 1000}{V_{amostra}} \quad (5)$$

$C_{Cl^-}$  = concentração de cloretos na amostra em ppm;

$M_{AgNO_3}$  = concentração em mol/L da solução de nitrato de prata usada como titulante;

$V_{AgNO_3}$  = volume de nitrato de prata gasto na titulação;

$V_{amostra}$  = volume de amostra atualizado na titulação;

$V_{AgNO_3}$  = volume de nitrato de prata gasto na titulação do branco;

$MM_{Cl^-}$  = massa molar do íon cloreto = 35,5 g/mol;

$V_{AgNO_3}^{branco}$  = volume de nitrato de prata gasto na titulação do branco;

### 3.5.3 Dureza

A determinação da dureza total foi realizada pelo método titulométrico com solução de EDTA, após tamponamento da amostra a pH 10. As amostras foram alcalinizadas com solução tampão amoniacal (pH 10), adicionando-se uma pitada do indicador metalocrômico negro de eriocromo T, e em seguida tituladas com solução padrão de EDTA 0,02 mol/L. A equação utilizada para o cálculo da dureza está apresentada a seguir (APHA, 2017; BRASIL, 2013).

$$Dureza (mg.LCaO_3) = \frac{M_{EDTA} \cdot V_{EDTA}}{V_{amostra}} \cdot 1000 \quad (6)$$

$M_{EDTA}$  = molaridade da solução de EDTA utilizada na titulação (mol/L);

$V_{EDTA}$  = volume de EDTA gasto na titulação (em mL);

$V_{Amostra}$  = volume da amostra de água analisada (em mL);

#### **3.5.4 Sulfatos**

No presente estudo, foi utilizado um espectrofotômetro UV-Vis da marca KASUAKI, modelo IL-593 automático. As concentrações de sulfatos foram determinadas por espectrofotometria UV-Vis, usando um comprimento de onda de 420 nm, que corresponde ao pico de absorbância da solução.

Com base na absorbância medida nas amostras e na equação da reta obtida foi caracterizada com ( $y = 108,03x + 2,3637$ ), foi possível calcular as concentrações dos íons sulfato em cada amostra analisada. Esse método possibilita uma análise precisa da presença de sulfatos na água, sendo amplamente empregado devido à sua sensibilidade e capacidade de reprodução.

#### **3.5.5 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**

Em síntese, a DBO serve como um indicativo de poluição: quanto maior a quantidade de efluentes despejados em um corpo hídrico, maior será o consumo de oxigênio pelos microrganismos, elevando a DBO e prejudicando a sobrevivência dos organismos aeróbios (DIAS, 2021).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foi determinada pelo método de diluição, incubando-se a amostra a 20 °C por 5 dias. Os teores de oxigênio dissolvido inicial e final foram determinados pelo método de Winkler. A equação empregada possibilita a determinação da variação nos níveis de oxigênio durante o período de incubação, levando em conta a porcentagem de diluição da amostra, conforme demonstrado na equação (7).

$$O_2 \text{ (mg.L)} = \frac{OD_{1 \text{ dia}} - OD_{5 \text{ dia}} \cdot 100}{\% \text{ da diluição}} \quad (7)$$

$OD_{1 \text{ dia}}$  = oxigênio dissolvido medido no primeiro dia (mg/L);

$OD_{5 \text{ dia}}$  = oxigênio dissolvido medido após 5 dias de incubação a 20°C (mg/L);

$\% \text{ diluição}$  = porcentagem da amostra diluída na preparação para a análise;

### 3.6 Biofiltro

O *Bio Sand Filter* (BSF), também conhecido como biofiltro, é uma versão adaptada do filtro lento de areia, usado na filtração de água para reúso. Ele é eficiente na eliminação de materiais particulados, graças à sua simplicidade, baixo custo e eficácia. Recentemente, versões alteradas com biomassa têm se destacado pelo seu desempenho eficaz no tratamento de águas residuais, utilizando o processo de biossorção. Embora tenha grande potencial, principalmente em áreas semiáridas, essa tecnologia ainda não é muito utilizada no Brasil (SANTOS NETO *et al.*, 2003; REBOUÇAS, 2003).

A reutilização de efluentes domésticos tratados em biofiltros preenchidos com biomassa originada de resíduos agrícolas têm mostrado grande eficácia na eliminação de compostos orgânicos e inorgânicos. A fibra de coco, a casca de café e a casca do juazeiro são alguns dos materiais empregados (OLIVEIRA, 2014; PEREIRA, 2019).

Foram utilizados tubos de PVC com 3,5 cm de diâmetro e 11 cm de altura, que foram empregados na fabricação dos protótipos de biofiltros de bancada (BSF). Esses tubos foram preenchidos com uma variedade de materiais filtrantes, como carvão ativado derivado do *Ziziphus Joazeiro*, fibra de coco, areia e material pétreo, todos com granulometria estabelecida anteriormente.

Além das biomassas, empregaram-se materiais pétreos, os quais foram classificados de acordo com sua granulometria, conforme determinado pela norma NBR 11.799/2016. A areia foi classificada em dois tipos: areia grossa (1,20 a 4,80 mm) e areia fina (300 µm a 1,20 mm). A brita zero foi usada como material pétreo, apresentando uma granulometria padrão variando de 4,8 a 9,5 mm. A composição de cada um dos filtros utilizados é apresentada a seguir:

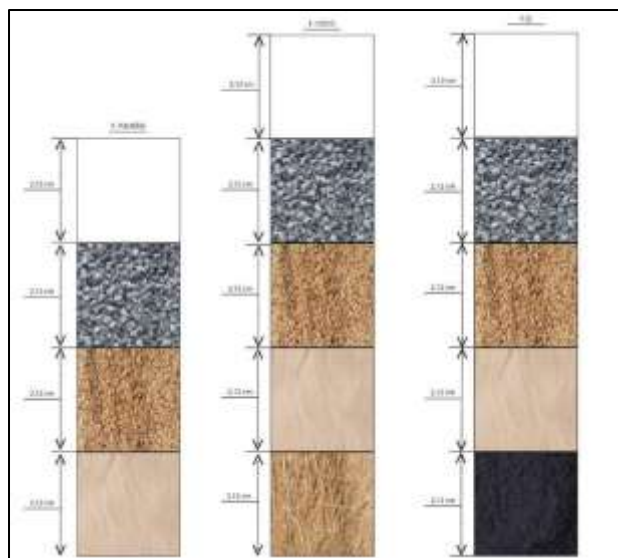
- **Biofiltro Padrão (FP):** brita 0, areia grossa e areia fina;
- **Biofiltro Fibra de Coco (FC):** brita 0, areia grossa e areia fina e fibra de coco;
- **Biofiltro *Ziziphus Joazeiro* (FZJ):** brita 0, areia grossa e areia fina e CA *Z. Joazeiro*

A distribuição das camadas no interior dos tubos de PVC, com 3,5 cm de diâmetro e 11 cm de altura total, foi cuidadosamente estabelecida para preencher o protótipo. As alturas de cada material filtrante, conforme ilustrado na Figura 9 (p. 35), são:

- Brita 0: 2 cm de altura
- Areia grossa: 3 cm de altura
- Areia fina: 3 cm de altura
- Biocomposto (Carvão Ativado de *Ziziphus Joazeiro* ou Fibra de Coco): 3 cm de altura

A soma dessas alturas totaliza aproximadamente 10,6 cm da altura dos tubos, garantindo o preenchimento do protótipo, e proporcionando um espaçamento de 2,12 cm destinado à alimentação do biofiltro. Para a montagem dos biofiltros, não foram aplicadas forças de compressão, apenas a acomodação natural dos materiais. A Figura 1 apresenta a divisão das camadas dos filtros e suas respectivas alturas. Conforme ilustrado na Figura (8).

Figura 8 - Esquematização dos protótipos do biofiltro compostos por camadas de brita 0, areia grossa, areia fina e carvão ativado.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 9 - Protótipo do biofiltro composto por brita 0, areia grossa, areia fina e carvão ativado.



Fonte: Autor, 2025.

Visando avaliar a eficiência dos biofiltros, foi utilizado um efluente coletado na pia da cozinha do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal do Ceará – Campus Crateús. Para evitar qualquer contaminação externa, a amostra foi armazenada em uma bombona de 20 litros que havia sido previamente higienizada e seca. Após a coleta, o recipiente foi adequadamente lacrado e, posteriormente, enviado para a execução das análises físico-químicas: alcalinidade, cloretos, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), dureza e sulfatos.

Para a avaliação da eficiência dos biofiltros, cada um dos três protótipos (Biofiltro Padrão, Biofiltro Fibra de Coco e Biofiltro *Ziziphus Joazeiro*) foi alimentado com o efluente coletado sob as mesmas condições operacionais. Para a comparação da eficácia entre os diferentes filtros, os dados obtidos foram avaliados com base na variação percentual dos parâmetros.

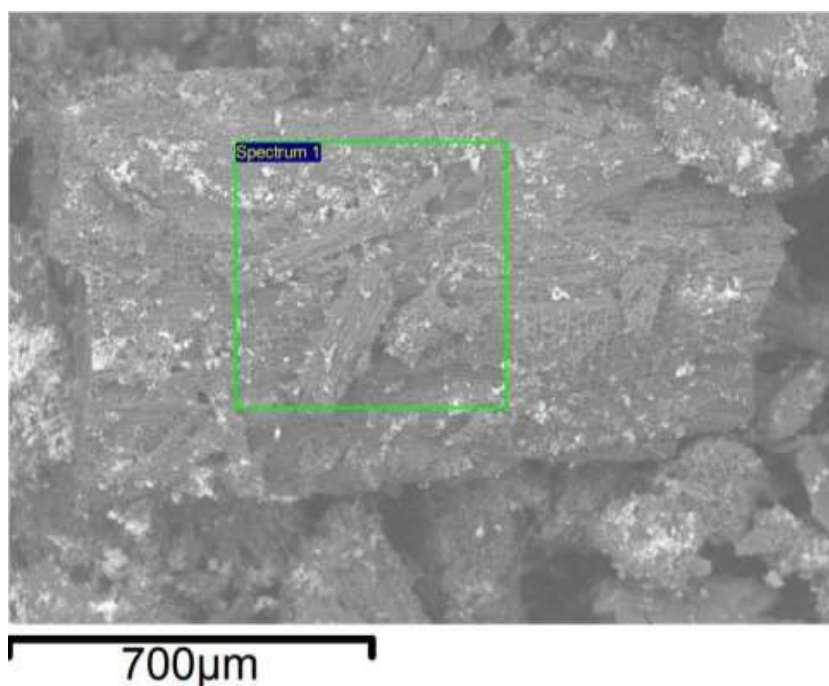
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análises experimentais do Carvão Ativado (CA)

#### 4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada com o intuito de entender mais profundamente a morfologia do carvão. A análise da morfologia do carvão ativado obtido a partir de *Ziziphus Joazeiro*, após os processos de pirólise e ativação, revela uma alteração considerável na estrutura do precursor, demonstrada pela criação de uma superfície porosa e irregular, característica benéfica para os processos de adsorção.

Figura 10 - Imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado produzido a partir do *Ziziphus Joazeiro*, com aumento de 700  $\mu\text{m}$ , evidenciando a estrutura superficial porosa do material.



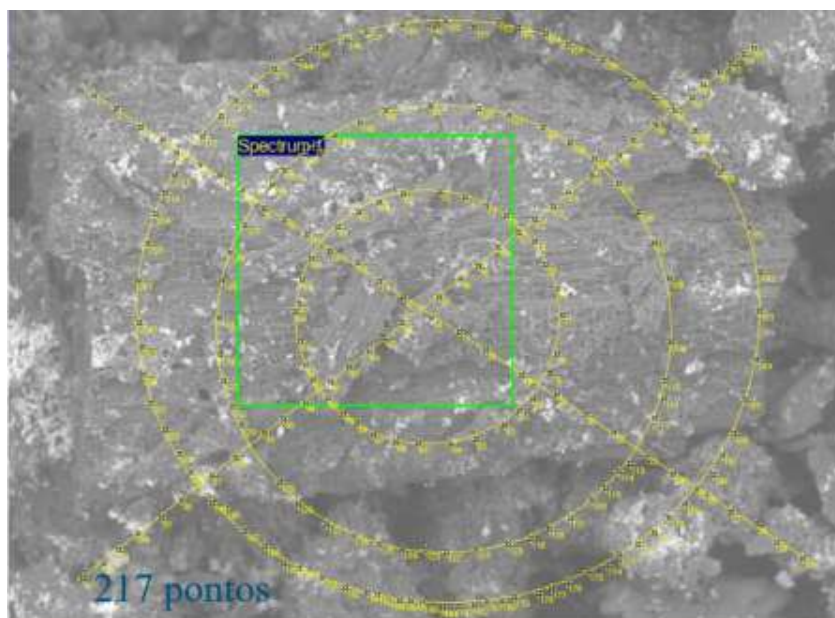
Fonte: Autor, 2025.

O material exibiu um tamanho médio de grão de cerca de 3,46  $\mu\text{m}$  e um diâmetro médio dos poros de 21 nm. De acordo com a classificação da International Union of Pure and Applied

Chemistry (IUPAC), que categoriza os materiais como Microporosos (diâmetro inferior a 2 nm), Mesoporosos (diâmetro entre 2 e 50 nm) e Macroporosos (diâmetro superior a 50 nm), o diâmetro médio de 21 nm indica a predominância de mesoporos no carvão ativado (NAIK e GHOSH, 2009). Essa estrutura, majoritariamente mesoporosa, é fundamental para o processo de adsorção, atuando como canais de transporte que facilitam o acesso do adsorvato aos microporos e aumentando a superfície externa do carvão ativado.

Os macroporos, devido ao seu tamanho considerável, têm um papel fundamental no processo de adsorção, funcionando como canais de transporte que facilitam o acesso do adsorvato aos micro e mesoporos. Por esse motivo, eles são classificados como componentes da superfície externa do carvão ativado (ACHAW, 2012). As Figuras 10 e 11 mostram que houve um aumento da porosidade, esse aumento se deu porque o agente ativante mostrou-se eficaz durante o processo de pirólise (ativação).

Figura 11 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado.



Fonte: Autor, 2025.

Fonte: Silva, 2017.

As imagens também mostram poros de tamanhos variados, o que indica que os espaços interlamelares não são uniformes. Essa variedade de porosidade é essencial para a eficácia do carvão ativado, pois melhora sua habilidade de adsorção e amplia seu uso em processos de remoção de contaminantes no tratamento de água (MOUSA E ABDEL-MAGEED, 2018).

- **Tamanho dos grãos**

Tabela 5 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado precursor de *Ziziphus joazeiro*, apresentando os diâmetros médios dos poros identificados na superfície do material.

|                 |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Poros</b>    | <b>1</b>  | <b>2</b>  | <b>3</b>  | <b>4</b>  | <b>5</b>  | <b>6</b>  | <b>7</b>  | <b>8</b>  |
| <b>Diâmetro</b> | 13,773    | 25,382    | 29,913    | 19,478    | 45,562    | 32,328    | 29,125    | 30,505    |
| <b>Poros</b>    | <b>9</b>  | <b>10</b> | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>13</b> | <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> |
| <b>Diâmetro</b> | 47,448    | 35,995    | 36,53     | 24,228    | 14,408    | 33,04     | 25,382    | 16,164    |
| <b>Poros</b>    | <b>17</b> | <b>18</b> | <b>19</b> | <b>20</b> | <b>21</b> | <b>22</b> | <b>23</b> | <b>24</b> |
| <b>Diâmetro</b> | 16,921    | 19,293    | 13,378    | 13,377    | 22,859    | 22,702    | 32,659    | 14,776    |
| <b>Poros</b>    | <b>25</b> | <b>26</b> | <b>27</b> | <b>28</b> | <b>29</b> | <b>30</b> | <b>31</b> | <b>32</b> |
| <b>Diâmetro</b> | 11,031    | 18,919    | 20,811    | 15,601    | 18,633    | 20,811    | 21,152    | 22,702    |
| <b>Poros</b>    | <b>33</b> | <b>34</b> | <b>35</b> | <b>36</b> | <b>37</b> | <b>38</b> | <b>39</b> | <b>40</b> |
| <b>Diâmetro</b> | 20,376    | 14,776    | 17,422    | 9,647     | 34,263    | 43,141    | 23,93     | 11,351    |
| <b>Poros</b>    | <b>41</b> | <b>42</b> | <b>43</b> | <b>44</b> | <b>45</b> | <b>46</b> | <b>47</b> | <b>48</b> |
| <b>Diâmetro</b> | 17,027    | 22,702    | 19,478    | 20,810    | 11,508    | 21,152    | 24,667    | 16,274    |
| <b>Poros</b>    | <b>49</b> | <b>50</b> |           |           |           |           |           |           |
| <b>Diâmetro</b> | 11,031    | 16,164    |           |           |           |           |           |           |
| <b>Média</b>    | 20,811 m  |           |           |           |           |           |           |           |

Fonte: Autor, 2025.

Para estimar o tamanho médio dos grãos presentes na amostra analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizou-se o método da linha de interseção. O tamanho médio do grão é determinado pela razão entre o comprimento da linha traçada e o número de interseções identificadas, conforme a fórmula:

$$\text{Tamanho do grão médio} = \frac{L}{N}$$

$$\text{Tamanho do grão} = \frac{752}{217} \approx 3,46\mu\text{m}$$

$L$  = comprimento da linha traçada sobre a imagem (em micrômetro,  $\mu\text{m}$ );

$N$  = número total de interseções da linha com os grãos ou poros da amostra;

- **Tamanho dos Poros**

Tabela 6 – Características morfológicas dos poros do carvão ativado de *Z. Joazeiro* obtidas

| <b>n°</b>    | <b>Area</b>    | <b>Média</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>Angulo</b> | <b>Comprimento</b> |
|--------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|
| <b>1</b>     | 3,172          | 152          | 95            | 243           | 38            | 1,642              |
| <b>2</b>     | 3,220          | 154          | 95            | 247           | -33           | 1,667              |
| <b>3</b>     | 189,873        | 150          | 89            | 253           | 0             | 0                  |
| <b>4</b>     | 575,688        | 148          | 40            | 253           | 0             | 0                  |
| <b>5</b>     | 1.025,776      | 147          | 33            | 254           | 0             | 0                  |
| <b>Soma</b>  | 752            |              |               |               |               |                    |
| <b>Média</b> | 20,811 $\mu$ m |              |               |               |               |                    |

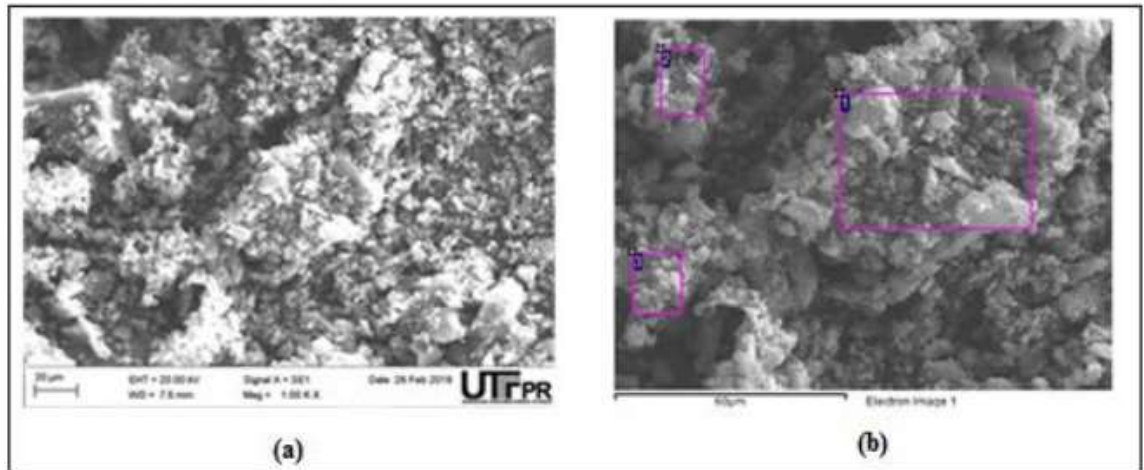
por MEV.

Fonte: Autor, 2025.

As informações coletadas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e analisadas com o software ImageJ mostraram variações consideráveis nos diâmetros individuais dos grãos, variando de 6,947  $\mu$ m a 47,448  $\mu$ m. Essa diversidade é uma característica de materiais como a biomassa empregada nesta pesquisa, apresentando uma morfologia de superfície reticulada e heterogênea com estrutura porosa.

De forma comparativa, a análise de Silva et al. (2017) descreve a morfologia do carvão ativado, caracterizando-o como um material microporoso, com uma distribuição de poros do tipo fenda bastante estreita. Essa microporosidade está ligada a uma fração reduzida de mesoporosidade, demonstrando uma estrutura composta por uma quantidade considerável de poros. Nesse contexto, os resultados deste estudo sobre o carvão ativado de *Z. joazeiro* indicam um comportamento comparável, pois também demonstram uma estrutura com uma quantidade considerável de poros. No entanto, essa estrutura é mais heterogênea devido à natureza da biomassa empregada como precursor.

Figura 12 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do carvão ativado comercial.

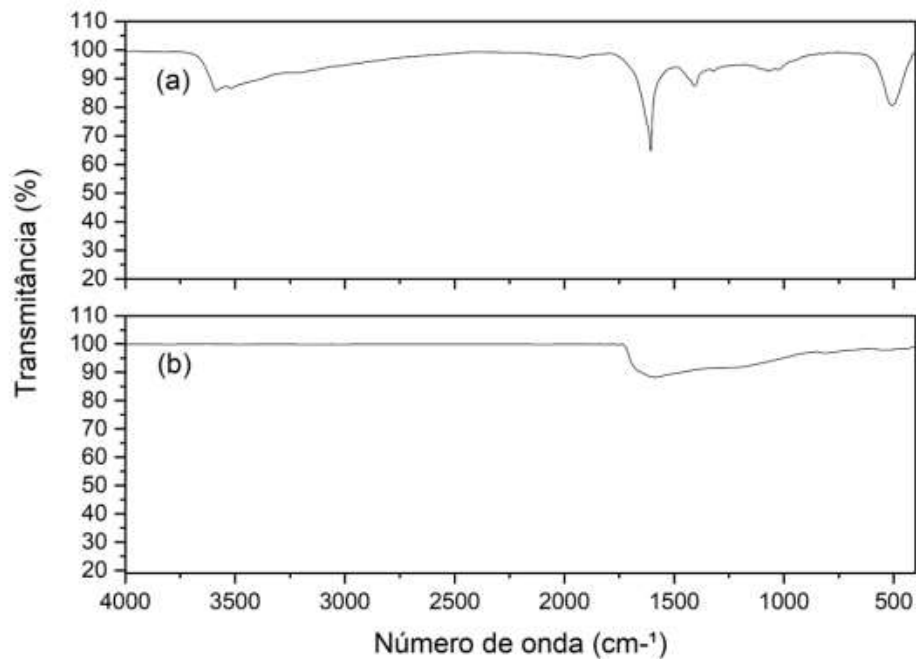


Fonte: Silva, 2017.

#### **4.1.2 Caracterização do infravermelho do Carvão Ativado**

Os espectros de infravermelho permitem a inferência sobre os grupos funcionais superficiais do carvão (MOHAMMAD et al., 2010). O espectro da amostra bruta exibiu bandas típicas dos grupos funcionais OH e NH, na faixa de 3100 a 3500  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente, grupos CH aromático variando entre 3000 a 3100  $\text{cm}^{-1}$ , CH alifático na faixa de 2800 a 3000  $\text{cm}^{-1}$ , C=O e CO situando-se entre 1640 e 1750  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente (PEREIRA, 2021).

Figura 13 - Análise de infravermelho das amostras de carvão - (a) amostra natural do *Ziziphus Joazeiro* e carvão ativado sob as condições definidas do experimento 8.



Fonte: Adaptado Pereira, 2021.

Após o processo de ativação, o precursor não exibiu um padrão de bandas claramente definido. Como mostrado na Figura 13, o ensaio 08 foi escolhido por apresentar um dos maiores rendimentos, em uma temperatura de 500 °C, não exibindo grupos funcionais detectadas na faixa espectral de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ . A banda de absorção em 1521  $\text{cm}^{-1}$  no espectro de infravermelho geralmente indica a presença de uma ligação C=C (dupla ligação carbono-carbono) em um sistema aromático ou um grupo carbonila (C=O) em certas configurações, especialmente em compostos com conjugação. Essa falta pode estar relacionada ao aumento da temperatura durante a pirólise, processo no qual os grupos oxigenados tendem a se decompor gradualmente, o que pode resultar na ausência ou formação incompleta de grupos funcionais, os quais podem ser instáveis termicamente.

A ausência de um padrão de bandas claramente definido e a decomposição dos grupos oxigenados (OH, NH, C=O, CO) no carvão ativado (ensaio 08), pós-pirólise a 500 °C, em contraste com a amostra bruta, indicam implicações diretas na química superficial e nas propriedades adsorptivas do material, como a alteração da polaridade e adsorção orgânica, ocasionadas pela perda de grupos oxigenados, que conferem caráter hidrofílico e resulta em uma superfície mais hidrofóbica/apolar. Esta característica é vantajosa para a adsorção de matéria orgânica. Isso explica a alta remoção de DBO (87,7%) no efluente residencial, onde

compostos orgânicos menos polares podem ser eficientemente adsorvidos por interações hidrofóbicas ou adsorção física.

Outra possibilidade é a influência na adsorção iônica, uma vez que o pH do ponto de carga zero foi de 6,0. Quando o pH do efluente é inferior a este valor, a superfície adquire carga positiva, favorecendo a adsorção de ânions. No caso em questão, o pH encontrado no efluente foi 5,0, o que indica que a superfície do adsorvente estaria carregada positivamente, potencialmente facilitando a adsorção de íons negativos presentes no efluente.

Essa propriedade contribui para a redução de sulfatos (35%) e alcalinidade (27%). Adicionalmente podem se relacionar as limitações na remoção de cloretos e dureza, pois o aumento de cloretos e dureza no efluente tratado sugere que, para esses parâmetros, a lixiviação de íons do próprio carvão ativado superou qualquer capacidade adsorptiva. Isso aponta para a necessidade de refinar o processo de produção do carvão, especialmente a etapa de lavagem, para minimizar a lixiviação de íons.

#### **4.1.3 pH e pH do ponto de carga zero do carvão ativado**

O ponto de carga zero (PCZ) é o valor de pH em que a superfície do carvão ativado exibe carga elétrica neutra (GUILARDUCI *et al.*, 2006). Quando o pH está abaixo desse valor, a superfície do material adquire uma carga positiva devido à protonação dos grupos funcionais básicos presentes no carvão.

O ensaio 8 foi selecionado para a caracterização do pH do ponto de carga zero (pH<sub>pcz</sub>), por ter apresentado as condições mais favoráveis de rendimento, considerando temperaturas adequadas e uma proporção aceitável entre ativante e precursor. A tabela 7 expressa os valores de pH registrados nos experimentos com os melhores resultados. Essas informações foram empregadas na determinação do ponto de carga zero do carvão ativado derivado das podas de *Ziziphus Joazeiro*.

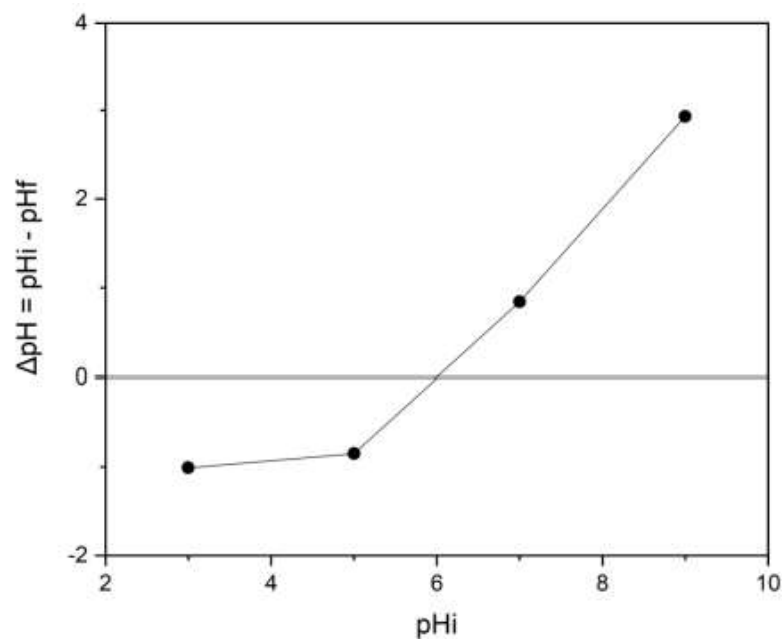
Tabela 7 - Valores de pH dos carvões ativados produzidos nos ensaios de melhor rendimento, conforme os parâmetros estabelecidos pelo planejamento DCCR.

| Ensaio | pH   |
|--------|------|
| 1      | 3,3  |
| 2      | 3,39 |
| 5      | 4,78 |
| 8      | 3,09 |

Fonte: Adaptado Pereira, 2021.

Para a amostra analisada, ensaio 08, o resultado foi igual a 6,0, indicando que os grupos funcionais predominantes são ácidos. Quando o pH do efluente é inferior ao pH<sub>pzc</sub>, a superfície do carvão ativado passa a ter carga positiva, facilitando a adsorção de ânions. Em contrapartida, quando o pH ultrapassa o pH<sub>pzc</sub>, a superfície adquire uma carga negativa, o que favorece a adsorção de cátions (GATABI, MOGHADDAM E GHORBANI, 2016).

Figura 14 – pH do ponto de carga zero estabelecido pelo planejamento DCCR.



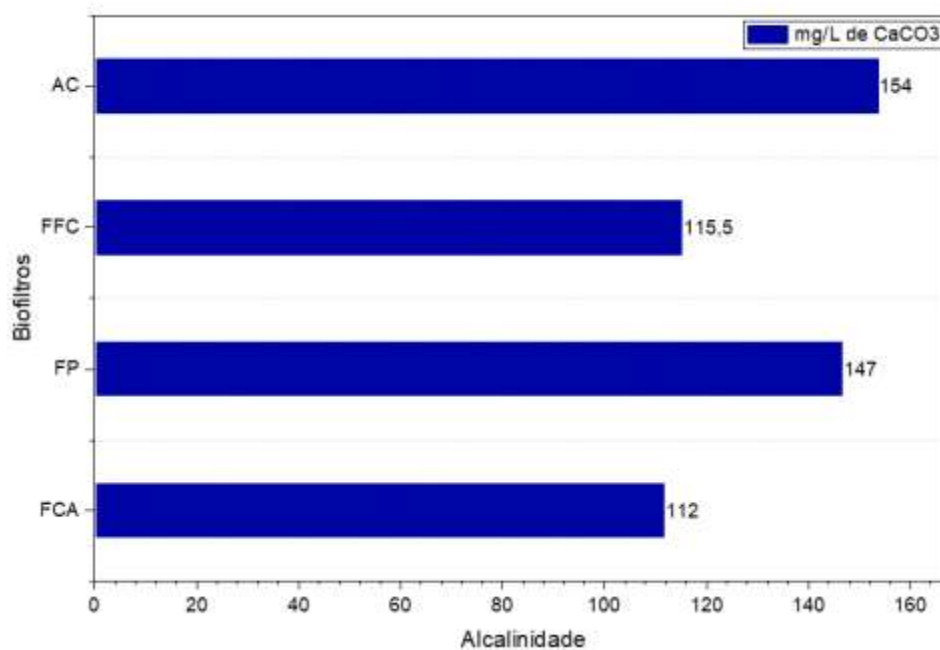
Fonte: Adaptado Pereira, 2021.

#### 4.2 Avaliação da Eficiência do Tratamento - Análises Físico-Químicas

#### 4.2.1 Alcalinidade

Foram realizadas análises do parâmetro alcalinidade, e os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 15.

Figura 15 – Análise do parâmetro alcalinidade em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.



Fonte: Autor, 2025.

A alcalinidade, expressa em mg/L de CaCO<sub>3</sub> (Marins *et al.*, 2002), é um parâmetro essencial para o controle de processos como coagulação química, amolecimento de águas e prevenção da corrosão. Esse parâmetro está vinculado ao poder tampão da água, que é a sua habilidade de resistir a mudanças no pH (BRASIL, 2013). Embora seja relevante, a Resolução CONAMA n.º 375 não impõe legalmente a necessidade de declarar a alcalinidade no descarte de efluentes. Mesmo assim, sua avaliação é significativa, particularmente em pesquisas sobre o tratamento de águas residuais.

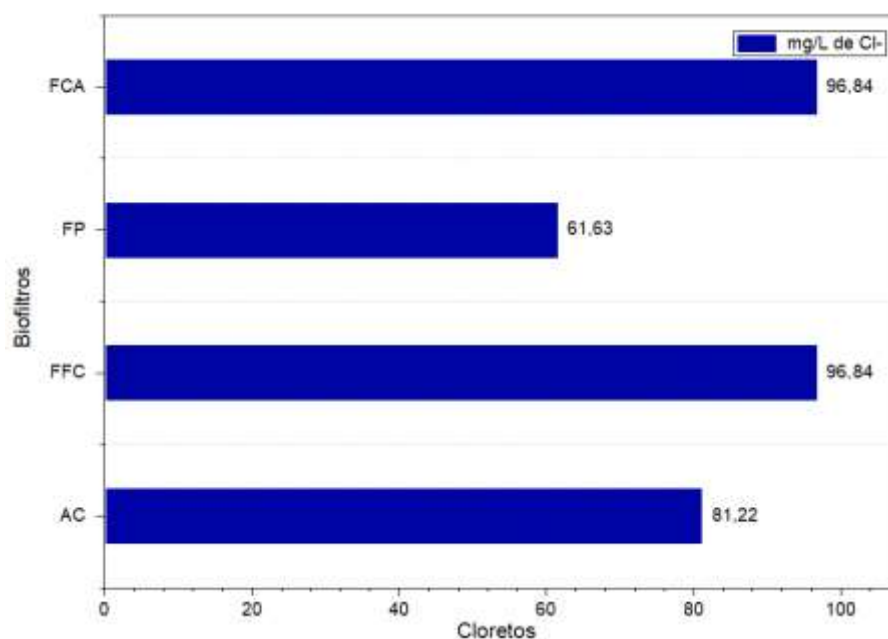
Conforme os dados exibidos na Figura 15, nota-se uma diminuição nos níveis de alcalinidade após a utilização dos filtros estudados. A amostra de água cinza bruta (AC) exibiu o valor mais elevado, com 154 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . Após a passagem pelos filtros, os valores diminuíram gradualmente: o filtro com pedra (FP) mostrou 147 mg/L, o filtro com fibra de coco (FFC) indicou 115 mg/L, e o filtro com carvão ativado e areia (FCA) alcançou o menor valor, com 112 mg/L. Esses resultados demonstram a eficácia dos materiais filtrantes, especialmente o FCA, que proporcionou a maior redução percentual, aproximadamente 27% em comparação com a amostra inicial.

Os valores observados neste estudo estão de acordo com os encontrados em outros estudos. Vakıl *et al.* (2014) encontraram concentrações de alcalinidade de até 185 mg/L, e May (2009) registrou valores de 132 mg/L em efluentes domésticos que incluíam frações da cozinha e do banheiro. Apesar de os resultados alcançados neste estudo se manterem em uma faixa considerada baixa, a diminuição significativa proporcionada pelos filtros, especialmente o FCA, comprova a efetividade do método sugerido.

#### **4.2.2 Cloretos**

A Figura 16 apresenta os valores referentes à concentração de íons cloreto nas amostras de efluente analisadas, incluindo os resultados obtidos para cada um dos filtros utilizados no estudo.

Figura 16 – Análise do parâmetro Cloretos em diferentes tipos de filtros:  
AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos para as concentrações de cloretos nas amostras de efluente revelam variações significativas entre os biofiltros testados. A amostra do efluente bruto apresentou uma concentração inicial de Cl<sup>-</sup> de 81,22 mg/L, servindo como ponto de referência para avaliação dos tratamentos. Para May (2009), o valor médio encontrado foi de 23 mg/L em efluentes provenientes de chuveiro e lavatório, que mostra uma diferença considerável e expressa o alto teor de sais presente no efluente analisado neste estudo. Nesse contexto, o cloreto pode estar entre os principais contribuintes para o aumento da salinidade.

Dentre os filtros, o filtro de carvão ativado apresentou a maior concentração de cloretos (96,84 mg/L). Esse aumento pode estar relacionado à presença de resíduos no material filtrante, o que sugere a necessidade de uma lavagem mais eficiente antes do uso, possivelmente utilizando uma base fraca, como bicarbonato de sódio, para remover íons residuais. É importante destacar que, antes da passagem do efluente, o biofiltro foi ambientado com água destilada, o que indica que algum resíduo ainda pode ter permanecido no material, contribuindo para o aumento da concentração de cloretos observada.

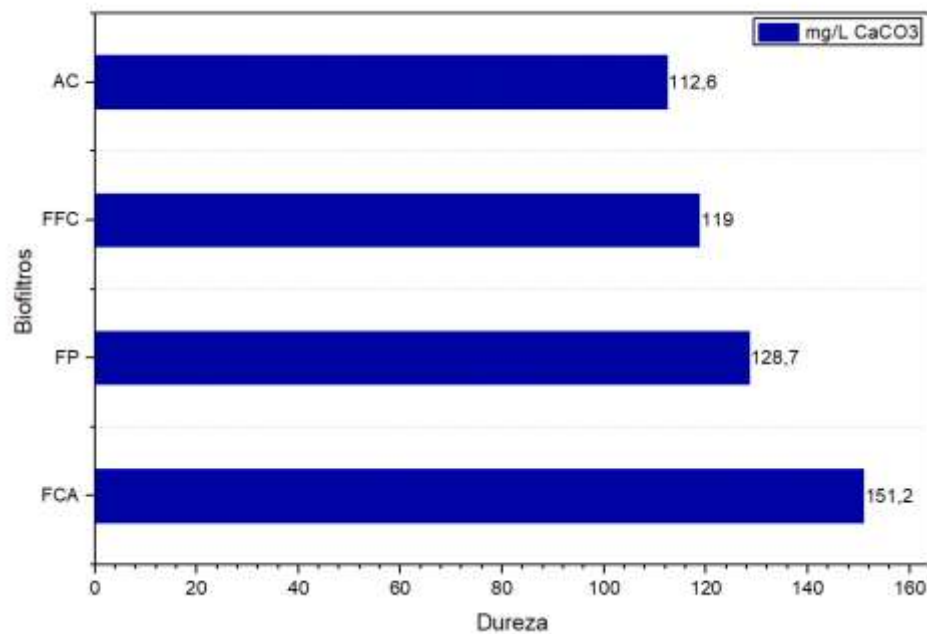
Por outro lado, o filtro padrão e o filtro com fibra de coco apresentaram concentrações mais baixas de cloreto, com valores de 61,63 mg/L e 64,93 mg/L, respectivamente. Esses resultados indicam que esses filtros não contribuíram para o aumento da concentração de

cloretos no efluente, ao contrário do filtro com carvão ativado. A escolha do agente ativante é crucial, pois, como observado, o cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ) pode lixiviar íons cloreto para o efluente tratado, elevando sua concentração.

#### 4.2.3 Dureza

Abaixo, na Figura 17, estão os resultados obtidos do parâmetro dureza.

Figura 17 – Análise do parâmetro Dureza em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.



Fonte: Autor, 2025.

As informações sobre a dureza total, exibidas na Figura 17, mostram diferenças significativas entre as amostras de água cinza bruta e aquelas passadas pelos diversos biofiltros. A água cinza bruta apresentou dureza classificada como branda, com uma concentração de 112,6 mg/L de  $CaCO_3$ . Após a filtração, notou-se um aumento nos valores desse parâmetro em todos os filtros, sendo que a fibra de coco exibiu uma leve elevação.

O biofiltro com carvão ativado exibiu a maior dureza, alcançando 151,2 mg/L, classificando a água como semi-branda. Esse aumento pode estar relacionado à liberação de minerais como cálcio e magnésio, possivelmente devido a uma falha na etapa de lavagem do carvão ativado antes do uso. Embora o carvão tenha sido ativado com cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ), composto que pode deixar resíduos minerais no material, a elevação da dureza parece estar mais associada à remoção inadequada desses resíduos durante a lavagem, e não diretamente ao processo de ativação.

Vale destacar, que há adição de sais devido o efluente analisado ser proveniente da pia da cozinha, contendo a presença de produtos de limpeza, vários cátions metálicos polivalentes dissolvidos. Predominantemente, a dureza da água é causada pelos íons  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . No entanto, outros cátions como  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Zn^{2+}$  também podem contribuir significativamente para esse parâmetro (DU et al., 2020).

Apesar de o efluente analisado ter origem na pia da cozinha — ambiente onde há uso constante de produtos de limpeza contendo sais — os resultados obtidos indicam que o aumento da dureza após a filtração não pode ser atribuído exclusivamente à composição do efluente. Se esses íons estivessem presentes de forma inerente no efluente, já teriam sido detectados na amostra controle (AC), antes da passagem pelo filtro.

Do ponto de vista prático para o reúso, o aumento da dureza para 151,2 mg/L, que classifica a água como semi-branda, apesar de ainda indicar baixa probabilidade de incrustações para usos gerais, exige uma avaliação mais crítica para aplicações específicas. Para Matos (2012), íons cálcio e magnésio podem estar ligados a substâncias como sulfatos, nitratos, cloretos e silicatos. Em ambientes industriais, como em caldeiras e equipamentos de refrigeração, a água com concentrações elevadas de cálcio e magnésio pode provocar incrustações, corrosão e redução na eficiência da transferência de calor (KELLAND, 2011). Para usos domésticos, como lavagem de roupas e louças, a água mais dura tende a reduzir a eficácia de sabões e detergentes, demandando um maior consumo desses produtos.

Portanto, para garantir a versatilidade e a segurança do reúso em uma gama mais ampla de aplicações, seria prudente considerar métodos de ativação que minimizem a lixiviação de

íons para o efluente. Por sua vez, o filtro padrão exibiu 128,7 mg/L, permanecendo na categoria de água branda, mas com um aumento significativo em comparação com a amostra inicial.

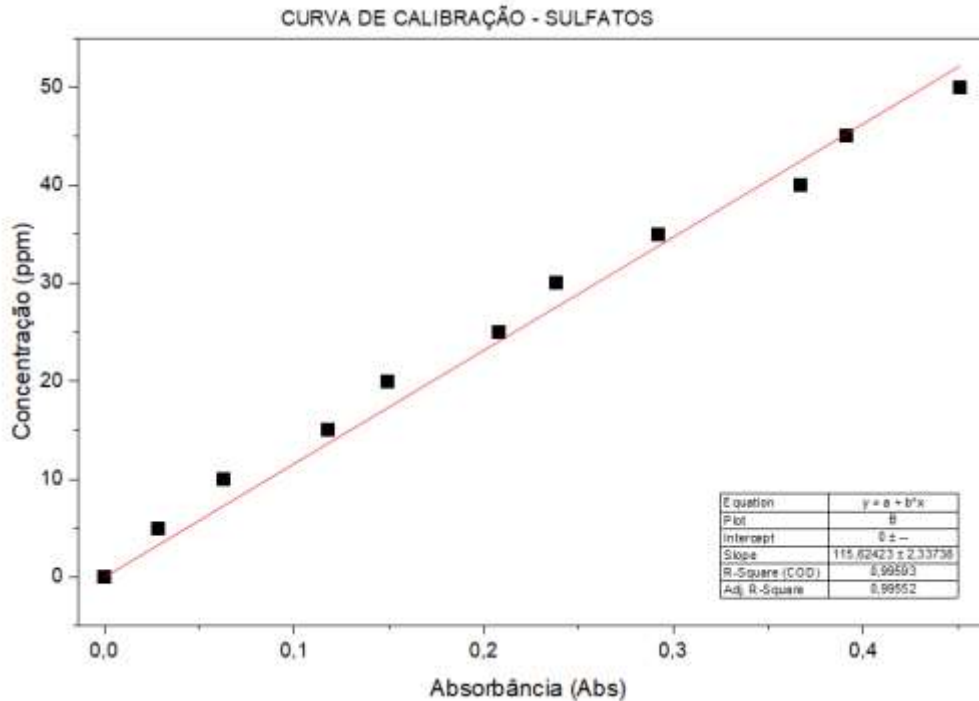
O biofiltro de fibra de coco apresentou um comportamento mais semelhante à água cinza bruta, com 119,0 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , permanecendo na classificação de água branda e exibindo um aumento menos significativo do parâmetro. Esses resultados indicam que os diversos materiais filtrantes não contribuíram para a redução da dureza; ao contrário, contribuíram para o aumento.

A presença de cátions multivalentes dissolvidos está relacionada à dureza da água (NOLASCO, 2020). Segundo a orientação técnica da FUNASA (BRASIL, 2013), o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e o magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) são os cátions mais importantes para esse parâmetro. Íons como ferro ( $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ), estrôncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) também podem contribuir, embora em menor grau. De modo geral, o efluente apresenta baixa dureza. Isso significa que o efluente analisado é classificado como brando e semi-brando, e indica baixa probabilidade.

#### **4.2.4 Sulfatos**

A análise da concentração de sulfatos nas amostras foi conduzida utilizando a curva de calibração, obtida por meio da espectrofotometria, conforme ilustrado no gráfico abaixo. A curva exibiu um comportamento linear, representado pela equação  $y = 108,03x + 2,3637$ , com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,993$ , o que sugere uma forte relação entre a absorbância e a concentração de sulfato (ppm). Com base nessa equação, as concentrações de sulfato nas amostras analisadas foram estimadas de acordo com suas absorbâncias.

Figura 18 – Curva de calibração para a determinação do parâmetro sulfatos.



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados indicaram que a amostra de efluente bruto exibiu uma das maiores concentrações de sulfato, chegando a 71,39 ppm. Esse valor é comparável ao observado na amostra filtrada com fibra de coco, que obteve 71,28 ppm. Esses dados indicam que o filtro com fibra de coco não foi eficiente na remoção de sulfatos, pois os níveis permaneceram praticamente os mesmos em comparação com o efluente original.

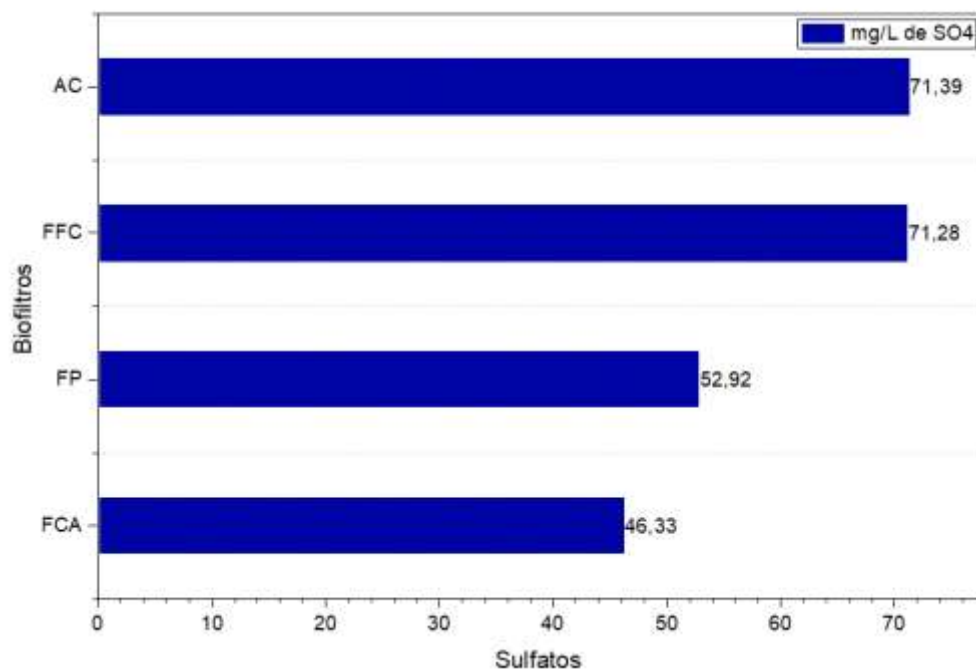
Tabela 8 - Valores de absorbância e concentração das amostras analisadas.

| <b>Filtros</b> | <b>Absorbância</b> | <b>Conc. Amostra</b> |
|----------------|--------------------|----------------------|
| Joazeiro       | 0,407              | 46,33191             |
| Padrão         | 0,468              | 52,92174             |
| Fibra de Coco  | 0,638              | 71,28684             |
| Bruto          | 0,639              | 71,39487             |

Fonte: Autor, 2025.

Por outro lado, o filtro padrão exibiu uma concentração de 52,92 ppm, o que indica uma diminuição moderada no conteúdo de sulfatos. Entretanto, o filtro feito com carvão ativado oriundo do *Z. Joazeiro* se destacou, apresentando uma concentração de 46,33 ppm, a mais baixa entre todas as amostras analisadas. O biofiltro contendo carvão ativado apresentou uma redução de 35% em relação à amostra bruta. Esse resultado demonstra que esse filtro tem um desempenho superior na remoção de sulfatos do efluente em comparação com os outros biofiltros testados.

Figura 19 – Análise do parâmetro Sulfatos em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.



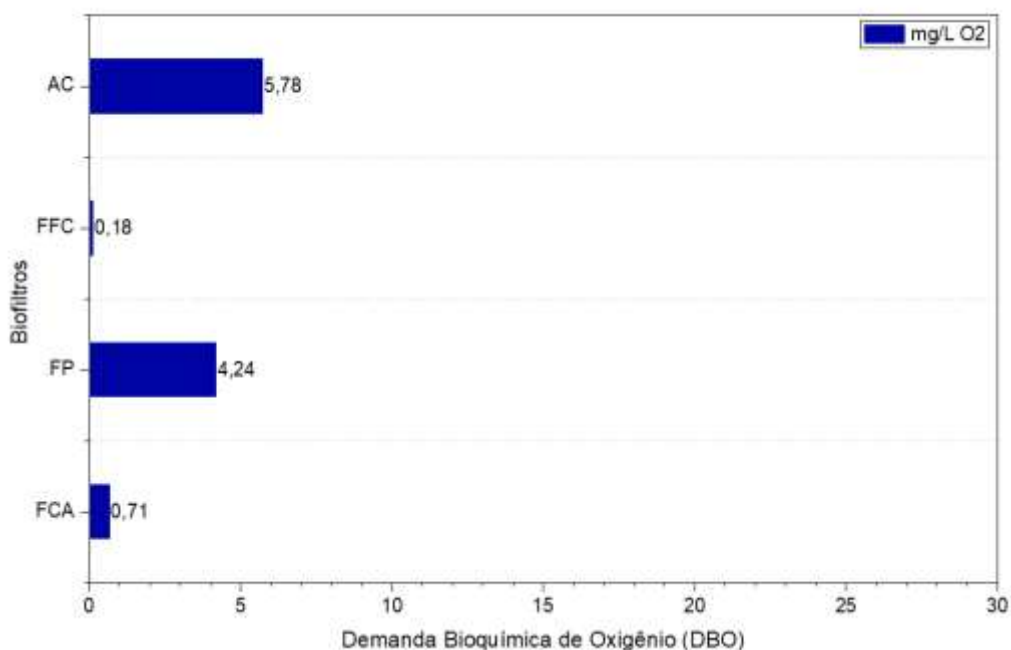
Fonte: Autor, 2025.

A concentração média de sulfatos em águas residuais é de aproximadamente 92 mg/L (MAY, 2009). O que mostra que todas as amostras analisadas apresentaram níveis inferiores a essa média. Ainda assim, a remoção parcial observada nos biofiltros reforça a importância da escolha adequada do meio filtrante para melhorar a eficiência do tratamento.

#### 4.2.5 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Foram realizadas análises de Demanda Bioquímica de Oxigênio, e os resultados obtidos podem ser visualizados no Figura 20.

Figura 20 – Análise do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em diferentes tipos de filtros: AC- Água Cinza Bruta; FFC - Fibra de Coco; FP - Filtro Padrão; FCA - Filtro com Carvão Ativado.



Fonte: Autor, 2025.

De acordo com os dados fornecidos, a amostra de efluente bruto apresentou uma DBO de 5,78 mgO<sub>2</sub>/L, um valor que excede o limite estipulado para águas doces de classe 2, conforme a Resolução CONAMA n.º 357/2005. Essa resolução estabelece um valor máximo de DBO<sub>5,20</sub> de até 3 mg/L para a classe 1, até 5 mg/L para a classe 2 e até 10 mg/L para a classe 3 (CETESB, 2011). Isso sugere que a água analisada estaria, no máximo, na classe 3, indicando um elevado grau de poluição orgânica, geralmente ligado à falta de sistemas adequados de esgotamento sanitário doméstico e industrial.

Após o tratamento, notou-se uma diminuição variável nos níveis de DBO, dependendo do tipo de filtro empregado. O filtro padrão causou uma leve redução na carga orgânica, levando a uma DBO de 5,24 mgO<sub>2</sub>/L, que ainda excede o limite para a classe 2. Por outro lado, o filtro

com carvão ativado apresentou uma eficácia significativa, diminuindo a DBO para 0,71 mgO<sub>2</sub>/L e, apresentando uma redução expressiva de 87,7% em relação à amostra inicial. Esse valor classifica a água tratada como classe 1, o que a torna apropriada para abastecimento doméstico após tratamento convencional, de acordo com a CONAMA. É importante destacar que a qualidade da água para consumo humano é avaliada por diversos parâmetros, não apenas por esse indicador isolado.

O biofiltro de fibra de coco também apresentou um bom desempenho, alcançando uma DBO de 0,18 mgO<sub>2</sub>/L, um valor ainda mais baixo que o biofiltro com CA. Isso pode indicar uma remoção altamente eficaz da carga orgânica ou uma limitação na atividade microbiana, o que requer mais investigação para confirmar a consistência do resultado.

Embora o valor de DBO para o biofiltro de fibra de coco (0,18 mgO<sub>2</sub>/L) seja notavelmente baixo, a ressalva sobre uma possível limitação na atividade microbiana merece uma análise mais aprofundada para determinar a real causa desse desempenho. Uma remoção tão eficiente da carga orgânica pela fibra de coco pode ser atribuída à sua estrutura porosa e capacidade adsorptiva, similar à do carvão ativado, ou a mecanismos de filtração física muito eficazes. No entanto, a hipótese de inibição microbiana não pode ser descartada sem investigação adicional.

A atividade antimicrobiana de componentes orgânicos liberados pela fibra de coco poderia interferir na medição da DBO, resultando em valores artificialmente baixos. Alguns materiais vegetais podem conter compostos fenólicos ou outros metabólitos secundários que, ao serem lixiviados, podem ser tóxicos para as culturas microbianas utilizadas no ensaio de DBO, comprometendo a oxidação da matéria orgânica.

Para desmistificar essa observação e confirmar a validade e consistência do resultado da fibra de coco, testes complementares seriam cruciais, como o testes de toxicidade aguda, a fim de verificar a presença de substâncias inibidoras que possam afetar a atividade biológica; a Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), com o intuito de comparar a DBO com a DQO do efluente pós-tratamento, corroborando para a relação entre a DBO muito baixa e DQO permanecer elevada, indicaria a presença de matéria orgânica não biodegradável ou a inibição dos micro-organismos que realizam a oxidação biológica, além de análises de lixiviados da fibra de coco, objetivando Identificar e quantificar a presença de compostos com

potencial inibitório ou antimicrobiano que possam ser liberados pelo material filtrante para a água. A clareza sobre o desempenho da fibra de coco é fundamental para uma avaliação comparativa justa da eficácia do carvão ativado, garantindo que o valor obtido para o CA, de 0,71 mgO<sub>2</sub>/L, seja corretamente posicionado em termos de eficiência no tratamento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises físico-químicas conduzidas durante este estudo possibilitaram a avaliação da qualidade da água residual antes e depois do tratamento com carvão ativado, produzido a partir das podas do *Ziziphus Joazeiro*. A alcalinidade, os cloretos, a dureza, os sulfatos e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) foram os parâmetros analisados, todos essenciais para determinar o nível de contaminação do efluente e a eficácia do processo de adsorção.

O biofiltro com carvão ativado (FCA) exibiu uma redução percentual de cerca de 27% entre os filtros analisados, variando de 154 mg/L a 112 mg/L, o que representa a maior redução percentual entre todos os filtros testados. Em relação aos sulfatos, o biofiltro com carvão ativado apresentou o menor valor registrado, 46,33 ppm, indicando uma redução de 35% em comparação com a amostra bruta. No que diz respeito à DBO<sub>5,20</sub>, um dos principais indicadores da carga orgânica nos efluentes, a amostra submetida ao tratamento com carvão ativado exibiu um valor final de 0,71 mgO<sub>2</sub>/L, em contraste com o valor inicial de 5,76 mgO<sub>2</sub>/L. Isso indica uma diminuição considerável de 87,7%.

A análise morfológica do carvão ativado por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrou uma superfície porosa, com grãos de tamanho médio de 3,46 µm e poros majoritariamente mesoporosos, apresentando um diâmetro médio de 21 nm. Essa configuração facilita a adsorção de contaminantes, melhorando a eficácia do material no tratamento de efluentes.

Por fim, a combinação do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) foi fundamental para otimizar a produção de carvão ativado, possibilitando a redução de custos por meio da diminuição da temperatura de pirólise e da quantidade de reagente, além de evitar desperdícios. A morfologia obtida mostrou-se apropriada para aplicações ambientais, apresentando um bom desempenho na remoção de alcalinidade, sulfatos e DBO. Entretanto, os parâmetros de dureza e cloretos mostraram menor eficácia, sugerindo que os biofiltros ou as condições operacionais precisam ser ajustados.

## 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para otimizar e aprofundar o uso do carvão ativado de *Ziziphus Joazeiro* no tratamento de efluentes, as seguintes sugestões de trabalhos futuros são propostas:

- Otimização da Eficiência Adsorptiva: É essencial aprimorar a capacidade de remoção de poluentes específicos, como DBO, sulfatos e alcalinidade. Isso pode ser alcançado através de uma otimização mais abrangente dos parâmetros de pirólise (temperatura e tempo) e da proporção ativante/precursor, utilizando o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), focando na remoção percentual dos contaminantes como variável de resposta.

- Caracterização Quantitativa da Porosidade: Complementar a análise morfológica (MEV) com a quantificação precisa da porosidade do carvão ativado. Técnicas como a adsorção de nitrogênio (isotermas de BET) e a análise da distribuição de tamanho de poros (BJH ou DFT) forneceriam dados exatos sobre a área superficial específica e o volume de poros, detalhando a distribuição de micro, meso e macroporos.

- Exploração de Agentes Ativantes Alternativos: Devido ao aumento de cloretos e dureza no efluente tratado, atribuído ao uso de cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ), é crucial investigar e avaliar agentes ativantes alternativos. Isso inclui o estudo de ácidos como o fosfórico ( $H_3PO_4$ ) ou bases como o hidróxido de sódio (NaOH), ou até mesmo métodos de ativação física, para evitar a introdução desses íons no efluente.

- Estudos de Longa Duração e em Escala Piloto: Para confirmar a viabilidade e a consistência do desempenho dos biofiltros, são necessários estudos em maior escala e de longa duração. Isso validaria a durabilidade, estabilidade e operacionalidade do carvão ativado e de outros materiais filtrantes sob condições operacionais mais diversas, essenciais para a transição da bancada para a aplicação prática.

- Análise de Ciclo de Vida e Viabilidade Técnico-Econômica: Para impulsionar a adoção do carvão ativado de *Z. Joazeiro*, é fundamental realizar uma Análise de Ciclo de Vida completa e um estudo de viabilidade técnico-econômica detalhado. Isso quantificaria os impactos ambientais e compararia os custos de produção e operação com carvões ativados comerciais e outras tecnologias, reforçando sua sustentabilidade e economicidade.

## REFERÊNCIAS

- ACHAW, O.-W. A Study of the Porosity of Activated Carbons Using the Scanning Electron Microscope, **Scanning Electron Microscopy**. ISBN: 978-953- 51-0092-8, InTech, (2012).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Manual de Usos Consuntivos de Água no Brasil**. Brasília: [s.n.].
- ALLEN, L.; CHRISTIAN-SMITH, J.; PALANIAPPAN, M. Overview of greywater reuse: The potential of greywater systems to aid sustainable water management. Informally published 95 manuscript, Pacific Institute, Oakland, California. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 3, p. 356-363, 2010.
- AMARAL, Fernando Ferraz et al. Aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para Otimização do Processo de Solda a Ponto no Aço Galvanizado AISI 1006. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 2, p. 129-142, 2018.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES. **Reúso nas Crises Hídricas e Oportunidades no Brasil**. Disponível em: [https://abes-dn.org.br/pdf/Reuso\\_nas\\_Crises.pdf](https://abes-dn.org.br/pdf/Reuso_nas_Crises.pdf).
- AYERS, R. S. et al. A qualidade da água na agricultura. **Estudos FAO Irrigação e Drenagem**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218 p.
- BACCAR, R.; BOUZID, J.; FEKI, M.; MONTIEL, A. Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 162, p. 1522-1529, 2024.
- BAIRD, C. Química Ambiental. 2. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2002.
- BHATNAGAR, A.; SILLANPAA, M. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment—A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 157, n. 2 e 3, p. 277-296, ago. 2024.
- BOLIGON, Jacqueline. **Produção e caracterização de carvão ativado a partir da borra de café solúvel**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2015.
- BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2005). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF: Imprensa Oficial.
- BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017*. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde.

Anexo XX – Padrões de potabilidade da água para consumo humano. Brasília: Ministério da Saúde, 2013.

BARCELLOS, D. C. Desempenho de um forno de carbonização semi-contínuo tipo container para produção de carvão vegetal, **Revista Biomassa e Energia Renabio**, 1, n.2, p. 183-189, 2004

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Novo Marco Legal do Saneamento Básico**. Brasil, 2020. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm). Acesso em: 03 ago. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre 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. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 mai. 2011, Seção 1, p. 89.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, 2014. Disponível em: [https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia\\_controle\\_qualidade\\_agua.pdf](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf).

BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. **Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**. [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rtfcd\\_altrd\\_res\\_393\\_2007\\_397\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf) Acesso em: 22 de jun de 2025.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 430 DE 13 DE MAIO DE 2011. DISPÕE SOBRE AS CONDIÇÕES E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES. **Diário Oficial da União**. Brasília, 16 de maio de 2011. Seção 1, p. 89. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/26738562/pg-89-secao-1-diario-oficial-da-uniaodou-de-16-05-2011>

BRITTO, J.M.; RANGEL, M.C. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. **Química Nova**, v.31, n.1, p.114-122, 2008.

BRUM, S. S. et al. Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. **Lavras**, v.31, n. 5, p. 1048 – 1052. Out./Jul. 2008.

CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F.; FILHO, J. H.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; OLIVEIRA, I. C. Reacción Sulfática Interna (RSI) como degradación de la matriz cementante: comportamiento de mezclas dosificadas con diferentes contenidos de contaminación por sulfato. **Revista ALCONPAT**, p. 119-134, 2017.

CARVALHO, R. S.; FILHO, J. S. S.; SANTANA, L. O. G.; GOMES, D. A.; MENDONÇA, L. C.; FACCIOLI, G. G. Influência do reuso de águas residuárias na qualidade 97

microbiológica do girassol destinado à alimentação animal. **Ambi-Água**, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2013. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1116>.

CEARÁ. Resolução COEMA nº 2 de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 25 de novembro de 2002. Fortaleza, **Diário Oficial do Estado**, 21 fev. 2017.

CERVO, T. **Influência da finura e do teor de pozolana na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

CETESB. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos. São Paulo: **CETESB**; Brasília: ANA, 326p., 2011.

COSTA JUNIOR, S. S. **Carvão ativado produzido a partir do endocarpo de coco da Baía (Coccus nucifera) aplicado ao tratamento de efluente têxtil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2014.

CRNH, **Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2005) Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005** – Estabelece critérios gerais para reuso de água potável. Disponível em: [http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/cnrh/54\\_2005\\_criterios\\_gerais\\_uso\\_agua.pdf](http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/cnrh/54_2005_criterios_gerais_uso_agua.pdf)

CUNICO, M. W. M. et al. Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. **Visão Acadêmica**, v.9, n.1, p. 23-32. 2008.

DIAS, D. L. Demanda Bioquímica de Oxigênio. **Brasil Escola**. Disponível em: [http://www.ins.gov.pe/repositorioaps/0/4/jer/cnsp\\_resanti\\_documentos\\_tecnicos/Manual\\_Mantenimiento\\_para\\_equipo\\_llaboratorio.pdf](http://www.ins.gov.pe/repositorioaps/0/4/jer/cnsp_resanti_documentos_tecnicos/Manual_Mantenimiento_para_equipo_llaboratorio.pdf). Acesso em: 03 set. 2024.

FARIAS, M. S. S. de. **Monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Cabelo**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

GATABI, M. P.; MOGHADDAM, M. H.; GHORBANI, M.; Point of zero charge of maghemite decorated multiwalled carbon nanotubes fabricated by chemical precipitation method. **Journal of Molecular Liquids**, [S.l.]. v. 216, p. 117–125, abr. 2016.

GONÇALVES, M. et al. Produção de carvão a partir de resíduo de erva-mate para a remoção de contaminantes orgânicos de meio aquoso. **Revista Ciência Agrotécnica**, v. 31, p. 1386-1391, ago. 2024.

GONÇALES, M. Preparação de carvão ativado e impregnação com ferro ou cromo para aplicações em processos de descontaminação ambiental. 2008. Tese (Doutorado em Agroquímica) – **Universidade Federal de Lavras**. Lavras. 2008.

GONÇALVES, R. F. et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme**. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, v. 1, p. 171-278, 2001.

- GUILARDUCI, V. V. S.; MESQUITA, J. P.; MARTELLI, P. B.; GORGULHO, H. F. Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. **Química Nova**, 29, 6 (2006) 1226-1232.
- HAGE, D. S. et al. Química analítica e análise quantitativa. São Paulo: **Pearson Prentice Hall**, 1. ed., 2012.
- HOLLER, F. J. et al. Princípios de análise instrumental. 6. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2009. 1056 p.
- KATHERESAN, V.; KANSEDO, J.; LAU, S. Y. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 4676-4697, ago. 2024.
- KELLAND, M. A. Effect of Various Cations on the Formation of Calcium Carbonate and Barium Sulfate Scale with and without Scale Inhibitors. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2011.
- LENZI, et al. **Introdução à química da água: Ciência, vida e sobrevivência**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 603 p.
- LIMA, Herbert Henrique de Souza. **Tratamento físico-químico da vinhaça por coagulação e adsorção em carvão ativado do bagaço da cana de açúcar**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.
- LOPES, J. D. A. **Remoção de compostos persistentes com biorreator de membrana e adsorção em carvão ativado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2017.
- LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2024. 544 p.
- MANGUEIRA, E. S. V. **Produção de carvão ativado de endocarpo de coco aia (Cocos nucifera) aplicado ao processo de adsorção de herbicida metribuzin**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2014.
- MARCELLE M. P. S. **Caracterização de Águas Cinzas e Negras de Origem Residencial e Análise da Eficiência de Reator Anaeróbio com Chicanas**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento – PPGRHS, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.
- MARINS, R. V., PARAQUETTI, H. H. M., AYRES, G. A. Alternativa analítica para especiação físico-química de mercúrio em águas costeiras tropicais. **Quim. Nova**, v. 25, n. 3, 372-378, 2002.
- MAY, S. **Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações**. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2009.
- MEIRA, R. M. et al. **Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos**. In: Instituto Brasileiro do Concreto - 44º Congresso Brasileiro, 2002.

MELAKU, S.; NATARAJAN, P. Status of integrated aquaculture-Agriculture systems in Africa. **International Journal of Fisheries and Aquatic Studies**, 7: 263-269, 2019.

MENDES, Fabrício de Oliveira. **Avaliação das ações moluscicida e antimicrobiana de extratos hidroalcoólicos de Ziziphus joazeiro mart. Expostos a altas taxas de doses de radiação Gama de 60Co**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2010.

MIELI, João. **Reuso de água domiciliar**. Dissertação (mestrado) - Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2001.

MOHAMMAD, S. S.; DAUD, W. M. A. W.; HOUSHMAND, A.; SHAMIRI, A. A. review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide Adsorption. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 89 (2010) 143-151.

MONIZ, K. L. A. **Caracterização morfológica de sementes e frutos e estudos da germinação da espécie Ziziphus joazeiro Mart (Rhamnaceae)**. 2002. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Estadual Feira de Santana Bahia, 2002.

MOUSA, S.; ABDEL-MAGEED, A. (2018). Pore size distribution and adsorption characteristics of natural clays. **Journal of Environmental Management**, 210, 84-92.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Uso de bioadsorventes lignocelulósicos na remoção de poluentes de efluentes aquosos**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. NEBES, E. M. Produção de carvão ativado a partir da casca de sementes de pinhão da Auracária angustifolia. 2019. Monografia (Graduação em Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2019.

NEBES, E. M. **Produção de carvão ativado a partir da casca de sementes de pinhão da Auracária angustifolia**. 2019. Monografia (Graduação em Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2019.

NOLASCO, G. M. et al. Análise da alcalinidade, cloretos, dureza, temperatura e condutividade em amostras de água do município de Almenara/MG. **Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 52–64, 2020. Disponível em: <https://recital.almenara.ifnmg.edu.br/recital/article/view/60>.

OLIVEIRA, V. M. F. **Melhoria das condições da água utilizando filtro de areia modificado com biomassa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

OROZCO, M. M. D. **Filtração**. Rondônia, 2012. 44 slides, color. Acesso em: 25 jun. 2025

Overview of Greywater Reuse: **The Potential of Greywater Systems to Aid Sustainable Water Management**.

PEREIRA, J. R. et al. **Bio sand fillers vegeta: Uma proposta para sustentabilidade hídrica na macrorregião dos sertões de Crateús**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 16 a 19 jun. 2019, Natal, no Rio Grande do Norte. Anais [...]. Natal: ABES, 2019.

- PIMENTA, I. A. (2019) **Análise do silicato de potássio (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) obtido da casca do arroz como coagulante para tratamento de água para consumo humano**. Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas – TO.
- RAMPELOTTO, Geraldo. **Caracterização e Tratamento de Águas Cinzas Visando Reuso Doméstico**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- RAPOPORT, Beatriz. **Águas Cinzas: Caracterização, Avaliação Financeira e Tratamento Para Reuso Domiciliar e Condominial**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2004.
- REBOUÇAS, A. C., **Águas no Brasil: abundância, desperdício e escassez**. Bahia Análise & Dados. Salvador, v. 13, n. ESPECIAL, p. 341-345, 2003.
- ROCHA, Fábio R. P.; TEIXEIRA, Leonardo S. G. **ESTRATÉGIAS PARA AUMENTO DE SENSIBILIDADE EM ESPECTROFOTOMETRIA UV-VIS**. (Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP) Departamento de Engenharia e Arquitetura, Quim. Nova, Vol. 27, No. 5. Salvador - BA, 2004.
- SANTOS NETO, J. V.; OLIVEIRA, F. F.; CHIABAI, R.; MORGAN, L. C.; ZANDONADE, E.; BAZZARELLA, B. B.; GONÇALVES, R. F. **Filtração terciária com pré-tratamento físico-químico em uma ete do tipo uasb + biofiltros aerados submersos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., Anais. Joinville, SC: ABES, 2003. II 142.
- SCHNEIDER, E.L. **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.
- SILVA, R. V. T. O. **Resíduos de coco, acerola e caju para produção de carvão ativado**. 2015. Dissertação (Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco. Recife. 2015.
- SILVA, Tássia Campos de Lima. **Avaliação comparativa de cascas e folhas de Ziziphus joazeiro Mart (Rhamnaceae) em relação aos perfis fitoquímico e toxicológico e as atividades antioxidante e antimicrobiana**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2009.
- SOUZA, J. I. R. et al. **Uso de água residuária da piscicultura na produção de plantas nativas da caatinga**. **Jornada de Iniciação Científica e Extensão**, 15: 1-2, 2020.
- TELLES, D. D. et al. **Reúso da Água: Conceitos, Teorias e Práticas**. 2º Edição ed. São Paulo - SP: Fundação de Apoio a Tecnologia, 2010.
- TEMOTEO SEGUNDO, J. J. B. **Produção de carvão ativado a partir do endocarpo de coco visando remoção de paracetamol por adsorção**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2018.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Universidade Federal de Minas Gerais, 4ª Ed., Belo Horizonte, 2014.

WASHINGTON, D.C. **Manual de mantenimiento de equipos de laboratorio.**  
**Organización Panamericana de la Salud.** Área de tecnología y prestación de servicios de salud. Unidad de medicamentos esenciales, vacunas y tecnologías en salud. THS/EV, 2005. Disponible em:

[http://www.ins.gob.pe/repositorioaps/0/4/jer/cnspresantidocumentostecnicos/Manual\\_Mantenimiento\\_para\\_equipo\\_laboratorio.pdf](http://www.ins.gob.pe/repositorioaps/0/4/jer/cnspresantidocumentostecnicos/Manual_Mantenimiento_para_equipo_laboratorio.pdf). Acesso em: ago. 2024.

WERLANG, Eliana Betina et al. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 3, n. 1, 2013.