



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE**  
**ALIMENTOS**

**JUCIMARA SILVA**

**PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DO ENDOCARPO DA BOCAIÚVA PARA**  
**REMOÇÃO DE COMPOSTOS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

**Palmas/TO**

**2025**

**Jucimara Silva**

**Produção de carvão ativado do endocarpo da bocaiúva para remoção de compostos na indústria alimentícia**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência em Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre (a) em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

**Linha de pesquisa:** Controle de qualidade e segurança alimentar.

**Orientador(a):** Dra. Patrícia Martins  
Guarda

**Coorientador (a):** Dra. Glêndara Aparecida de Souza Martins

**Palmas/TO**

**2025**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- S586p Silva, Jucimara.  
Produção de carvão ativado do endocarpo da Bocaiuva para remoção de compostos na indústria alimentícia. / Jucimara Silva. – Palmas, TO, 2025.  
92 f.
- Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2025.  
Orientadora : Patrícia Martins Guarda  
Coorientadora : Glêndara Aparecida de Souza Martins
1. Adsorção. 2. Carvão ativado. 3. Planejamento experimental. 4. Resíduos agroindustriais. I. Título

**CDD 664**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**


JUCIMARA SILVA

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO DO ENDOCARPO DA BOCAIÚVA PARA  
REMOÇÃO DE COMPOSTOS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos Foi avaliado para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Tecnologia de Alimentos e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 30 /05/2025


Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 PATRICIA MARTINS GUARDA  
Data: 02/07/2025 21:17:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Patrícia Martins Guarda(Orientadora)


UFT

Documento assinado digitalmente  
 CLARISSA DAMIANO  
Data: 01/07/2025 20:19:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Clarissa Damiani

UFT

Documento assinado digitalmente  
 CRISTIANE MARTINS VELOSO  
Data: 01/07/2025 23:10:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Cristiane Martins Veloso

UESB

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido força, sabedoria e saúde para chegar até aqui. Sem a sua presença constante em minha vida, este momento não seria possível.

Em seguida, expresso minha profunda gratidão à minha orientadora, Dra. Patricia Martins Guarda, pela paciência, dedicação e compreensão com que me acompanhou ao longo desta trajetória. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço também à minha coorientadora, Dra. Glêndara Aparecida de Souza Martins, pelo apoio e por todas as contribuições valiosas que tornaram este trabalho mais consistente e enriquecedor.

Não poderia deixar de mencionar a minha família, que, mesmo de longe, sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio incondicional, amor e motivação nos momentos em que mais precisei.

Sou igualmente grata à equipe do LAPEQ, que sempre me ajudou no que pôde, contribuindo de maneira fundamental para a realização das atividades deste trabalho.

Agradeço ainda ao professor Emerson Adriano Guarda e à professora Caroline Roberta Freitas Pires pelo apoio prestado, pela disponibilidade e pelas orientações que tanto contribuíram para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida.

A todos vocês, o meu sincero muito obrigada!

## RESUMO

O fruto da Bocaiúva é encontrado principalmente no Cerrado brasileiro e tem ampla utilização na indústria para elaboração de produtos como sorvetes, farinhas, doces e na extração de óleo. Este trabalho teve como objetivo produzir carvão ativado por ativação química do endocarpo da Bocaiúva e sua utilização para a remoção de compostos indesejáveis na indústria alimentícia, agregando valor a este resíduo do Cerrado. A ativação química foi realizada com hidróxido de sódio (NaOH) e ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), seguida da caracterização do carvão ativado obtido. A otimização do processo de adsorção do azul de metileno foi conduzida por meio de um planejamento experimental utilizando a metodologia de superfície de resposta, com delineamento composto central rotacional (DCCR), totalizando 17 ensaios, incluindo pontos axiais e centrais. As variáveis independentes avaliadas foram o tempo de contato (X1), a massa de carvão ativado (X2) e a concentração do adsorvato (X3), enquanto a variável dependente foi a eficiência de remoção do corante. As condições experimentais variaram entre 39,55 a 140,45 minutos de contato, 0,03 a 0,37 g de massa e concentrações de 0,98 a 6,02 mg/L, permitindo a modelagem e otimização do sistema. Os carvões ativados apresentaram desempenhos expressivos na remoção do azul de metileno, com percentuais que atingiram até 100% para o AC10 e 95,56% para o AC70. Nos ensaios com ácido gálico, o carvão AC10 obteve remoções superiores a 99% em condições otimizadas. Para o ácido tânico, os carvões também se mostraram eficazes, com remoções superiores a 93% em concentrações menores. Já na remoção de íons cálcio (Ca<sup>2+</sup>), o AC30 foi capaz de alcançar 100% de remoção, evidenciando seu potencial no tratamento de águas duras. Os modelos matemáticos gerados apresentaram coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) entre 84% e 94%, indicando forte correlação entre as variáveis testadas e a eficiência de adsorção. Com esta síntese, foi possível valorizar um resíduo agroindustrial de fácil obtenção e baixo custo, promover o aproveitamento sustentável do endocarpo da Bocaiúva e demonstrar a viabilidade do carvão ativado produzido como uma alternativa eficaz e ambientalmente correta para aplicação na indústria alimentícia e no tratamento de efluentes.

**Palavras-chave:** adsorção, carvão ativado, planejamento experimental, resíduos agroindustriais, indústria alimentícia.

## ABSTRACT

The fruit of *Bocaiúva* is found mainly in the Brazilian Cerrado and is widely used in the industry for the preparation of products such as ice cream, flour, sweets and for oil extraction. This study aimed to produce activated carbon by chemical activation of the endocarp of *Bocaiúva* and its use for the removal of undesirable compounds in the food industry, adding value to this Cerrado residue. Chemical activation was performed with sodium hydroxide (NaOH) and phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ), followed by characterization of the activated carbon obtained. The optimization of the methylene blue adsorption process was conducted through an experimental design using the response surface methodology, with a central composite rotational design (DCCR), totaling 17 tests, including axial and central points. The independent variables evaluated were the contact time (X1), the mass of activated carbon (X2) and the concentration of the adsorbate (X3), while the dependent variable was the dye removal efficiency. The experimental conditions ranged from 39.55 to 140.45 minutes of contact, 0.03 to 0.37 g of mass and concentrations from 0.98 to 6.02 mg/L, allowing the modeling and optimization of the system. The activated carbons showed expressive performances in the removal of methylene blue, with percentages that reached up to 100% for AC10 and 95.56% for AC70. In the tests with gallic acid, the AC10 carbon obtained removals above 99% under optimized conditions. For tannic acid, the carbons also proved to be effective, with removals above 93% at lower concentrations. In the removal of calcium ions ( $Ca^{2+}$ ), AC30 was able to achieve 100% removal, evidencing its potential in the treatment of hard water. The mathematical models generated presented coefficients of determination ( $R^2$ ) between 84% and 94%, indicating a strong correlation between the variables tested and the adsorption efficiency. With this synthesis, it was possible to value an easily obtainable and low-cost agro-industrial residue, promote the sustainable use of the endocarp of *Bocaiúva* and demonstrate the viability of the activated carbon produced as an effective and environmentally friendly alternative for application in the food industry and in the treatment of effluents.

**Keywords:** adsorption, activated carbon, experimental design, agro-industrial residues, food industry.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> (A) Frutos maduros de bocaiuva; (B) fruto com e sem epicarpo; (C) coquinho (endocarpo + amêndoa); (D) fruto de bocaiuva cortado ao meio evidenciando todas as partes do fruto; (E) amêndoas.	4
<b>Figura 2-</b> Tipos de isotermas de acordo com a classificação da IUPAC	10
<b>Figura 3-</b> Etapas de elaboração da metodologia do projeto	14
<b>Figura 4-</b> Fluxograma de remoção do endocarpo da Bocaiuva	17
<b>Figura 5-</b> Sequência de preparação da matéria-prima pré-aquecida	18
<b>Figura 6-</b> Fluxograma de preparo do endocarpo da Bocaiuva in natura	18
<b>Figura 7-</b> Etapas envolvidas no processo de ativação química dos tipos de carvões ativados e agente ativante	20
<b>Figura 8-</b> Fluxograma geral da produção dos diferentes carvões ativados	21
<b>Figura 9-</b> Análises feitas para a caracterização dos carvões produzidos	23
<b>Figura 10-</b> Fluxograma de produção de carvão ativado com impregnação de $H_3PO_4$ em diferentes granulometrias	26
<b>Figura 11-</b> Testes de adsorção com diferentes compostos	30
<b>Figura 12-</b> Carvão ativado com NaOH produzido a partir do endocarpo da Bocaiuva, nas diferentes granulometrias	35
<b>Figura 13-</b> Análise termogravimétrica (TGA) para endocarpo de Bocaiuva	36
<b>Figura 14-</b> Espectrometria de Infravermelho dos de carvões ativados impregnados com NaOH	37
<b>Figura 15-</b> Microscopia eletrônica de varredura referente a biomassa (endocarpo de Bocaiuva in natura) e aos diferentes tipos de carvão ativado	40
<b>Figura 16-</b> EDS do endocarpo de Bocaiuva (biomassa)	42
<b>Figura 17-</b> Análise EDS para carvão P-CIB	43
<b>Figura 18-</b> Análise EDS para carvão P-ICB	43
<b>Figura 19-</b> Análise EDS para carvão S-ICA	44
<b>Figura 20-</b> Análise EDS para carvão P-ICA	44
<b>Figura 21-</b> Análise EDS para carvão S-ICB	45
<b>Figura 22-</b> Microscopia eletrônica de varredura referente a biomassa (endocarpo de Bocaiuva in natura) e aos diferentes tipos de carvão ativado	46

<b>Figura 23-</b> Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvão ativado AC10 de endocarpo de Bocaiuva	48
<b>Figura 24-</b> Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvão ativado AC16 de endocarpo de Bocaiuva	49
<b>Figura 25-</b> Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvão ativado AC30 de endocarpo de Bocaiuva	50
<b>Figura 26-</b> Gráficos de isoterma de Adsorção/Dessorção dos diferentes de carvões	53
<b>Figura 27-</b> Gráficos de isoterma de Adsorção/Dessorção dos carvões ativados com $H_3PO_4$ em diferentes granulometrias	54
<b>Figura 28-</b> Gráficos gerados no experimento para endocarpo de Bocaiuva	58
<b>Figura 29 -</b> Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento para carvão AC16 de endocarpo de Bocaiuva	59
<b>Figura 30-</b> Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento para carvão AC30 de endocarpo de Bocaiuva	59
<b>Figura 31 -</b> Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento para carvão AC70 de endocarpo de Bocaiuva	60
<b>Figura 32–</b> Gráfico de Pareto para endocarpo e para os carvões ativados de endocarpo de Bocaiuva em diferentes granulometrias	62
<b>Figura 33-</b> Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento com ácido gálico	65
<b>Figura 34–</b> Gráfico de Pareto para carvão (AC10) com ácido gálico	65

## **LISTA DE QUADROS**

**Quadro 1-** Etapas do trabalho

15

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Identificação dos tipos de carvões ativados e agente ativante	19
<b>Tabela 2-</b> Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para os ensaios proposto	28
<b>Tabela 3-</b> Ensaios aplicados no planejamento experimental	31
<b>Tabela 4-</b> Resultados das análises texturais dos carvões com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> e diferentes granulometrias	51
<b>Tabela 5-</b> Resultados obtidos nos testes de adsorção com azul de metileno feito com os quatro tipos de carvão ativado com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> e diferentes granulometrias e endocarpo in natura	56
<b>Tabela 6-</b> Análise de variância (ANOVA) do endocarpo de Bocaiuva e dos diferentes carvões ativados	57
<b>Tabela 7-</b> Resultados obtidos nos testes de adsorção do carvão AC10 com ácido gálico	63
<b>Tabela 8-</b> Análise de variância (ANOVA) para carvão AC10 com ácido gálico	64
<b>Tabela 9</b> -Média ± desvio padrão dos testes de adsorção com ácido tânico em diferentes concentrações no carvão AC10	66
<b>Tabela 10</b> -Média ± desvio padrão dos testes de adsorção com íons Ca <sup>2+</sup> em diferentes concentrações para o AC10	67

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**IR** - Espectrometria de Infravermelho,

**TG** - Análise Térmica

**MEV** - Microscopia eletrônica de varredura

**EDS** - Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva

**P-CIB**- Biomassa pré-aquecida (P), seguida de Carbonização (C) e posterior impregnação (I) com NaOH (B)

**P-ICB**- Biomassa pré-aquecida (P), seguida de impregnação(I) com NaOH (B) e posterior Carbonização (C)

**S-ICA**- Biomassa in natura (S), seguida de impregnação(I) com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (A) e posterior Carbonização (C)

**P-ICA**- Biomassa pré-aquecida (P), seguida de impregnação (I) com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (A) e posterior Carbonização (C)

**S-ICB**- Biomassa in natura (S), seguida de impregnação (I) com NaOH (B) e posterior Carbonização (C)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
3.1 Bocaiuva .....	15
3.2 Carvão Ativado .....	19
3.3 Produção de Carvão Ativado a partir de Resíduos Agroindustriais.....	20
3.4 Processo de Adsorção e Fatores que Influenciam a Adsorção .....	22
3.4.1 Isotermas de Adsorção.....	23
3.4.2 Isoterma de Langmuir .....	25
3.5 Aplicações do Carvão Ativado e Seu Uso para Remoção de Compostos na Indústria Alimentícia.....	26
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
4.1 Produção do carvão com diferentes formas de ativação.....	29
4.1.1 Avaliação das condições ideais de síntese do carvão ativado.....	29
4.1.2 Síntese do carvão ativado .....	29
4.1.2.1 Obtenção da matéria prima e reagentes .....	29
4.1.2.2 Remoção do Endocarpo (biomassa).....	30
4.1.2.3 Preparação do Endocarpo da Bocaiuva sem pré-aquecimento para produção de carvão	31
4.1.2.4 Obtenção do carvão ativado com agentes ativantes NaOH e H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	32
4.1.2.5 Produção do carvão ativado com NaOH.....	35
4.1.2.6 Produção do carvão ativado com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> .....	37
4.2 Caracterização da biomassa e dos carvões ativados com diferentes formas de ativação ....	38
4.2.1 Caracterização da Biomassa (endocarpo sem pré-aquecimento).....	38
4.2.2 Análise Térmica (TG).....	38
4.2.3 Espectrometria de Infravermelho.....	39
4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) .....	39
4.2.4.1 Caracterização dos diferentes tipos de carvões ativados .....	40

4.2.4.2 Espectrometria de Infravermelho.....	40
4.2.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) .....	40
4.2.4.4 Análise textural do carvão ativado de endocarpo de Bocaiuva. ....	40
4.3 Produção do carvão ativado com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> em diferentes granulometrias e caracterização dos carvões ativados produzidos.....	40
4.3.1 Produção do carvão ativado com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> em diferentes granulometrias .....	40
4.3.2 Caracterização do carvão ativado com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> com diferentes granulometrias.....	41
4.4 Testes de eficiência de adsorção em azul de metileno.....	42
4.4.1 Planejamento Experimental .....	42
Variáveis codificadas Variáveis reais.....	42
4.4.2. Ensaios de adsorção com azul de metileno.....	43
4.4.3 Teste de eficiência de adsorção do carvão ativado com diferentes compostos .....	45
4.4.5 Testes de adsorção com carvão de endocarpo de Bocaiuva com o ácido.....	45
Gálico.....	45
4.4.6 Delineamento experimental .....	45
4.4.7 Ensaio de adsorção de ácido gálico em solução aquosa pelo carvão ativado do endocarpo de Bocaiuva.....	46
4.4.8 Testes de adsorção de ácido tânico em solução aquosa pelo carvão ativado do endocarpo de Bocaiuva.....	48
4.4.9 Testes de adsorção de Ca <sup>2+</sup> em solução aquosa pelo carvão ativado do endocarpo de Bocaiuva .....	48
4.4.10 Análise estatística dos dados experimentais .....	49
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSOES.....</b>	<b>49</b>
5.1 Resultados de caracterização dos carvões produzidos por diferentes formas de ativação e agente ativantes .....	50
5.1.1 Análise térmica (TG) .....	50
5.1.2 Espectrometria de Infravermelho (IR).....	51
5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS). ....	55
5.1.4 Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras .....	57
5.1.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de carvões ativados em diferentes granulometrias.....	60
5.1.6 Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvões ativados em diferentes granulometrias .....	63
5.1.7 Caracterização textural dos carvões ativados de endocarpo de Bocaiuva.....	65
5.1.7.1 Resultados das análises texturais dos carvões ativados em diferentes granulometrias .....	65

5.1.7.2 Isothermas Adsorção/Dessorção .....	67
5.2 Análise dos dados experimentais obtidos no teste de adsorção com azul de metileno com carvão produzido em diferentes granulometrias .....	70
5.2.1 Resultados das Análises de variância do modelo de regressão para testes de adsorção com o endocarpo in natura e os diferentes tipos de carvão ativado com azul de metileno.....	76
5.3 Resultados das análises do teste de adsorção com o carvão AC10.....	77
5.3.1 Resultados das análises do teste de adsorção do ácido gálico com o carvão AC10.....	77
5.3.1.1 Resultados das análises de variância do modelo de regressão para carvão ativado AC10 com ácido gálico .....	78
5.3.2 Resultados do teste de adsorção do ácido tânico com o carvão AC10 .....	81
5.3.3 Resultados do teste de adsorção dos íons Ca <sup>2+</sup> em solução com o carvão AC10 .....	82
<b>6-CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>84</b>
<b>7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Cerrado brasileiro é reconhecido como um dos biomas mais ricos do país, abrigando uma diversidade de frutos com alto potencial nutritivo e tecnológico, como é o caso da bocaiuva (*Acrocomia aculeata*), também conhecida como macaúba. Este fruto é tradicionalmente utilizado na extração de óleos, produção de sorvetes, farinhas e outros produtos de valor comercial, favorecendo a geração de renda de forma sustentável, sem comprometer o meio ambiente (Oliveira da Silva *et al.*, 2020).

No entanto, ao mesmo tempo em que se observa o aproveitamento crescente desses recursos naturais, cresce também a preocupação com o destino dos resíduos sólidos gerados por atividades agroindustriais. A ausência de modelos eficazes para a gestão desses resíduos agrava os impactos ambientais, sociais e econômicos, sobretudo quando o descarte é realizado de forma inadequada (Pedroza *et al.*, 2023).

Nesse contexto, surge como alternativa viável a utilização da biomassa, um material orgânico capaz de armazenar energia solar por meio da fotossíntese para a produção de adsorventes de baixo custo. Essa biomassa pode ser convertida em diversas formas de energia, sendo a pirólise uma das principais tecnologias termoquímicas para essa conversão, com geração de produtos como bio-óleo, biogás e carvão ativado (Pedroza *et al.*, 2023).

Considerando os desafios existentes no tratamento de poluentes, diferentes métodos como coagulação, floculação, biodegradação, separações por membrana e adsorção têm sido empregados, embora apresentem limitações como alta geração de lodo, custos elevados e necessidade de condições ideais específicas. Dentre esses, destaca-se a adsorção por carvão ativado como uma solução eficaz, versátil e ambientalmente viável (Pedroza *et al.*, 2023).

O carvão ativado apresenta ampla aplicação, desde o tratamento de água e efluentes até usos medicinais e laboratoriais. Sua eficiência depende de características como área superficial, pureza e estrutura porosa, sendo essencial avaliar os processos de produção para otimizar suas propriedades adsorptivas (Heylmann *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2021; Coelho e Brega, 2023).

Nesse sentido, resíduos agroindustriais com alto teor de carbono e baixo conteúdo inorgânico – como o bagaço da cana-de-açúcar e o caroço do açaí têm demonstrado grande potencial como matéria-prima para produção de carvão ativado (Almeida *et al.*,

2021; Nascimento *et al.*, 2019). Além disso, esses materiais podem desempenhar funções diversas, atuando como agentes clarificantes, suportes catalíticos, adsorventes de pesticidas, entre outras aplicações ambientais (Acevedo; Rocha; Bertolino, 2021).

Dentre os frutos nativos, destaca-se o aproveitamento do endocarpo da bocaiuva, estrutura que recobre a amêndoa, como fonte promissora para produção de carvão ativado. Devido ao seu elevado teor de carbono, o endocarpo apresenta características ideais para aplicação como adsorvente, contribuindo para a remoção de compostos indesejáveis e, assim, agregando valor ao fruto e promovendo uma abordagem sustentável, que fundamenta a proposta deste trabalho (Nayak *et al.*, 2020). Assim, este trabalho teve como objetivo produzir carvão ativado por ativação química do endocarpo da bocaiuva, agregando valor a esse resíduo do Cerrado e avaliando seu uso na remoção de compostos relevantes para a indústria de alimentos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral a produção de carvão ativado por ativação química do endocarpo de Bocaiúva, como forma de agregar valor ao resíduo desse fruto do cerrado, e utilizar o material obtido na remoção de diferentes compostos importantes na indústria de alimentos.

### 2.2 Objetivos específicos

- Elaborar uma revisão sistemática de literatura para escolha das condições de síntese adequadas na preparação de carvão ativado quimicamente;
- Produzir carvão ativado a partir do endocarpo de Bocaiuva utilizando como agentes ativantes o hidróxido de sódio (NaOH) e o ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>);
- Caracterizar os materiais obtidos por Espectrometria de Infravermelho, Análise Térmica (TG), Análise Elementar (CH), Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS);
- Produzir um carvão ativado a partir do endocarpo de Bocaiuva em diferentes granulometrias após seleção do agente ativante e forma de ativação;
- Caracterizar o novo material obtido por Espectrometria de Infravermelho, Análise Térmica (TG), Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de

espectroscopia por energia dispersiva (EDS) nas diferentes granulometrias;

- Verificar a influência das variáveis do processo de adsorção (tempo de contato, concentração de adsorvato e quantidade de adsorvente) e da granulometria do carvão ativado na eficiência de remoção do azul de metileno, utilizando análise de variância e o método de superfície de resposta para identificar as condições ótimas de adsorção e avaliar o potencial do material produzido para remoção de diferentes compostos;
- Testar o desempenho do carvão ativado, produzido a partir do endocarpo da bocaiuva, na remoção de diferentes substâncias como ácido gálico, ácido tânico íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), após testes em diferentes granulometrias, visando identificar a condição que proporciona maior eficiência adsortiva.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Bocaiuva

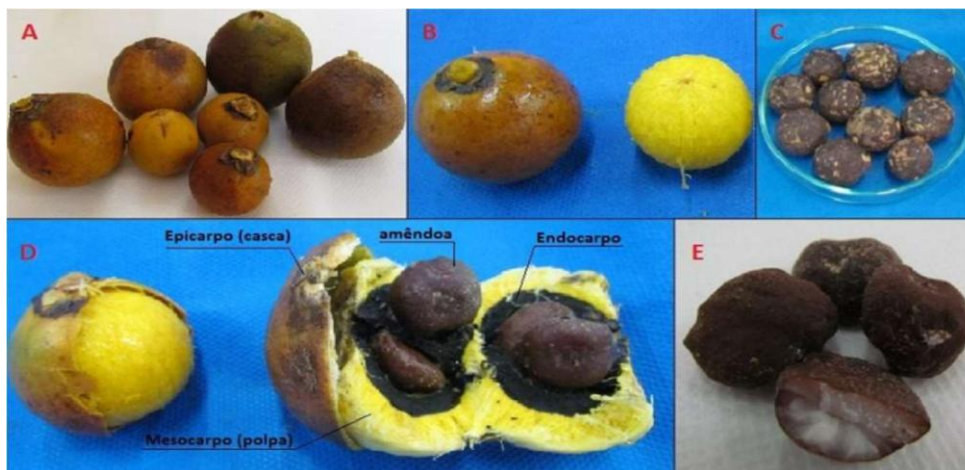
A bocaiuva (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira frutífera, perene, pertencente à família das *Arecaceae*, nativa da floresta tropical e amplamente distribuída no Brasil, especialmente nas regiões de cerrado, além de ser encontrada em países vizinhos como Bolívia, Paraguai e Colômbia. Conhecida popularmente por diversos nomes, como macaúba, coco espinho e palmeira-arara, essa espécie vegetal destaca-se não apenas por sua relevância ecológica, mas também pelo seu valor nutricional e potencial econômico (Lourenço Neto; Marques; Moreira, 2024).

Os frutos da bocaiuva são globosos, medindo entre 3,5 e 5,0 cm, e apresentam uma estrutura complexa composta por um epicarpo lenhoso e verde-amarelado, um mesocarpo amarelado, fibroso e mucilaginoso, e um endocarpo duro que reveste uma amêndoa comestível. A planta pode atingir de 10 a 15 metros de altura e possui ampla utilização socioeconômica, sendo aplicada na produção de óleos, alimentos, cosméticos e biocombustíveis (Guerra *et al.*, 2023). Essa diversidade de usos está diretamente relacionada à composição química do fruto, que é rica em compostos bioativos, incluindo fibras, minerais, carotenoides, ácidos graxos de cadeia média (C6-C12), tocoferóis e vitamina A (Correia *et al.*, 2022).

A bocaiuva é considerada uma das oleaginosas mais produtivas do mundo, ficando atrás apenas do dendê em produtividade. Dela podem ser extraídos dois tipos principais de óleos: o da polpa e o da amêndoa. Ambos apresentam perfil de ácidos graxos que os tornam atrativos para as indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética e para a geração de biodiesel (Guerra *et al.*, 2023). Tal versatilidade torna o cultivo e o aproveitamento da bocaiuva estratégico para diversas cadeias produtivas, contribuindo para o desenvolvimento regional e sustentabilidade agrícola.

No que tange à estrutura do fruto, estudos de Gomes *et al.* (2021) demonstram que ele é composto aproximadamente por 20% de casca, 40% de polpa, 33% de endocarpo e 7% de amêndoa. A polpa, além de ser comestível, é rica em óleo, fibra e mucilagem. A amêndoa, por sua vez, é envolvida por um endocarpo escuro e extremamente rígido, com cerca de 3 mm de espessura. Este endocarpo, normalmente considerado um resíduo agroindustrial, tem se mostrado um material promissor para aplicações tecnológicas devido à sua natureza lignocelulósica resistente, o que o qualifica como precursor para a produção de carvão ativado (Aguiar *et al.*, 2022).

Figura 1- (A) Frutos maduros de bocaiuva; (B) fruto com e sem epicarpo; (C) coquinho (endocarpo + amêndoa); (D) fruto de bocaiuva cortado ao meio evidenciando todas as partes do fruto; (E) amêndoas.



Fonte: Ciconini (2012).

A possibilidade de aproveitamento integral da bocaiuva, incluindo a utilização da casca, polpa, castanha e amêndoa, representa um avanço significativo para a valorização

de subprodutos da biodiversidade brasileira, agregando valor à cadeia produtiva. Além disso, o uso de resíduos como o endocarpo para a obtenção de materiais adsorventes oferece uma alternativa sustentável e ambientalmente viável, que contribui para a economia circular e a minimização dos impactos ambientais oriundos do descarte inadequado de biomassa.

Dessa forma, a relevância do endocarpo da bocaiuva transcende seu papel como subproduto da agroindústria, inserindo-se como um insumo com elevado potencial tecnológico para a geração de materiais porosos, como o carvão ativado. Essa perspectiva amplia as possibilidades de uso sustentável desse recurso natural e estabelece uma conexão direta com os princípios da inovação ambiental e da sustentabilidade industrial. A compreensão aprofundada dessas características prepara o terreno para a análise dos tópicos seguintes, que abordarão, de forma integrada, as propriedades, métodos de produção, aplicações e fatores que influenciam a eficiência do carvão ativado, especialmente quando derivado de resíduos lignocelulósicos como o endocarpo da bocaiuva.

### 3.2 Carvão Ativado

O carvão ativado é um material carbonáceo altamente poroso, reconhecido por sua grande área superficial e notável capacidade de adsorção, sendo amplamente utilizado em diversos segmentos industriais. Sua estrutura é composta por uma rede de micro, meso e macroporos, além de conter uma diversidade de grupos funcionais que o tornam versátil para inúmeras aplicações, incluindo tratamento de águas, purificação de gases, descontaminação de efluentes industriais, adsorção de poluentes, além de usos médicos, farmacêuticos, em catálise e eletrodos (Neme; Gonfa; Masi, 2022; Souza; Silva, 2021).

Disponível em diferentes formas físicas, como carvão ativado em pó (CAP) e granular (CAG), sua escolha depende da aplicação. No tratamento de águas, por exemplo, o CAG é geralmente utilizado em sistemas de leito fixo, enquanto o CAP é preferido em reatores de mistura completa com posterior separação sólido/líquido (Mavaieie Júnior; Benetti, 2021). A versatilidade do carvão ativado se deve, entre outros fatores, à sua área superficial altamente desenvolvida e à facilidade com que pode ser obtido a partir de variados precursores lignocelulósicos.

A produção de carvão ativado pode ser realizada por ativação física ou química. A ativação física envolve a pirólise do material precursor em atmosferas de gases inertes como vapor d'água ou dióxido de carbono a altas temperaturas. Já a ativação química é feita pela impregnação do precursor com reagentes como ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ) ou hidróxido de potássio (KOH), seguida de aquecimento em temperaturas moderadas. Este método apresenta vantagens como menor tempo de pirólise e temperaturas mais baixas, além de maior eficiência na geração de poros (Heidarinejad et al., 2020; De Lima Ribeiro; Lopes, 2022).

O objetivo principal desses processos é aumentar a porosidade e a área superficial do material, o que melhora significativamente sua capacidade adsorptiva. Os parâmetros mais relevantes que influenciam as características do carvão ativado obtido são: tipo e proporção do agente ativante, temperatura de ativação, tempo de aquecimento e características do precursor utilizado (De Lima Ribeiro; Lopes, 2022).

A classificação do carvão ativado segundo a IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) baseia-se no diâmetro dos poros: microporos ( $\leq 20 \text{ \AA}$ ), mesoporos ( $20\text{--}500 \text{ \AA}$ ) e macroporos ( $> 500 \text{ \AA}$ ). Cada tipo de poro contribui de maneira distinta para os processos de adsorção: microporos são ideais para pequenas moléculas, mesoporos para moléculas maiores como corantes, e macroporos atuam como canais de transporte para os poros menores (Silva *et al.*, 2024). Essa estrutura torna o carvão ativado um material essencial para processos de purificação, separação, clarificação e recuperação de compostos químicos.

### 3.3 Produção de Carvão Ativado a partir de Resíduos Agroindustriais

Os resíduos agroindustriais representam um grande desafio ambiental e econômico devido à elevada quantidade gerada e à ausência de destinação adequada em muitos casos. Esses resíduos, resultantes da transformação de matérias-primas agrícolas e pecuárias, frequentemente são descartados de maneira ineficiente, embora contenham potencial significativo para reaproveitamento em aplicações de maior valor agregado (Duarte *et al.*, 2024). Um desses potenciais é sua utilização como precursor na produção de adsorventes, como o carvão ativado, principalmente por apresentarem teores elevados de carbono e estrutura lignocelulósica favorável à ativação térmica ou química.

Grande parte dos resíduos agroindustriais é composta por biomassa lignocelulósica heterogênea, como bagaços, talos, folhas, cascas e sementes. Estes materiais são abundantes e de baixo custo, o que os torna atrativos para o desenvolvimento de produtos sustentáveis. O setor agrícola, sendo um dos principais geradores de biomassa, possui papel estratégico nesse processo. Contudo, sem um gerenciamento eficiente, o acúmulo desses resíduos pode contribuir significativamente para a degradação ambiental (Menezes *et al.*, 2021).

Os resíduos ricos em carbono, quando submetidos a processos de ativação física ou química, podem atingir áreas superficiais superiores a 800 m<sup>2</sup>/g, valor significativamente mais alto do que a biomassa in natura, que apresenta entre 10 e 15 m<sup>2</sup>/g. Esse aumento está relacionado ao desenvolvimento de microporos e à remoção de componentes voláteis, criando uma rede de poros finos essenciais para o processo de adsorção. Além da área superficial, outras características como estrutura de poros, acidez superficial e propriedades eletroforéticas também são determinantes na eficácia dos carvões ativados produzidos (De Lima Ribeiro; Lopes, 2022).

Carvões ativados oriundos de resíduos agroindustriais têm se mostrado eficazes na remoção de uma ampla gama de poluentes, como metais pesados, corantes sintéticos e pesticidas. Isso se deve à sua elevada porosidade e à presença de grupos funcionais ativos em sua superfície. Diversos estudos demonstram o uso bem-sucedido de resíduos como cascas de frutos, sementes, madeira de poda e restos de pinha na produção de adsorventes, comprovando o potencial desses materiais em processos de descontaminação ambiental (Duarte *et al.*, 2024).

O aproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de carvão ativado, portanto, constitui uma solução estratégica de duplo impacto: ambiental, pela redução do volume de resíduos e mitigação dos efeitos da disposição inadequada; e econômico, pela geração de produtos com alto valor agregado e aplicabilidade em setores diversos, como o de alimentos, cosméticos e tratamento de efluentes (Souza; Silva, 2021). Assim, essa abordagem se alinha com os princípios da bioeconomia e da sustentabilidade, reforçando o papel dos resíduos como recursos valorizáveis.

Tais evidências reforçam a importância da continuidade do estudo sobre o carvão ativado obtido a partir de resíduos agroindustriais, com destaque especial para o

endocarpo da bocaiuva, cujo elevado teor de carbono, rigidez e estrutura lignocelulósica o tornam um excelente candidato para aplicação como precursor de materiais adsorventes avançados.

### 3.4 Processo de Adsorção e Fatores que Influenciam a Adsorção

A adsorção é um processo de separação baseado na adesão de moléculas presentes em uma fase líquida ou gasosa à superfície de um sólido, denominado adsorvente. Esse fenômeno ocorre devido às interações físicas ou químicas entre as partículas do adsorvato e a superfície ativa do adsorvente. No caso do carvão ativado, esse processo é amplamente explorado devido à sua elevada capacidade adsorvativa e à versatilidade de aplicação, sobretudo em processos de purificação e remoção de contaminantes de águas residuais. Existem dois tipos principais de adsorção: a física (fisisorção) e a química (quimissorção). A adsorção física é caracterizada por interações fracas, como forças de Van der Waals, sendo um processo reversível, rápido e exotérmico, com formação de multicamadas. Já a adsorção química envolve interações mais fortes, com formação de ligações químicas ou covalentes entre o adsorvato e o adsorvente. Esse tipo de adsorção é geralmente irreversível e depende de condições energéticas mais elevadas, como maior temperatura e tempo de contato (Souza; Teixeira; Fernandes, 2023).

Vários fatores influenciam a eficiência do processo de adsorção. Entre eles, destaca-se o pH da solução, que afeta diretamente o grau de ionização das moléculas e a carga da superfície do adsorvente. A temperatura também é um fator relevante, pois pode aumentar ou reduzir a eficiência da adsorção, dependendo se o processo é endotérmico ou exotérmico. O tempo de contato entre adsorvente e adsorvato influencia na cinética de adsorção, sendo que tempos mais longos favorecem a formação de equilíbrio, até o ponto de saturação do adsorvente (Farias *et al.*, 2020).

Outros fatores importantes incluem a quantidade de adsorvente utilizada e a concentração inicial do adsorvato. Em geral, quanto maior a massa de adsorvente, maior a remoção de contaminantes. Contudo, essa relação apresenta um limite, além do qual não se observa aumento significativo da eficiência. Já em relação à concentração do adsorvato, a eficiência tende a diminuir em concentrações muito altas, exigindo ajustes nos parâmetros operacionais (Pedroza *et al.*, 2023).

As características físicas do adsorvente, especialmente sua área superficial específica e porosidade, são fundamentais para determinar sua capacidade adsorviva. No caso do carvão ativado, sua estrutura microporosa e a presença de grupos funcionais na superfície favorecem a adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo metais pesados, corantes e compostos fenólicos (Leite *et al.*, 2018).

#### 3.4.1 Isotermas de Adsorção

As isotermas de adsorção são ferramentas fundamentais para compreender a relação entre a quantidade de adsorvato retido na superfície do adsorvente e a sua concentração na fase líquida ou gasosa em equilíbrio, sob temperatura constante. Esses modelos matemáticos possibilitam descrever e prever o comportamento da adsorção em diferentes condições, sendo amplamente utilizados para avaliar a eficiência dos materiais adsorventes, como o carvão ativado (Farias *et al.*, 2024).

As isotermas fornecem informações sobre a capacidade máxima de adsorção, a intensidade das interações entre adsorvente e adsorvato, além do tipo de superfície do material (homogênea ou heterogênea). Elas também permitem estimar parâmetros termodinâmicos, como energia de ativação e entalpia de adsorção, que são úteis na escolha de condições operacionais para processos industriais (Castro *et al.*, 2021).

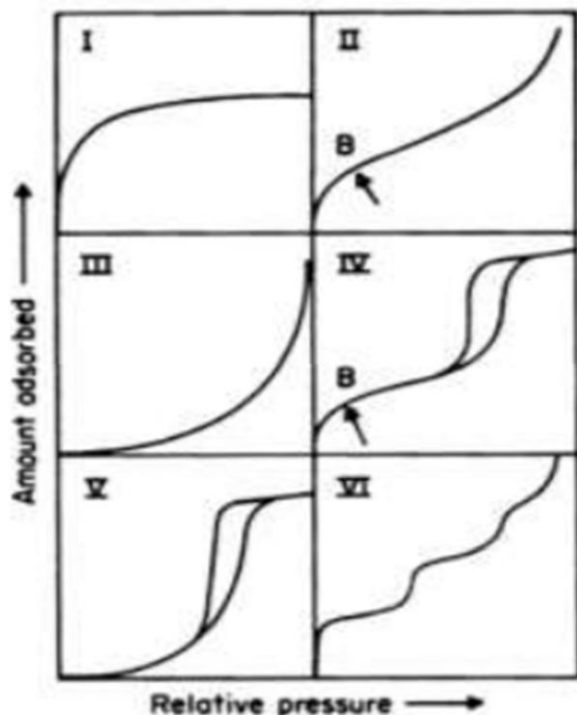
Entre os modelos isotérmicos mais utilizados destacam-se: Langmuir, Freundlich e Dubinin-Radushkevich. O modelo de Langmuir pressupõe uma superfície homogênea com um número finito de sítios ativos, onde ocorre formação de uma monocamada de adsorvato sem interações entre as moléculas adsorvidas. Já o modelo de Freundlich é empírico, aplicável a superfícies heterogêneas e admite a formação de multicamadas, sendo útil para descrever sistemas mais complexos. Por sua vez, o modelo de Dubinin-Radushkevich é usado para distinguir entre adsorção física e química, fornecendo informações sobre a energia envolvida no processo (Castro *et al.*, 2021; Gonçalves; Figueiredo, 2020).

A interpretação adequada das isotermas de adsorção depende de diversos fatores, como o tamanho dos poros, a natureza química do adsorvato, sua polaridade, solubilidade e a afinidade com os grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente. Tais fatores

influenciam diretamente a forma da curva isotérmica e os parâmetros ajustados durante a modelagem (Sousa *et al.*, 2021).

Os tipos mais comuns de isotermas de adsorção, segundo a classificação da IUPAC (Sousa *et al.*, 2021), encontram-se na Figura 2.

Figura 2– Tipos de isotermas de acordo com a classificação da IUPAC.



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

As isotermas também são classificadas pela IUPAC em seis tipos principais, que indicam diferentes mecanismos de adsorção. A isoterma Tipo I é característica de adsorção em microporos com formação de monocamada. A Tipo II representa adsorção em materiais macroporosos com formação de multicamadas. A Tipo III indica adsorção fraca e aumento da capacidade adsorptiva com a concentração. A Tipo IV evidencia presença de mesoporos com histerese devido à condensação capilar. Os tipos V e VI são menos comuns e associados a interações específicas e estrutura porosa ordenada (Sousa *et al.*, 2021).

Assim, o uso de modelos isotérmicos é indispensável para o desenvolvimento de sistemas de adsorção eficientes e para a avaliação comparativa entre diferentes materiais adsorventes. O conhecimento dessas curvas torna-se ainda mais relevante ao se utilizar

precursores alternativos, como o endocarpo da bocaiuva, que pode apresentar comportamento específico de adsorção devido às suas características físico-químicas.

### 3.4.2 Isoterma de Langmuir

A isoterma de Langmuir é um dos modelos mais utilizados para descrever a adsorção em superfície homogênea. Desenvolvida inicialmente para explicar a adsorção de gases em superfícies sólidas, sua aplicação foi posteriormente estendida para sistemas líquidos. O modelo pressupõe que a adsorção ocorre em sítios específicos da superfície do adsorvente, formando uma monocamada, sem interações entre as moléculas já adsorvidas. Cada sítio só pode ser ocupado por uma molécula, e todos os sítios são considerados energeticamente equivalentes (Castro *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2021).

Matematicamente, a isoterma de Langmuir é representada pela Equação:

$$Q_e = (Q_m * K_L * C_e) / (1 + K_L * C_e)$$

Em que:  $Q_e$  é a quantidade de adsorvato adsorvido por unidade de massa de adsorvente (mg/g),  $Q_m$  representa a capacidade máxima de adsorção (mg/g),  $C_e$  é a concentração do adsorvato em equilíbrio na solução (mg/L),  $K_L$  é a constante de Langmuir (L/mg), relacionada à afinidade do adsorvato pelo adsorvente.

A equação também pode ser linearizada para facilitar o cálculo dos parâmetros  $Q_m$  e  $K_L$ :

$$C_e/Q_e = (1/Q_m K_L) + (C_e/Q_m)$$

A linearização permite a construção de um gráfico  $C_e/Q_e$  versus  $C_e$ , resultando em uma linha reta cuja inclinação e intercepto fornecem os valores dos parâmetros isotérmicos. Essa abordagem é amplamente utilizada para avaliar o desempenho de carvões ativados em diferentes condições e para comparação entre distintos precursores (Souza *et al.*, 2021).

Outro parâmetro importante derivado da isoterma de Langmuir é o fator de separação ( $R_L$ ), que indica o tipo de adsorção com base na constante  $K_L$  e na concentração inicial do adsorvato ( $C_0$ ). Ele é calculado pela equação:

$$R_L = 1 / (1 + K_L * C_0)$$

Os valores de RL indicam a favorabilidade do processo:

- $RL > 1$ : Adsorção desfavorável;
- $RL = 1$ : Adsorção linear;
- $0 < RL < 1$ : Adsorção favorável;
- $RL = 0$ : Adsorção irreversível.

A análise do fator RL, associada aos valores de  $Q_m$  e  $K_L$ , permite avaliar com maior precisão o potencial de um determinado adsorvente, como o carvão ativado produzido a partir do endocarpo da bocaiuva, na remoção de poluentes de soluções aquosas. Essa abordagem será particularmente relevante nas análises experimentais previstas para este estudo, oferecendo base teórica sólida para a interpretação dos dados obtidos (Souza *et al.*, 2021).

### 3.5 Aplicações do Carvão Ativado e Seu Uso para Remoção de Compostos na Indústria Alimentícia

O carvão ativado tem sido amplamente aplicado na indústria devido à sua capacidade de adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos. Suas principais aplicações envolvem a purificação de líquidos e gases, incluindo o tratamento de águas residuais, purificação de ar, extração de contaminantes, além de usos na indústria farmacêutica, cosmética e alimentícia (Silva *et al.*, 2024). Seu alto desempenho é atribuído à sua área superficial elevada, porosidade bem desenvolvida e presença de grupos funcionais ativos em sua superfície.

Na indústria alimentícia, o carvão ativado desempenha um papel crucial na remoção de impurezas indesejadas, como corantes, compostos fenólicos, resíduos de pesticidas, metais pesados e compostos que afetam negativamente as características sensoriais dos alimentos e bebidas. Essa aplicação é especialmente importante em produtos líquidos como sucos, vinhos, xaropes, refrigerantes e água potável, onde se busca maior estabilidade, transparência e qualidade final (Silva *et al.*, 2025).

Um dos exemplos mais notáveis de aplicação do carvão ativado é na remoção de corantes sintéticos presentes em efluentes da indústria alimentícia e outras indústrias como têxtil, farmacêutica e cosmética. Corantes como azul de metileno (catiônico) e preto reativo 5 (aniônico) possuem estruturas moleculares complexas que dificultam sua

degradação, exigindo métodos de tratamento eficientes. O uso de carvão ativado derivado de resíduos agroindustriais tem se mostrado uma alternativa eficaz e sustentável para a adsorção desses compostos (Heylmann *et al.*, 2021; Sousa *et al.*, 2021).

Outro aspecto relevante é a remoção de compostos fenólicos, que estão presentes em diversos alimentos e bebidas e são considerados poluentes prioritários por serem tóxicos, carcinogênicos e prejudiciais mesmo em baixas concentrações. Além disso, esses compostos podem interferir negativamente nas propriedades organolépticas dos produtos, conferindo sabor amargo, adstringência e turbidez. A clarificação de sucos, por exemplo, utiliza o carvão ativado para remover essas substâncias, melhorando a aparência e o sabor final (Albuquerque *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2015; Yadav; Rai e Yadav, 2017).

Na indústria de refrigerantes, o carvão ativado é utilizado para remover substâncias que conferem cor e turbidez ao xarope base. Estudos compararam técnicas como a troca iônica e a adsorção por carvão ativado, sendo esta última preferida por sua eficiência e por não exigir alterações significativas na planta industrial. Contudo, ressalta-se que o carvão ativado utilizado neste processo não é regenerado para uso contínuo na indústria alimentícia, o que exige atenção à gestão de resíduos gerados (Schwendler, 2015).

Em bebidas alcoólicas, como vinhos, o carvão ativado atua como agente clarificante, contribuindo para a remoção de partículas em suspensão, odores indesejáveis e compostos que afetam a viscosidade. Além disso, ele é empregado na remoção de cafeína de bebidas como refrigerantes e chás, atendendo à demanda de produtos com teor reduzido dessa substância (Belini, 2020; François *et al.*, 2016).

Ainda na área de purificação, o carvão ativado tem sido estudado para a remoção de íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em águas duras. Essa aplicação visa reduzir a dureza da água, evitando a formação de incrustações em sistemas industriais e domésticos, melhorando a eficiência de equipamentos e reduzindo o consumo de detergentes (Crispim, 2009).

Com base nesse conjunto de aplicações, destaca-se o grande potencial do carvão ativado obtido a partir do endocarpo da bocaiuva como alternativa viável e ecológica para uso na indústria alimentícia. Seus atributos físicos e químicos, aliados à abundância da

matéria-prima e à viabilidade técnica de produção, reforçam a importância de se avançar em pesquisas que explorem e otimizem sua utilização.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi realizada seguindo diferentes etapas de acordo com o fluxograma da Figura 3.

Figura 3- Etapas de elaboração da metodologia do projeto.



Fonte: Autor 2025

O Quadro 1, apresenta as etapas do trabalho para melhor compreensão do texto da metodologia.

Quadro 1- Etapas do trabalho.

Etapas	Título da etapa do trabalho	Descrição das etapas do trabalho
1	Produção do carvão em diferentes condições de ativação	Revisão sistemática da literatura para definição dos parâmetros de produção do carvão. Após definição das condições de trabalho, houve a produção de carvão ativado com diferentes agentes ativantes (NaOH e H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) e formas de ativação.
2	Caracterização dos carvões produzidos.	Caracterização dos diferentes tipos de carvões produzidos na etapa 1 e da biomassa, para seleção da melhor forma de ativação e de agente ativante.
3	Produção do carvão ativado usando como agente de ativação o H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> em diferentes	Produção de carvão ativado com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> em diferentes granulometrias e posterior caracterização dos carvões produzidos,

	granulometrias e caracterização dos carvões ativados produzidos.	para seleção da melhor granulometria de trabalho na etapa seguinte.
4	Testes de eficiência de adsorção em azul de metileno.	Nesta etapa foi realizado um delineamento experimental para verificação da eficiência de adsorção dos carvões produzidos na etapa 3, variando tempo de contato, massa de adsorvente e concentração do adsorvato.
5	Teste de eficiência de adsorção do carvão ativado com diferentes compostos	Foram realizados nesta etapa testes de adsorção com carvão ativado selecionado com diferentes compostos como ácido gálico, taninos, $Ca^{2+}$ para avaliação da aplicabilidade deste carvão na indústria de alimentos

Fonte: Autor 2025

#### 4.1 Produção do carvão com diferentes formas de ativação

##### 4.1.1 Avaliação das condições ideais de síntese do carvão ativado

Na Etapa 1 do trabalho foi realizada uma revisão sistemática de literatura para a seleção das condições para produção do carvão ativado, condições essas como: os agentes ativantes mais utilizados, o tempo e a temperatura de carbonização que foram utilizados, granulometria do carvão produzido, parâmetros esses que nortearam o trabalho. Neste trabalho testou-se a produção dos carvões usando dois tipos de agente ativante e logo após foi realizada a caracterização dos carvões obtidos.

Para a avaliação do potencial do endocarpo da bocaiuva como material precursor para produção de carvão ativado, ele foi ativado quimicamente empregando como agentes ativantes o hidróxido de sódio (NaOH) e ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), a fim de testar o melhor ativante químico para produção de carvões ativados com características desejadas, para serem empregados como adsorventes.

##### 4.1.2 Síntese do carvão ativado

###### 4.1.2.1 Obtenção da matéria prima e reagentes

Os frutos da bocaiuva foram obtidos na localidade de Intans, no município de Formoso do Rio preto-BA. Aproximadamente dez quilos do fruto foram recebidos no mês de setembro de 2023. Em seguida, aproximadamente cinco quilos do fruto foram armazenados em refrigerador no Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e de Biocombustíveis (LAPEQ) e a outra parte foi utilizada na produção dos carvões ativados.

#### 4.1.2.2 Remoção do Endocarpo (biomassa)

Após o recebimento foram testadas diferentes metodologias de separação do endocarpo do restante do fruto, sendo essa uma das maiores dificuldades encontradas para a obtenção da biomassa.

Foram realizadas diversas tentativas para separar o mesocarpo de seu endocarpo, pois a forma manual apresentou-se demorada, optando-se por testar um tratamento térmico inicial do fruto (denominado neste trabalho como pré-aquecimento), ainda com seu mesocarpo, para facilitar sua separação. A princípio tentou-se uma temperatura de 250°C por 2 h, porém, após esse tempo foi verificado a não separação das partes. Em seguida, aumentou-se o tempo de secagem para 2,5 h, possibilitando a separação por raspagem do mesocarpo com mais facilidade, o que melhorou as condições de separação de seu endocarpo. Com o pré-aquecimento inicial, também foi possível facilitar a separação da castanha dentro do endocarpo, pois com o aumento da temperatura a castanha fica solta, e pode ser removida com facilidade.

Nesta etapa do trabalho, foram produzidos cinco tipos diferentes tipos de carvão ativado a partir do endocarpo da bocaiuva. Três produzidos com o material seco, antes da calcinação para a obtenção do carvão ativado, e dois foram produzidos a partir da biomassa *in natura*.

O uso da biomassa *in natura* para a produção do carvão, foi realizado para verificar se haveria alguma alteração nas características do carvão ativado, advindas da etapa do pré-aquecimento da biomassa antes da calcinação. Os diferentes tipos de carvões ativados foram produzidos utilizando dois agentes ativantes NaOH e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. As etapas de preparo do endocarpo com o pré-aquecimento encontram-se na Figura 4.



Fonte: Autor, 2025

Logo após a retirada da casca da bocaiuva de forma manual, foi efetuado o tratamento térmico em mufla na temperatura de 250°C por 2,5 h (pré-aquecimento). Após passar por pré-aquecimento, os frutos foram raspados com auxílio de facas para retirada de todo o mesocarpo queimado. Com os mesocarpos totalmente limpos, foi efetuado a quebra dos endocarpos com utilização de um soquete e posteriormente, foi efetuada a raspagem para a retirada das castanhas queimada e limpeza do endocarpo. Em seguida, com o auxílio do soquete, foi feita uma quebra para a redução das partes dos endocarpos e facilitar a lavagem. Após a redução do endocarpo, foi feita a lavagem utilizando água destilada até a retirada de toda a sujidade, por fim, foi realizada a secagem do endocarpo em estufa a 105 °C por 24 horas. Todo este processo antecedeu-se a síntese de carvão ativado, denominação P na identificação dos carvões indicando a realização do pré-aquecimento. Na Figura 5 são apresentados os materiais obtidos em cada etapa.

Figura 5- Sequência de preparação da matéria-prima pré-aquecida.



- A) fruto da Bocaiuva com casca; B) fruto da Bocaiuva descascado; C) endocarpo carbonizado e sem a castanha; D) Quebra do endocarpo para redução de tamanho; E) endocarpo pronto para a produção do carvão ativado.

Fonte: Autor, 2025.

#### 4.1.2.3 Preparação do Endocarpo da Bocaiuva sem pré-aquecimento para produção de carvão

Para se verificar diferença em virtude do tratamento térmico (pré-aquecimento) do endocarpo, foi decidido então, produzir carvões com a biomassa sem esse pré-aquecimento (denominado S na identificação das amostras de carvão). No fluxograma

apresentado na Figura 6 são representas as etapas de obtenção do endocarpo in natura sem pré-aquecimento.

Figura 6- Fluxograma de preparo do endocarpo da Bocaiuva in natura.



Fonte: Autor, 2025

Primeiramente foi feita a secagem do fruto em estufa a 105°C por 48 h, depois foi retirada a casca da fruta da Bocaiuva manualmente, e em seguida procedeu-se a retirada de todo o mesocarpo do fruto com auxílio de facas de serra. Logo após a retirada do mesocarpo, foi feita a quebra dos endocarpos com auxílio de um soquete para que então viesse a ser feita a separação da castanha. Com o auxílio do soquete, novamente foi feita uma quebra para a redução das partes do endocarpo facilitando assim a lavagem. Em seguida o endocarpo foi lavado com água destilada para remoção de sólidos grosseiros e impurezas. Posteriormente o endocarpo da Bocaiuva passou por secagem em uma estufa a 105°C por 24 h. Após a completa separação de mesocarpo e endocarpo, iniciou-se a etapa de síntese dos carvões ativados empregando-se os diferentes agentes de ativação.

#### 4.1.2.4 Obtenção do carvão ativado com agentes ativantes NaOH e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

Neste trabalho, foram utilizados dois métodos distintos para a produção dos carvões ativados: carbonização antes da impregnação (CI) e impregnação antes da carbonização (IC). Além disso, os carvões foram classificados com as letras (P) quando houve pré-aquecimento do material e (S) quando o processo ocorreu sem pré-aquecimento.

A identificação das amostras dos carvões produzidos está apresentada na Tabela 1 a seguir, onde pode ser entendido os procedimentos realizados para produção de cada uma delas e a relação com a nomenclatura.

Tabela 1- Identificação dos tipos de carvões ativados e agente ativante.

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>AMOSTRA</b>
P-CIB	Biomassa pré-aquecida (P), seguida de Carbonização (C) e posterior impregnação (I) com NaOH (B)
P-ICB	Biomassa pré-aquecida (P), seguida de impregnação(I) com NaOH (B) e posterior Carbonização (C)
S-ICA	Biomassa in natura (S), seguida de impregnação(I) com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (A) e posterior Carbonização (C)
P-ICA	Biomassa pré-aquecida (P), seguida de impregnação (I) com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (A) e posterior Carbonização (C)
S-ICB	Biomassa in natura (S), seguida de impregnação (I) com NaOH (B) e posterior Carbonização (C)

P= carvão produzido com a etapa de pré-aquecimento; S= carvão produzido sem a etapa de pré-aquecimento. Fonte: Autor,2025

Essa nomenclatura foi utilizada para que fique evidenciados as etapas de produção dos 5 diferentes tipos de carvões produzidos neste trabalho.

A produção do carvão ativado envolveu dois processos, a carbonização do endocarpo (com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento) e a impregnação química com os agentes ativantes NaOH e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, no qual as principais etapas são representadas na Figura 7.

Figura 7- Etapas envolvidas no processo de ativação química dos tipos de carvões ativados e agente ativante.



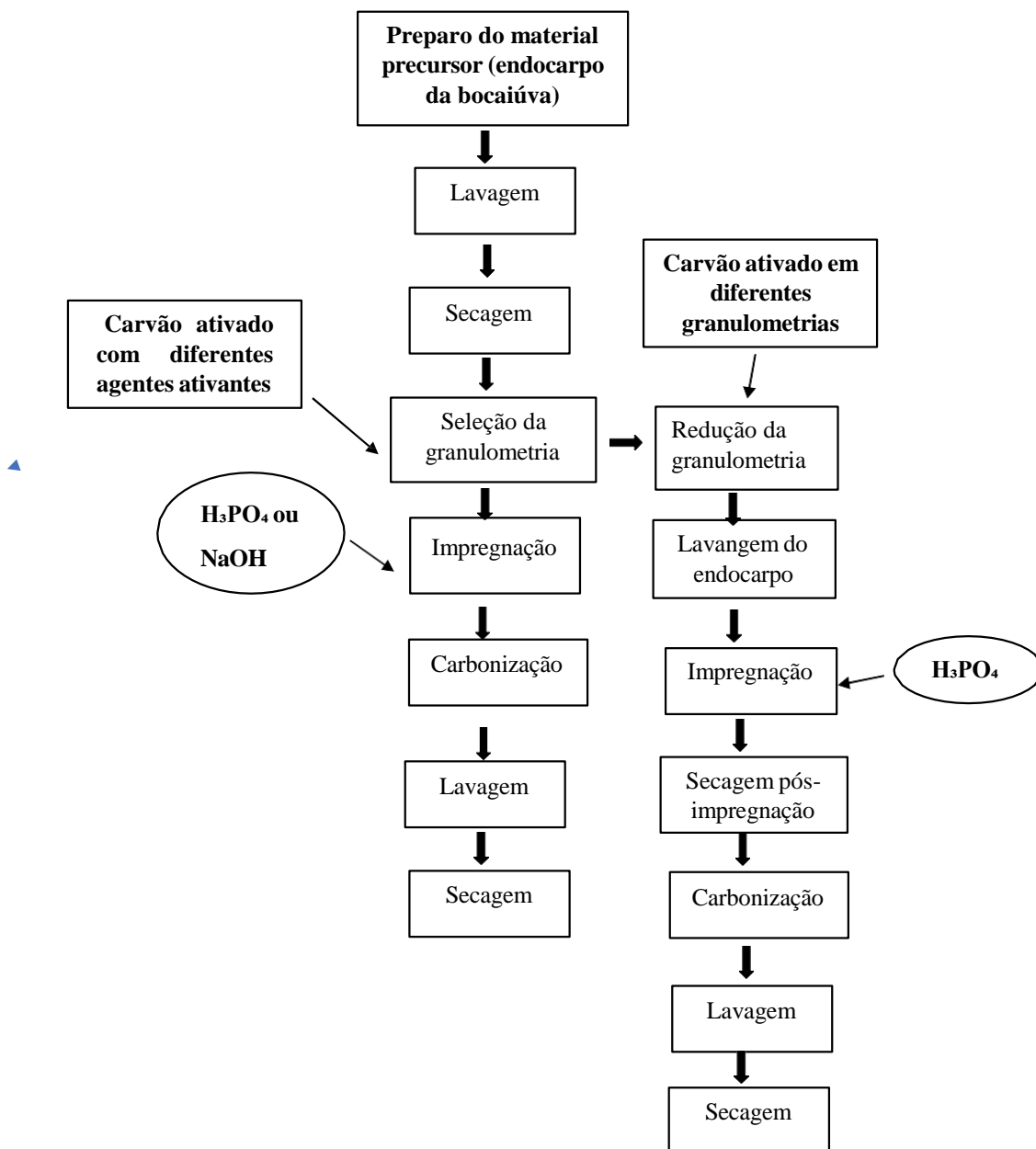
Fonte: Autor, 2025

Para uma melhor compreensão dos processos envolvidos na produção dos 5 tipos diferentes de carvões que foram utilizados no trabalho, são apresentados os diferentes procedimentos tanto com a ativação com NaOH, quanto com a ativação com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Logo, essas diferentes formas de produção, foram realizadas para se verificar o quanto o tipo de metodologia utilizada na retirada do endocarpo da Bocaiuva, a ordem da etapa de ativação química e o tipo de ativante utilizados, influenciavam na obtenção de um carvão com características de um melhor adsorvente. Todos os carvões foram produzidos usando a relação 1:1 relação agente ativante/biomassa na temperatura de 500°C por 30 minutos.

A metodologia empregada na síntese do carvão ativado a partir do endocarpo de Bocaiuva foi baseado no descrito por Lissaneddine *et al.* (2021) com algumas modificações. O carvão foi produzido com faixa granulométrica entre 2 e 4,75 mm. O processo de ativação foi realizado usando ativação química, para todos os tipos de carvão.

Após a obtenção do endocarpo da Bocaiuva, com o pré-aquecimento (P) e sem o pré-aquecimento (S) foram produzidos os carvões ativados com os dois tipos de agentes ativantes (NaOH e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), cujo a sequência de produção de cada carvão, encontram-se apresentadas mais a seguir no trabalho. Abaixo na figura 8 pode ser visualizado as etapas envolvidas na produção dos carvões ativados produzidos no trabalho.

Figura 8- Fluxograma geral da produção dos diferentes carvões ativados



#### 4.1.2.5 Produção do carvão ativado com NaOH

Segue abaixo a descrição dos procedimentos utilizados para cada tipo de carvão, sendo que a diferença entre os carvões P- CIB e P-ICB, é a ordem na etapa de impregnação do material.

#### Produção do carvão ativado P- CIB

Uma quantidade de 125g de precursor (endocarpo de Bocaiuva com pré-aquecimento) foi aquecida a 500 °C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. O

material foi então mantido sob aquecimento em forno mufla 3000-10P-CE-INOX a 500°C por 30 min. Após carbonizado, o carvão foi colocado em dessecador até seu total resfriamento. Logo após o material foi misturado com solução de hidróxido de sódio 5mol/L (PA) a uma proporção em peso (ativador/precursor) de 1:1, agitando durante 1h. Posteriormente, o endocarpo impregnado com NaOH, foi cuidadosamente lavado utilizando água ultrapura até obter pH 7,0. Por fim, o material foi colocado em uma estufa em temperatura de 38°C por 24 h para secagem.

#### **Produção do carvão ativado P-ICB**

Uma quantidade de 125g de precursor (endocarpo de Bocaiuva com pré-aquecimento) foi fisicamente misturado com o hidróxido de sódio 5mol/L (PA) a uma proporção em peso (ativador/precursor) de 1:1, agitando durante 1 h. Posteriormente, o endocarpo impregnado com NaOH foi aquecido a 500°C, com uma taxa de aumento de temperatura de 10°C por minuto. O material foi então mantido no forno tipo mufla a 500°C por 30 min. Após carbonizado, o carvão foi colocado em dessecador até seu total resfriamento. Logo após o material foi cuidadosamente lavado utilizando água ultrapura até obter pH 7,0. Por fim, o material foi colocado em uma estufa em temperatura de 38°C por 24h para secagem.

#### **Produção do carvão ativado S-ICB**

Uma quantidade de 125 g de precursor (endocarpo de Bocaiuva in natura) foi fisicamente misturada com o hidróxido de sódio 5mol/L (PA) a uma proporção em peso (ativador/precursor) de 1:1, agitando durante 1h. Posteriormente, o endocarpo impregnado com NaOH foi aquecido a 500°C, com uma taxa de aumento de temperatura de 10 °C por minuto. O material foi então mantido no forno tipo mufla a 500 °C por 30 min. Após carbonizado, o carvão foi colocado em dessecador até seu total resfriamento. Logo após, o material foi cuidadosamente lavado utilizando água ultrapura até obter pH 7,0. Por fim, o material foi colocado em uma estufa em temperatura de 38°C por 24 horas para secagem. Abaixo na Figura 10, é ilustrado as etapas da produção dos diferentes tipos de carvão ativado do endocarpo da Bocaiúva para melhor compreensão, ficando evidenciado as etapas da produção dos 3 diferentes tipos de carvão ativado com NaOH.

#### 4. 1. 2. 6 Produção do carvão ativado com $H_3PO_4$

Segue abaixo a descrição dos procedimentos utilizados para cada tipo de carvão ativado com  $H_3PO_4$ , sendo que a diferença entre os carvões S- ICA e P-ICA é o tratamento térmico do endocarpo antes da impregnação com  $H_3PO_4$ .

##### **Produção do carvão ativado S-ICA**

Uma quantidade de 125g de precursor (endocarpo de Bocaiuva in natura) foi fisicamente misturada com o ácido fosfórico a uma proporção em peso (ativador/precursor) de 1:1, agitando durante 1h. A seguir, o endocarpo impregnado com  $H_3PO_4$  foi aquecido a  $500^\circ C$ , com uma taxa de aquecimento de temperatura de  $10^\circ C$  por minuto. O material foi então mantido no forno tipo mufla a  $500^\circ C$  por 30 min. Após carbonizado, o carvão foi colocado em dessecador até seu total resfriamento. Logo após, o material foi cuidadosamente lavado utilizando água ultrapura até obter pH 7,0. Por fim, o material foi colocado em uma estufa em temperatura ambiente de  $38^\circ C$  por 24h para secagem.

##### **Produção do carvão ativado P-ICA**

Uma amostra de 125 g do precursor, composto por endocarpo de Bocaiúva previamente pré-aquecido, foi misturada com ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) na proporção mássica de 1:1 (ativador/precursor). A mistura foi submetida à agitação contínua por 1 hora para garantir uma impregnação uniforme. Em seguida, o material impregnado foi submetido ao processo de carbonização em forno tipo mufla, com aquecimento gradual até  $500^\circ C$ , a uma taxa de  $10^\circ C$  por minuto. A temperatura de  $500^\circ C$  foi mantida por 30 minutos.

Após a carbonização, o carvão foi resfriado em dessecador até atingir a temperatura ambiente. O material foi então lavado cuidadosamente com água ultrapura até que o pH da solução atingisse o valor neutro (pH 7,0), removendo resíduos do agente ativador. Por fim, o carvão ativado foi seco em estufa a  $38^\circ C$  por 24 horas, sendo então armazenado para posterior caracterização e aplicação nos ensaios de adsorção.

#### 4. 2 Caracterização da biomassa e dos carvões ativados com diferentes formas de ativação

Após a Etapa 1 de produção dos diferentes tipos de carvão, foram realizadas as análises de caracterização da biomassa in natura (endocarpo) e dos 5 tipos diferentes de carvões (adsorventes) produzidos, conforme Figura 9 a seguir. Foram realizadas as análises de espectrometria de infravermelho (IR), análises termogravimétricas (TG/DTG), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), análise da área superficial e porosidade do carvão ativado e do endocarpo da Bocaiuva.

Figura 9-Análises feitas para a caracterização dos carvões produzidos.



Fonte: Autor, 2025

##### 4. 2.1 Caracterização da Biomassa (endocarpo sem pré-aquecimento)

##### 4. 2. 2 Análise Térmica (TG)

As curvas de análise termogravimétrica (TG/DTG) para determinação de variação da massa da amostra dos materiais foram obtidas pelo Centro Integrado de Análises - CIA-FURG, utilizando equipamento Analisador Termogravimétrico TGA-50–Shimadzu, usando atmosfera de ar, com taxa de fluxo 50 ml/min, faixa de temperatura entre 25.81°C a aproximadamente 800°C. Nessas análises foram utilizadas massas de amostras de 11,398 mg, colocadas em cadinhos de Platina.

#### 4. 2. 3 Espectrometria de Infravermelho

A identificação dos grupos funcionais presentes no endocarpo de Bocaiuva in natura e nos carvões ativados foi realizada por espectroscopia na região do infravermelho (FTIR), utilizando o espectrômetro CARY 630 FTIR da marca Agilent Technologies, localizado no Laboratório de Pesquisa em Química (LAPEQ) da Universidade Federal do Tocantins (UFT). As amostras foram previamente secas e trituradas até obtenção de pó fino homogêneo. Posteriormente, cerca de 2 mg de cada amostra foi analisada diretamente, empregando a técnica de reflectância total atenuada (ATR). As análises foram realizadas na faixa de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 32 varreduras por espectro. A interpretação dos espectros foi baseada nas bandas características de vibração dos grupos funcionais, como estiramentos de ligações O–H, C–H, C=O, C=C e C–O, conforme os princípios descritos por Smith (2011), permitindo avaliar as alterações químicas provocadas pelos processos de carbonização e ativação química.

#### 4. 2. 4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

As análises de MEV/EDS foram realizadas conforme a metodologia descrita por Oliveira *et al.* (2021) e executadas no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-Sul/FURG). As imagens foram obtidas com tensões de aceleração de 15,0 kV utilizando um filamento de tungstênio, com ampliações de até 3000 vezes.

As amostras foram fixadas em *stubs* (porta-amostras metálicos em formato cilíndrico, utilizados para manipulação em microscopia eletrônica) com fita de carbono dupla face. Posteriormente, as amostras passaram pelo processo de metalização em um equipamento *sputtering*, sendo recobertas com uma fina camada de ouro — obtida após 200 segundos de deposição — com espessura na escala de nanômetros, conferindo condutividade adequada à superfície.

#### 4.2.4.1 Caracterização dos diferentes tipos de carvões ativados

#### 4.2.4.2 Espectrometria de Infravermelho

A identificação dos grupos funcionais e estruturas do endocarpo de Bocaiuva e do carvão ativado produzido foram determinados conforme metodologia descrita no item 4.3.1.2.

4.2.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

As análises de MEV/EDS foram realizadas conforme a metodologia descrita no item 4. 2. 4

#### 4.2.4.4 Análise textural do carvão ativado de endocarpo de Bocaiuva.

A caracterização da área superficial específica e da porosidade dos carvões ativados foi realizada com base na metodologia descrita por Lissaneddine et al. (2021), sendo executada no Centro Integrado de Análises (CIA-FURG). Utilizou-se o método de Brunauer–Emmett–Teller (BET) para a determinação da área superficial específica (SBET) e do volume total de poros (VT). Antes da análise, as amostras foram submetidas a um processo de degaseificação para remoção de impurezas e umidade. Em seguida, a adsorção de nitrogênio foi realizada à temperatura de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (77 K), utilizando o analisador Gemini VII 2390 A (Micromeritics®). Este equipamento permite avaliar, em materiais sólidos na forma de pó seco, parâmetros como a área específica, a distribuição do tamanho e o volume de poros, além da obtenção das isotermas de adsorção e dessorção, por meio de adsorção física de nitrogênio líquido.

### 4. 3 Produção do carvão ativado com $\text{H}_3\text{PO}_4$ em diferentes granulometrias e caracterização dos carvões ativados produzidos

#### 4. 3.1 Produção do carvão ativado com $\text{H}_3\text{PO}_4$ em diferentes granulometrias

A seguir na Figura 10 é mostrado um fluxograma do procedimento para produção do carvão ativado no estudo da melhor granulometria para adsorção.

Figura 10- Fluxograma de produção de carvão ativado com impregnação de  $\text{H}_3\text{PO}_4$

em diferentes granulometrias.



Fonte: Autor, 2025

As matérias-primas (endocarpo de Bocaiuva) foram moídas em moinho de bolas no Centro Universitário Católica do Tocantins – UniCatólica, para obtenção de partículas com tamanho entre 212  $\mu\text{m}$  e 2,00 mm, e peneiradas em peneiras de 10, 16, 30 e 70 mesh. Após trituradas, as amostras foram secas a 105°C, por 24h em estufa.

Foram produzidos 4 tipos de carvões ativados diferindo apenas da granulometria, sendo elas de 10, 16, 30 e 70 mesh. Os carvões foram identificados de forma crescente da maior para a menor granulometria no qual foi identificado como AC10 (10 mesh), o AC16 (16 mesh), o AC30 (30 mesh) e o AC70 de (70 mesh).

A produção do carvão ativado a partir do endocarpo de Bocaiuva em diferentes granulometrias foi baseado no descrito por Santos (2018) com algumas modificações. Os carvões ativados foram preparados utilizando a metodologia de ativação química utilizando ácido fosfórico como agente ativante. Os materiais precursores foram impregnados com ácido fosfórico (85% P.A.), na razão de impregnação de 1,5:1 (massa de ativante/massa do precursor) e secos em estufa a 105 °C por 48 h. Após este período, eles foram carbonizados a 500 °C (taxa de aquecimento de 5°C/min), durante 1h. Após a carbonização, os carvões ativos foram lavados com água ultrapura, à temperatura entre de 60 e 70°C, até pH neutro. As amostras lavadas foram secas a 105°C durante 24 h e acondicionadas em embalagens plásticas. Após a obtenção desses 4 novos tipos de carvões, eles foram caracterizados utilizando as mesmas metodologias de análises da etapa 2.

#### 4. 3. 2 Caracterização do carvão ativado com $\text{H}_3\text{PO}_4$ com diferentes granulometrias

Todos os novos carvões produzidos foram caracterizados através das análises de espectrometria de infravermelho (IR), análises termogravimétricas (TG/DTG), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), análise da área superficial e porosidade do carvão ativado, conforme metodologias descritas no item 4.2 para análises.

#### 4. 4 Testes de eficiência de adsorção em azul de metileno

##### 4. 4. 1 Planejamento Experimental

O adsorvente utilizado nos experimentos foi o carvão ativado produzido nas diferentes granulometrias, no qual foi preparado a partir do endocarpo da Bocaiuva. Inicialmente, foram realizados testes preliminares com diferentes concentrações e tempo de contato do adsorvente com solução padrão de azul de metileno para verificar a quantidade adsorvido pelo carvão. Para otimização da adsorção do azul de metileno em meio líquido, foi utilizada a metodologia de superfície de resposta, com delineamento composto central rotacional (DCCR) com um total de 17 ensaios, incluindo 6 pontos axiais e 3 pontos centrais.

Neste estudo os fatores são  $X_1$  que representa o tempo de contato,  $X_2$  massa de carvão ativado e  $X_3$  concentração do adsorvato, como variáveis independentes. Sendo a variável dependente deste estudo, a eficiência de adsorção do azul de metileno pelo carvão ativado. As variáveis tempo de contato (em minutos), massa de carvão (em gramas) e concentração (em mg/L) foram determinadas pelo planejamento experimental, através do software Protimiza Experimental Design. com o objetivo de otimizar as condições para a máxima adsorção do azul de metileno com o carvão ativado. Abaixo na Tabela 2 pode ser visualizado o delineamento para os ensaios propostos.

Tabela 2- Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para os ensaios propostos.

Ensaio	Variáveis codificadas			Variáveis reais		
	t	m	[ ] inicial	t (min)	m (g)	[ ] inicial (mg/L)
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
<b>1</b>	-1	-1	-1	60	0,10	2
<b>2</b>	+1	-1	-1	120	0,10	2
<b>3</b>	-1	+1	-1	60	0,30	2
<b>4</b>	+1	+1	-1	120	0,30	2
<b>5</b>	-1	-1	+1	60	0,10	5
<b>6</b>	+1	-1	+1	120	0,10	5
<b>7</b>	-1	+1	+1	60	0,30	5
<b>8</b>	+1	+1	+1	120	0,30	5
<b>9</b>	-1,68	0	0	39,55	0,20	3,50
<b>10</b>	1,68	0	0	140,45	0,20	3,50
<b>11</b>	0	-1,68	0	90	0,03	3,50
<b>12</b>	0	1,68	0	90	0,37	3,50

<b>13</b>	0	0	-1,68	90	0,20	0,98
<b>14</b>	0	0	1,68	90	0,20	6,02
<b>15</b>	0	0	0	90	0,20	3,50
<b>16</b>	0	0	0	90	0,20	3,50
<b>17</b>	0	0	0	90	0,20	3,50

Nota: t(tempo), m (massa), [ ] concentração,  $X_1$ = tempo (min); m (massa),  $X_2$ = massa de carvão ativado (g) e  $X_3$ = Concentração do adsorvato (mg/ L). Fonte: Autor (2025)

#### 4. 4 .2. Ensaios de adsorção com azul de metileno

Após serem produzidos os 4 diferentes tipos nas diferentes granulometrias de carvões ativados, foram realizados testes de adsorção com cada tipo de carvão utilizando o corante azul de metileno como adsorvato, por ser um corante que já foi testado por diversas vezes em testes de adsorção com carvão ativado, muito usado para avaliar as propriedades adsorptivas de carvões (Castro *et al.*, 2021). Foi realizado também, teste de adsorção com a utilização do endocarpo da Bocaiuva in natura, para verificar se este possui capacidade adsorptiva, sem ser carbonizado ou ativado.

Para determinar a concentração do azul de metileno em cada experimento, foi utilizada determinação espectrofotométrica segundo Silva *et al.* (2024). As soluções testes de azul de metileno, solução intermediária e a curva de calibração foram preparadas a partir da diluição de uma solução estoque de 1000 mg/L. Foram preparados 10 pontos da curva de calibração com diferentes concentrações do azul de metileno, nas concentrações de 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. 2,5. 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 mg/L.

Após estabelecer a curva de calibração, procedeu-se com o preparo das soluções testes, a fim de obter concentrações adequadas para 17 ensaios de adsorção.

Para os ensaios realizados com carvão ativado, foram pesadas as quantidades de carvão ativado conforme dado pelo planejamento experimental, em béqueres de 125 ml e em seguida foram utilizados 40 ml de solução de azul de metileno, nas concentrações também especificadas pelo planejamento experimental para cada ensaio. As soluções foram agitadas a 165 RPM a temperatura ambiente em agitador (Tecnal, TE), com tempo de contato também estabelecido pelo delineamento experimental.

Após a agitação as soluções foram separadas do material adsorvente, sendo colocadas em tubos de ensaios, até a sua completa decantação, para posteriormente serem realizadas

as medições da concentração final do azul de metileno por espectrofotometria no comprimento de onda de 660nm, a fim de comparar com as soluções iniciais e avaliar a eficiência de adsorção do carvão ativado (Silva *et al.* 2024).

Para o cálculo da eficiência de adsorção do azul de metileno foi utilizada a Equação 4

Equação 4: Fórmula da eficiência de remoção.

$$Ef (\%) = \frac{CI-CF}{CI} * 100 \quad (4)$$

Onde:

EF=Eficiência de remoção para cada amostra

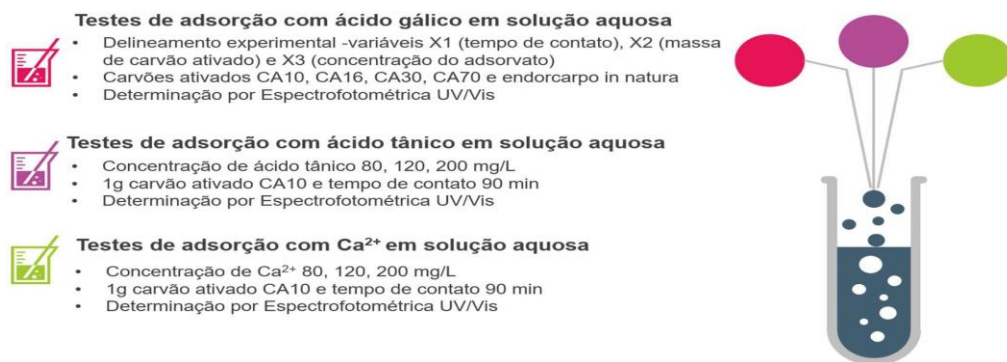
CI=Concentração inicial

CF= Concentração final

#### 4. 4. 3 Teste de eficiência de adsorção do carvão ativado com diferentes compostos

Após a seleção do carvão ativado com melhores características adsorvente nos ensaios com azul de metileno, foram realizados os testes de adsorção para remoção diferentes adsorvatos, visando estabelecer diferentes usos dos novos carvões produzido de resíduo, em substituição de carvões ativados comerciais utilizados na análise de alimentos e indústria.

Com os dados fornecidos pelo DCCR na Etapa 4, foram realizados os ensaios de adsorção de soluções contendo ácido gálico, ácido tânico, íons cálcio, sob agitação em agitador (Tecnal, TE) a temperatura ambiente. A escolha dos compostos estudados deu-se em função de serem causadores de impactos negativos em determinadas concentrações como na qualidade sensorial, e na segurança alimentar, configurando-se como fatores limitantes para a aceitação do consumidor e a viabilidade comercial de alguns produtos. Após identificar a granulometria com maior eficiência de adsorção no teste de azul de metileno, através do método estatístico de superfície de resposta, foram realizados ensaios de aplicação das condições ótimas obtidas na remoção de soluções contendo ácido gálico, ácido tânico e íons cálcio. O carvão foi aplicado para verificar a capacidade de remover estes compostos os diferentes testes realizados no trabalho estão resumidos na Figura 11 abaixo. Figura 11- Testes de adsorção com diferentes compostos.



Fonte: Autor, 2025

#### 4.4.5 Testes de adsorção com carvão de endocarpo de Bocaiuva com o ácido Gálico

Após serem feitos os testes de adsorção com o azul de metileno e utilizando os 4 diferentes tipos de carvões ativados foram realizados testes de adsorção com o ácido gálico como adsorvato. Para isso foi escolhido o carvão AC10 pois demonstrou melhores características em relação aos demais adsorventes e realizou-se também um delineamento para verificação da influência de variáveis como tempo de contato, concentração de adsorvato e massa de carvão influenciam na adsorção do ácido gálico.

#### 4.4.6 Delineamento experimental

As variáveis tempo de contato (minutos), massa de carvão (em gramas) e concentração (em mg/L) utilizadas no experimento foram determinadas pelo planejamento experimental, através do software Protimiza Experimental Design com o objetivo de otimizar as condições para a máxima adsorção do ácido gálico com o carvão ativado. Foi empregado o delineamento composto central rotacional (DCCR) com um total de 17 ensaios, incluindo 6 pontos axiais e 3 pontos centrais. A faixa de concentração de ácido gálico para o experimento foi escolhida após testes preliminares, assim como pela faixa de concentração de quantificação da metodologia escolhida para determinação do analito.

A Tabela 3 abaixo apresenta os ensaios aplicados no planejamento experimental, com variáveis codificadas e reais.

Tabela 3- Ensaios aplicados no planejamento experimental.

Ensaio	Variáveis codificadas			Variáveis reais		
	t	m	[ ] inicial	t	m	[ ] inicial
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	(min) X <sub>1</sub>	(g) X <sub>2</sub>	(mg/L) X <sub>3</sub>
<b>1</b>	-1	-1	-1	60	0,50	200
<b>2</b>	+1	-1	-1	90	0,50	200
<b>3</b>	-1	+1	-1	60	2	200
<b>4</b>	+1	+1	-1	90	2	200
<b>5</b>	-1	-1	+1	60	0,50	1200
<b>6</b>	+1	-1	+1	90	0,50	1200
<b>7</b>	-1	+1	+1	60	2	1200
<b>8</b>	+1	+1	+1	90	2	1200
<b>9</b>	-1,68	0	0	50	1,25	700
<b>10</b>	1,68	0	0	100	1,25	700
<b>11</b>	0	-1,68	0	75	0	700
<b>12</b>	0	1,68	0	75	2,51	700
<b>13</b>	0	0	-1,68	75	1,25	0
<b>14</b>	0	0	1,68	75	1,25	1550
<b>15</b>	0	0	0	75	1,25	700
<b>16</b>	0	0	0	75	1,25	700
<b>17</b>	0	0	0	75	1,25	700

Nota: t(tempo), m (massa), [ ] concentração, X<sub>1</sub>= t tempo (min); m (massa), X<sub>2</sub>= massa de carvão ativado (g) e X<sub>3</sub>= Concentração do adsorvato (mg/ L).

Fonte: Autor, 2025

#### 4. 4. 7 Ensaio de adsorção de ácido gálico em solução aquosa pelo carvão ativado do endocarpo de Bocaiuva

Para os ensaios realizados com carvão ativado foram pesadas as quantidades de carvão ativado conforme dado pelo planejamento experimental, em seguida foram utilizados 40 ml de solução de ácido gálico, nas concentrações também especificadas pelo planejamento experimental para cada ensaio e, em seguida as soluções foram agitadas a 165 RPM a temperatura ambiente em agitador (Tecnal, TE), com tempo de contato também estabelecido pelo delineamento experimental. Após a agitação foi feito a determinação do ácido gálico, seguindo a metodologia de Waterhouse (2002), no qual, as soluções foram colocadas em tubos de ensaio sem a presença do material adsorvente, aguardando-se a completa decantação das partículas remanescentes. Após o contato o sobrenadante contendo ácido gálico, foram colocados em tubos falcon 0,30 ml da amostra do ácido gálico, 1,5 ml da solução de folin ciocalteau e 1,2 ml de carbonato de sódio e deixado em repouso por duas horas ao abrigo da luz conforme metodologia de

determinação de fenólicos totais e após o tempo de reação foi feita a leitura em espectrofotômetro a 760nm, a fim de comparar com as soluções iniciais e avaliar a eficiência de adsorção do carvão ativado.

Para o cálculo da eficiência de adsorção do ácido gálico foi utilizada a Equação 4, apresentada anteriormente, mesma equação para cálculo da eficiência de adsorção do teste com azul de metileno.

As soluções testes de ácido gálico, soluções intermediárias e da curva de calibração, foram preparadas a partir da diluição de uma solução estoque de 10.000 mg/L. Para a reação do ácido gálico foram preparadas soluções de folin ciocalteau a 10% e carbonato de sódio a 4%. Em seguida a concentração de ácido gálico foi determinada pela metodologia de determinação de compostos fenólicos totais por Espectrofotometria de UV-VIS no comprimento de onda a 760nm.

No presente estudo, optou-se pela utilização de delineamentos experimentais distintos para os sistemas de adsorção com azul de metileno e ácido gálico, em razão das especificidades analíticas de cada composto. Essa escolha se deve, principalmente, às diferenças nas faixas de concentração adequadas para a leitura espectrofotométrica, uma vez que as metodologias apresentam faixas de trabalho e sensibilidade analíticas distintas, impossibilitando a adoção de um mesmo delineamento para ambos. Para o ácido gálico, foi necessário utilizar concentrações mais elevadas, em uma faixa de concentrações mais altas, pois este composto requer maiores quantidades para gerar absorvâncias adequadas, que estejam dentro da faixa de detecção e quantificação do equipamento. Em contrapartida, para o azul de metileno, foi possível trabalhar com concentrações mais baixas, uma vez que o espectrofotômetro possui elevada sensibilidade para esse composto. Adicionalmente, realizou-se testes preliminares, em triplicata com ácido tânico e cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), fora dos delineamentos principais, com o objetivo de verificar a capacidade adsortiva do carvão ativado frente a determinados compostos. Esses testes complementares, tiveram caráter exploratório, auxiliando na definição das faixas de concentração mais adequadas e no ajuste dos parâmetros experimentais utilizados nos delineamentos subsequentes. Essas adequações metodológicas foram essenciais para assegurar a qualidade e a confiabilidade dos dados obtidos, respeitando os limites metodológicos e as particularidades de cada sistema de adsorção.

#### 4. 4. 8 Testes de adsorção de ácido tânico em solução aquosa pelo carvão ativado do endocarpo de Bocaiuva.

Após testes com azul de metileno e ácido gálico verificou-se a aplicabilidade do carvão AC10 adsorver outras substâncias, mantendo-se a massa e o tempo de contatos mesmos, variando apenas as concentrações de adsorvatos.

Para os ensaios realizados com carvão ativado AC10 e ácido tânico como adsorvato, foi pesado 1g de carvão ativado em béqueres de 125 ml em seguida foram utilizados 40 ml de solução de ácido tânico nas concentrações de 80, 120, 200 mg/L para cada ensaio. Os ensaios foram realizados em triplicata. Em seguida as soluções foram agitadas a 165 RPM a temperatura ambiente em agitador (Tecnal, TE), com tempo de contato de 90 minutos. Após a agitação, as soluções foram separadas do material adsorvente, sendo colocadas em tubos de ensaios até a sua completa decantação. A concentração de ácido tânico, foi determinada seguindo a metodologia de Singleton e Rossi (1965) para taninos totais. Após o contato do ácido tânico com o carvão ativado, foram colocados em tubos falcon, 2500  $\mu$ L da amostra, 125  $\mu$ L da solução de folin ciocalteau, e 250  $\mu$ L de carbonato de sódio e deixado em repouso por 30 minutos ao abrigo da luz. Para o cálculo da eficiência de adsorção dos taninos totais foi utilizada a Equação 4, apresentada anteriormente utilizada nos testes com azul de metileno e ácido gálico.

#### 4. 4. 9 Testes de adsorção de $\text{Ca}^{2+}$ em solução aquosa pelo carvão ativado do endocarpo de Bocaiuva

Para os ensaios realizados com carvão ativado AC10 e íons cálcio como adsorvato foi pesado 1g de carvão ativado em béqueres de 125 ml em seguida foram utilizados 40 ml de solução de cálcio nas concentrações de 80, 120, 200 mg/L para cada ensaio. Os ensaios foram realizados em triplicata. Em seguida as soluções foram agitadas a 165 RPM a temperatura ambiente, em agitador (Tecnal, TE), com tempo de contato de 90 minutos. Após a agitação, as soluções foram postas em tubos de ensaios e posteriormente separadas do material adsorvente por meio de filtração utilizando papel filtro. Após a filtração as soluções foram colocadas em tubos falcon e posteriormente levados para a leitura em sistema de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) acoplado a um detector de comprimento de onda UV-VIS, utilizando coluna Metrosep C4-150/4.0, eluente ácido oxálico 340mg/L, fluxo 1mL/min, pressão de 7,04 Mpa, Temperatura de 30°C. Para o

cálculo da eficiência de adsorção do cálcio foi utilizada a Equação 4, utilizada nos testes com os outros compostos estudados anteriormente.

#### 4. 4. 10 Análise estatística dos dados experimentais

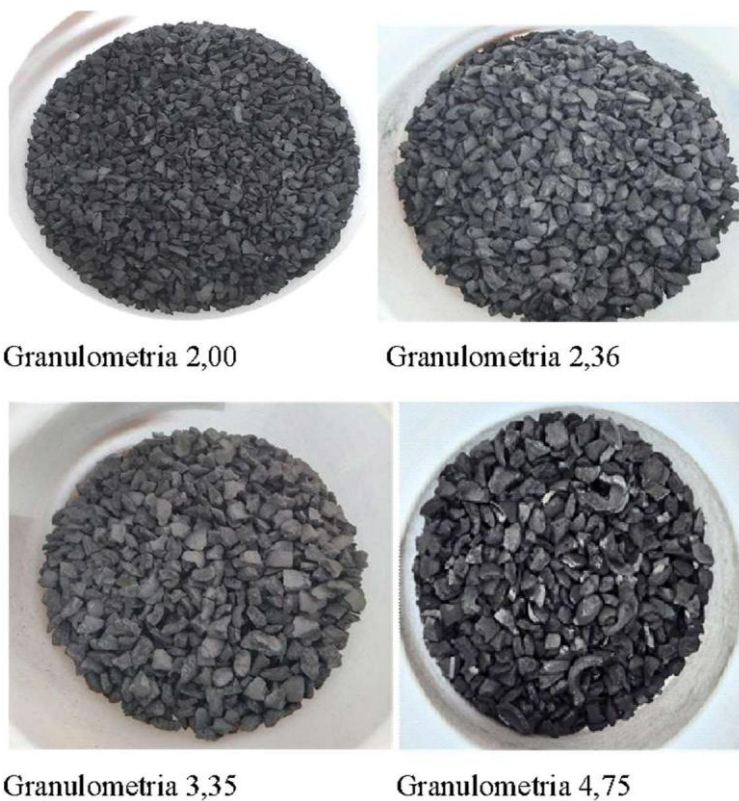
Os resultados obtidos dos experimentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para determinar diferenças significativas com nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ) e comparação das médias pelo Teste de Tukey com nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Os dados foram apresentados como média  $\pm$  desvio padrão.

A análise estatística foi realizada com o software gratuito SISVAR 5.4. Para validação do modelo de otimização, foi adotado o mesmo nível de significância de 5% utilizado nos experimentos. Os dados foram apresentados na forma de gráfico, por meio da regressão, e Tabelas associadas à análise de variância.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSOES

Na Figura 12 é possível observar o carvão ativado produzido nas diferentes granulometrias. Sobre o rendimento do endocarpo com pré-aquecimento para a produção do carvão ativado, observou-se que a partir de 5kg do fruto da Bocaiuva integral foi possível obter em torno de 19% em torno de 950g, de endocarpo de Bocaiuva após o descasque, queima, raspagem e quebra, do fruto, o que pode justificar seu aproveitamento em processos como para a produção de carvão ativado.

Figura 12- Carvão ativado com NaOH produzido a partir do endocarpo da Bocaiuva, nas diferentes granulometrias.



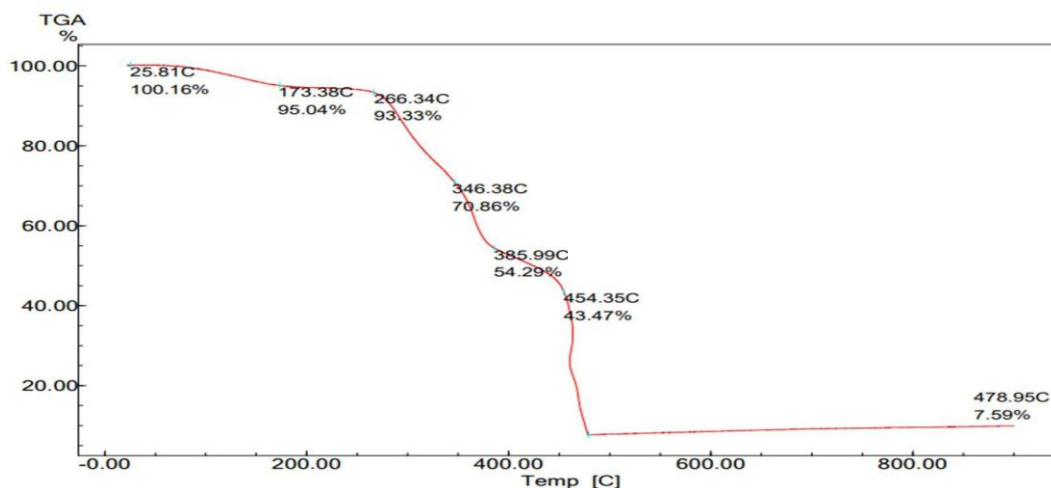
Fonte: Autor, 2025

5.1 Resultados de caracterização dos carvões produzidos por diferentes formas de ativação e agente ativantes

#### 5.1.1 Análise térmica (TG)

Na Figura 13 pode ser visualizado o gráfico da análise termogravimétrica do endocarpo (biomassa), utilizada na produção do carvão ativado do estudo. A curva TGA indica várias etapas de decomposição da biomassa. Inicialmente, há uma pequena perda de massa devido à evaporação de água e voláteis leves.

Figura 13- Análise termogravimétrica (TGA) para endocarpo de Bocaiuva.



Fonte: Autor, 2025

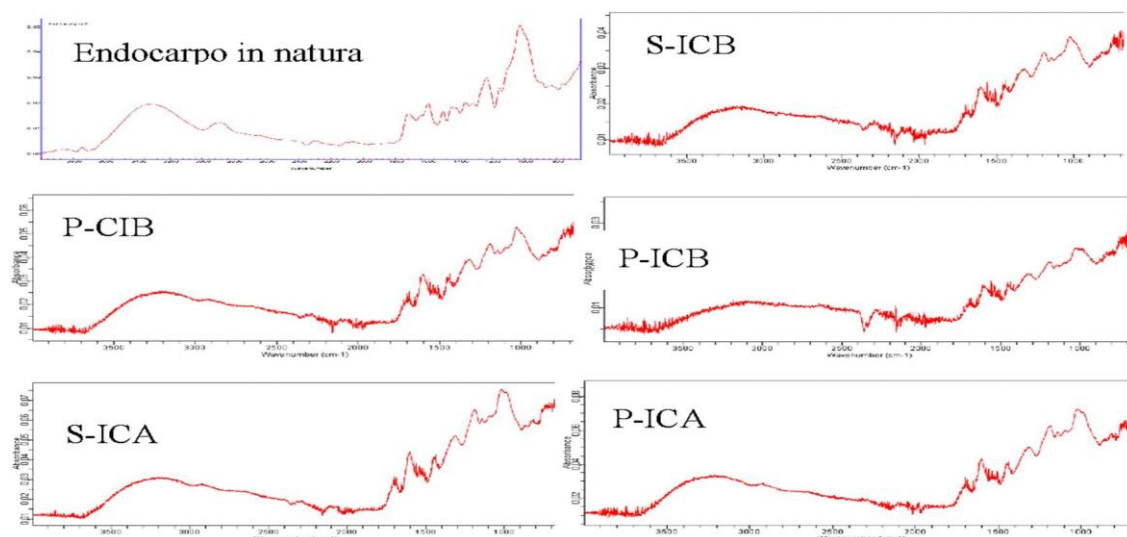
A partir de aproximadamente 300°C observa-se uma perda de massa mais significativa, correspondendo à degradação dos componentes orgânicos principais, como da hemicelulose a princípio, e posteriormente da celulose, com degradação mais intensa da lignina. Yang *et al.* (2007) relataram que a hemicelulose se decompõe entre 220- 315 °C, a celulose entre 315 e 400 °C e a lignina de forma mais gradual em menos de 900°C. A degradação mais intensa observada na Figura 12, ocorre entre 280°C e 500°C, com uma redução substancial no peso da amostra. A partir de 450°C, a maioria dos componentes orgânicos já se decompôs, restando principalmente materiais inorgânicos, esses intervalos estão em consonância com dados da literatura.

O percentual de 7,59% obtido ao final da análise termogravimétrica (TGA), a 478.95°C, representa a massa residual da amostra após a sua decomposição térmica completa.

### 5.1.2 Espectrometria de Infravermelho (IR)

Na Figura 14, são apresentados os espectros na região do infravermelho das amostras do endocarpo da Bocaiuva e das amostras de carvão ativado.

Figura 14- Espectrometria de Infravermelho dos de carvões ativados impregnados com NaOH.



(P-CIB, Pré-aquecimento + Carbonização e impregnação; (P-ICB, Pré-aquecimento + impregnação e Carbonização); (S-ICA, Endocarpo in natura + impregnação e Carbonização); (P-ICA, Pré-aquecimento + impregnação e Carbonização); (S-ICB, Endocarpo in natura + impregnação e Carbonização).

Fonte: Autor, 2025

A partir do espectro FTIR da amostra do Endocarpo in natura é possível sugerir que ele possui uma composição rica em grupos hidroxila, carbonila, e cadeias alifáticas. A presença de água adsorvida também pode ser indicada pelo amplo pico na região de  $3400\text{ cm}^{-1}$ . Estes grupos funcionais, indicam que o endocarpo contém uma mistura complexa de compostos orgânicos. Esses grupos funcionais conferem à biomassa características como hidrofiliidade, acidez superficial e capacidade de formar interações com contaminantes, o que é essencial em processos como adsorção e pirólise. A presença dessas funcionalidades também influencia a estabilidade térmica da biomassa e a qualidade dos produtos gerados na sua conversão térmica. Estudos recentes corroboram esses achados de que essas estruturas químicas são preservadas ou modificadas de acordo com o tipo de biomassa e as condições de tratamento térmico aplicadas (Janu *et al.*, 2021; Ben *et al.*, 2019; Wood; Mašek; Erastova, 2024). Hafizuddin *et al.* (2021) observaram que a modificação superficial com NaOH em carvões ativados, resultou em picos FTIR significativos em  $3455\text{ cm}^{-1}$ , atribuídos ao estiramento O–H e foram identificados grupos carboxílicos e outras funcionalidades oxigenadas

Os picos na região entre 1300-1000  $\text{cm}^{-1}$  são típicos das vibrações de estiramento C-O, que podem indicar a presença de ésteres, éteres, álcoois ou carboxilatos. A complexidade e os múltiplos picos, sugerem a presença de diferentes tipos de grupos C-O, importantes em processos de adsorção. Carvões ativados possuem grande variedade de grupos funcionais de superfície, e que por sua vez, dependem do material precursor e do método de ativação, sendo de fundamental importância a identificação desses grupos, uma vez que são responsáveis por determinar as propriedades de superfície do carvão ativado, tão como, sua capacidade de adsorção (Sousa *et al.*, 2021). No espectro de infravermelho dos carvões ativados, representados nas Figuras acima, é possível observar que diferentes grupos funcionais foram produzidos durante o processo de ativação, utilizando os dois tipos de agente ativante. É possível observar também, que os picos se comportam de forma semelhante nas amostras dos carvões ativados P-CIB, P-ICB e S-ICB impregnado como agente ativante NaOH.

Carvões ativados possuem grande variedade de grupos funcionais de superfície e que por sua vez, dependem do material precursor e do método de ativação, sendo de fundamental importância a identificação desses grupos, uma vez que são responsáveis por determinar as propriedades de superfície do carvão ativado, tão como, sua capacidade de adsorção (Sousa *et al.*, 2021). No espectro de infravermelho dos carvões ativados, representados na Figura 13, é visualizado que diferentes grupos funcionais foram produzidos durante o processo de ativação utilizando os dois tipos de agente ativante. É possível observar que, os picos se comportam forma semelhante nas amostras dos carvões ativados P-CIB, P-ICB e S-ICB impregnado com agente ativante NaOH. Os picos mais altos de absorvância ocorrem na região da "impressão digital", entre 1300-1000  $\text{cm}^{-1}$  e sugerem uma composição complexa com múltiplas ligações químicas. É possível perceber um pequeno pico em torno de 2900  $\text{cm}^{-1}$ , o que pode ser indicativo de estiramentos C-H, comuns em compostos orgânicos como alcanos, alcenos e aromáticos. Na Região de 2000 a 1500  $\text{cm}^{-1}$ , a absorvância é relativamente baixa e estável, sugerindo poucas interações moleculares significativas nesta faixa. Nesta região há um pico em torno de 1600  $\text{cm}^{-1}$  que pode indicar a presença de ligações C=O (carbonilas), comuns em cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos e ésteres. Na região abaixo de 1000  $\text{cm}^{-1}$ , a absorvância aumenta novamente com vários picos distintos, sugerindo a presença de estiramentos e dobramentos de ligações C-O, C-N, ou outras ligações específicas de grupos funcionais. Os espectros de infravermelho (IR) apresentados indicam que, independentemente da forma de produção, os carvões ativados apresentam características

típicas na sua superfície, incluindo grupos hidroxila, carbonila e outras funcionalidades oxigenadas. Esses grupos funcionais são altamente desejáveis, pois aumentam a afinidade do carvão ativado por espécies polares, facilitando interações químicas como ligações de hidrogênio e atrações eletrostáticas. Esses resultados estão em consonância com os achados de Hafizuddin *et al.* (2021), que demonstraram que a ativação com NaOH promove a introdução significativa de grupos carbonila e hidroxila na superfície do carvão ativado, melhorando diretamente sua eficiência de adsorção na remoção de diversos contaminantes, tanto orgânicos quanto inorgânicos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira (2016), que produziu carvão ativado a partir do pecíolo do babaçu, no qual encontrou banda larga de absorção em aproximadamente  $3500\text{ cm}^{-1}$  e sugere que pode ser atribuída à vibração de estiramento dos grupos O-H devido à água adsorvida na superfície do material. Enquanto, as bandas largas entre  $3670$  e  $2979\text{ cm}^{-1}$ , segundo o autor, podem indicar a presença de grupos de superfície, tais como o fenol e ácidos carboxílicos. Estas bandas ocorrem devido ao estiramento dos grupos O-H e aos ácidos carboxílicos, o que se assemelha ao resultado encontrado neste trabalho que teve um pico em torno de  $2900\text{ cm}^{-1}$ .

No espectro de infravermelho dos carvões ativados S-ICA e P-ICA impregnado com  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , representados na Figura 17, foi possível observar a presença de Grupos Hidroxila (-OH) na Região de  $3200 - 3600\text{ cm}^{-1}$ . Nesta região é possível sugerir também a presença de Grupos Fenólicos ( $-\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) com estiramento O-H (similar aos grupos hidroxila, mas a banda pode ser mais complexa e menos intensa). Grupos Carboxila com estiramento C=O na Região de  $1700 - 1725\text{ cm}^{-1}$  e estiramento O-H na Região de  $2500 - 3300\text{ cm}^{-1}$  (menos distinta, sobreposta com a banda de -OH).

O estiramento C=O produz uma banda forte e aguda, enquanto o estiramento O-H da carboxila, aparece como uma banda larga e menos intensa. Já os grupos Carbonila (C=O) aparece na Região de  $1650 - 1750\text{ cm}^{-1}$ . Os Grupos Éter (C-O-C) aparecem na região de  $1050 - 1150\text{ cm}^{-1}$  associada ao estiramento C-O de éteres, que é observada nesta faixa, podendo variar dependendo do tipo de éter e sua substituição. Foram observados, ainda, grupos fenólicos ( $-\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) com estiramento O-H na região de  $3200 - 3600\text{ cm}^{-1}$  (similar aos grupos hidroxila, mas a banda pode ser mais complexa e menos intensa), grupos aromáticos (C=C) na região de  $1400-1600\text{ cm}^{-1}$ , sendo bandas nesta região indicativas de estiramentos C=C dentro de anéis aromáticos. Algumas vezes é possível observar grupos fosfatos -  $1060\text{ cm}^{-1}$  atribuído às ligações ésteres de fosfato, causado pela ativação química com ácido fosfórico. Esses grupos funcionais indicam que todos os

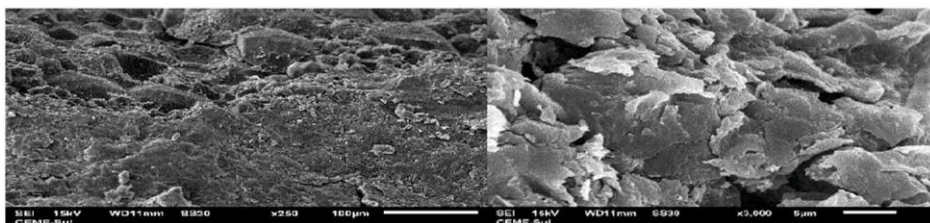
carvões ativados possuem oxigênio, com a presença de grupos que conferem características importantes como a capacidade de adsorção de substâncias polares e ácidas, típicas do carvão ativado.

### 5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

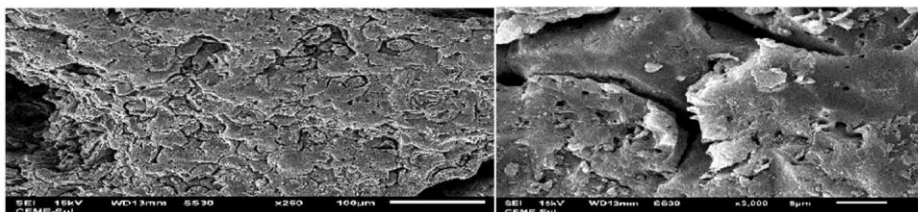
As micrografias apresentadas na Figura 15 se referem a biomassa (endocarpo de Bocaiuva) e aos diferentes tipos de carvões ativados.

Figura 15- Microscopia eletrônica de varredura referente a biomassa (endocarpo de Bocaiuva in natura) e aos diferentes tipos de carvão ativado.

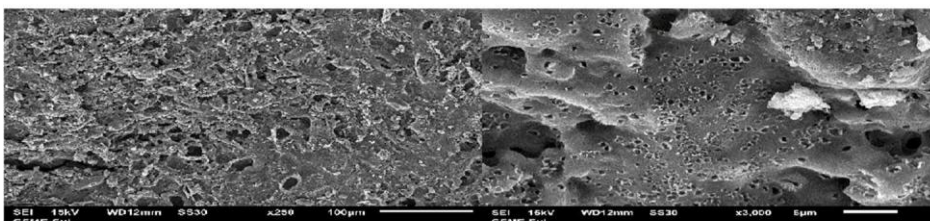
#### MEV BIOMASSA



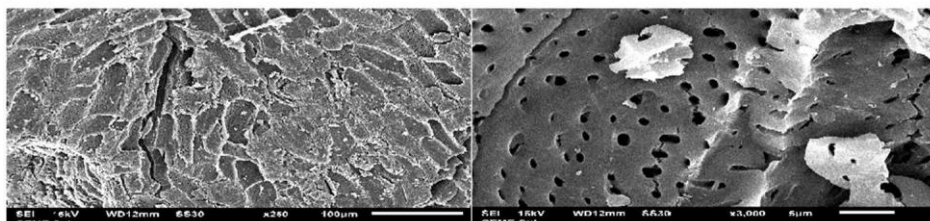
#### MEV P-CIB



#### MEV P-ICB



#### MEV S-ICA



(P-CIB, Pré-aquecimento + Carbonização e impregnação; (P-ICB, Pré-aquecimento + impregnação e Carbonização); (S-ICA, Endocarpo in natura + impregnação e Carbonização); (P-ICA, Pré-aquecimento + impregnação e Carbonização); (S-ICB, Endocarpo in natura + impregnação e Carbonização).

Fonte: Autor, 2025

### **MEV - ENDOCARPO**

A imagem mostra uma estrutura inicial porosa no endocarpo de Bocaiúva, aspecto essencial para processos de adsorção, pois fornece uma base morfológica favorável à posterior ativação química. A ampliação permite observar com mais detalhe as paredes dos poros e microfissuras, que podem atuar como pontos de nucleação para a abertura de canais porosos mais desenvolvidos durante a carbonização e impregnação com agentes químicos. Brandão *et al.* (2020) destacam que estruturas porosas iniciais contribuem para maior eficiência na ativação.

### **MEV - CARVÃO P-CIB**

A imagem do carvão ativado denominado P-CIB, obtido após pré-aquecimento e ativação com NaOH, revela uma porosidade incipiente, a ampliação de 3000x mostra uma superfície ainda compacta, sugerindo que a ativação não foi suficientemente intensa para promover ampla abertura de poros. Isso corrobora com Brandão *et al.* (2020), que relataram resistência da estrutura lignocelulósica em materiais similares quando o pré-aquecimento dificulta a penetração do agente ativante.

### **MEV - CARVÃO P-ICB**

A imagem mostra o carvão P-ICB, com ativação via NaOH, mas sem pré-aquecimento. A ampliação (3000x) revela microfissuras e poros irregulares, indicando que a estrutura interna foi significativamente alterada pelo processo. Conforme Sousa (2019), esse tipo de desorganização da matriz vegetal é característico de uma ativação alcalina, que rompe as ligações estruturais internas.

### **MEV-CARVÃO S-ICA**

Referente ao carvão ativado S-ICA, obtido sem pré-aquecimento e ativado com  $H_3PO_4$ , a imagem revela uma estrutura altamente porosa, com poros irregulares e interligados. Essa morfologia favorece a adsorção, pois aumenta a superfície específica do material. Brandão *et al.* (2020) relatam, que a ausência de pré-aquecimento permite que o ácido fosfórico atue diretamente sobre a matriz lignocelulósica, otimizando a criação de poros.

### **MEV - CARVÃO P-ICA**

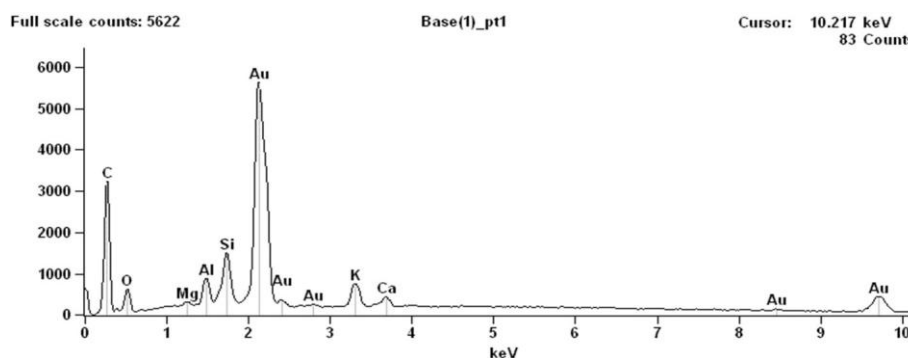
A imagem de P-ICA mostra um material também ativado com  $H_3PO_4$ , porém com etapa de pré-aquecimento. A porosidade é visivelmente menor, com estrutura mais ordenada e menor número de canais, sugerindo que o pré-aquecimento reduziu a efetividade da ativação. Sousa (2019) associa esse comportamento à formação de barreiras físicas que dificultam a difusão do agente químico.

De forma geral, a criação de poros, evidenciada em todas as amostras, é fator crítico para aumentar a área de contato com os adsorvatos. As imagens revelam que o tratamento químico foi eficaz em modificar a estrutura original dos materiais, formando poros de diferentes tamanhos e formas. Esse padrão está de acordo com o observado por Brandão *et al.* (2020), que relataram resultados semelhantes em carvões ativados de biomassa vegetal.

#### 5.1.4 Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras

A Figura 16 apresenta os resultados da microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), da biomassa antes da carbonização e ativação.

Figura 16- EDS do endocarpo de Bocaiuva (biomassa).



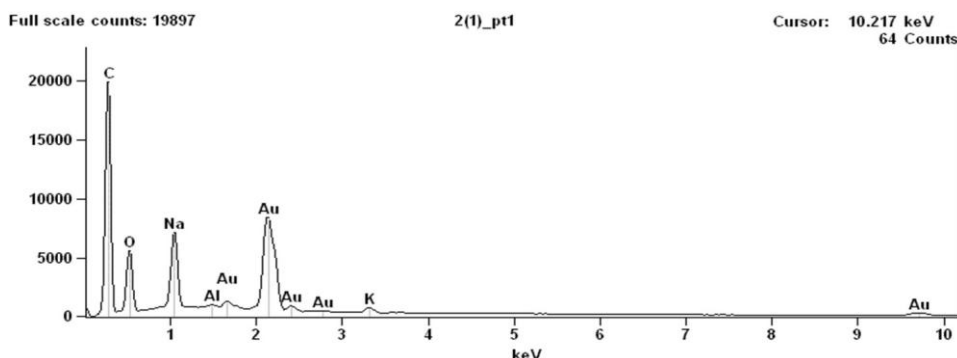
Fonte: Autor, 2025

Ao analisar a biomassa usada na produção de carvão ativado através do espectro de energia dispersiva de raios-X (EDS) foi possível observar a presença de diversos elementos como, C (Carbono), O (Oxigênio), Mg (Magnésio), Al (Alumínio), Si (Silício), K (Potássio), Ca (Cálcio) e N (nitrogênio). Observou-se que a biomassa utilizada contém uma quantidade significativa de carbono, o que é essencial para a produção de carvão ativado, uma vez que este será o principal constituinte do produto após a ativação. A análise EDS evidencia, que a amostra de biomassa possui uma composição elementar variada no qual elementos como Carbono, Cálcio e Nitrogênio são predominantes. A seguir são apresentados nas Figuras 17 a 22, os resultados para os carvões produzidos com diferentes agentes ativantes.

No carvão ativado P-CIB, os elementos identificados foram carbono (C) em alta concentração em relação aos demais elementos, indicando que o processo de ativação

com NaOH e carbonização foi eficaz na criação de uma matriz carbonosa rica, como mostra na Figura 17.

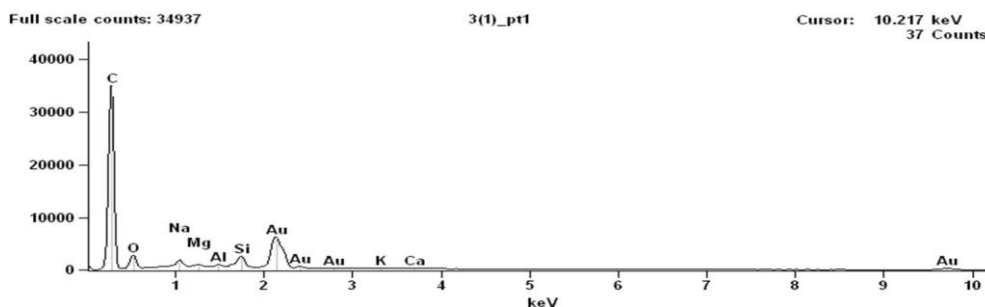
Figura 17- Análise EDS para carvão P-CIB.



Fonte: Autor, 2025

No carvão ativado P-ICB (Figura 18), que teve seu endocarpo pré-aquecido seguido da impregnação com NaOH e posterior carbonização, os elementos identificados foram Carbono (C) em concentração moderada, indicando uma eficiência de carbonização semelhante ao Carvão P-CIB, Oxigênio (O) com presença relevante, Sódio (Na) detectado devido ao uso de NaOH no processo de ativação e outros elementos em pequenas quantidades, como silício (Si), que podem ser resíduos do processo ou da matéria-prima.

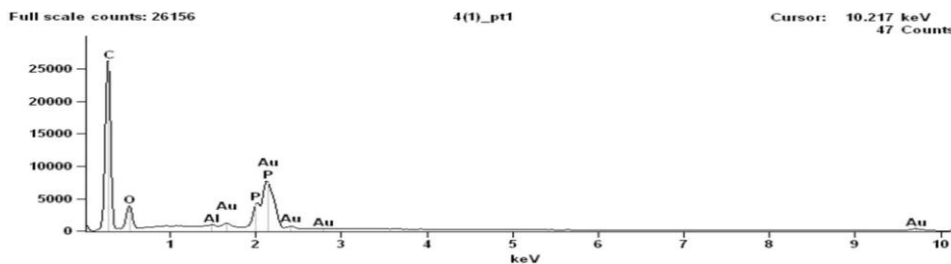
Figura 18- Análise EDS para carvão P-ICB.



Fonte: Autor, 2025

Já no carvão S-ICA, representado pela (Figura 19), observa-se que o carvão ativado contém principalmente carbono, o que é esperado. A presença de oxigênio também é comum, devido à natureza porosa do carvão ativado, que pode adsorver moléculas atmosféricas. Nota-se também a presença de outros elementos como alumínio e fósforo. Este espectro de EDS mostra que a amostra de carvão ativado contém predominantemente carbono, com a presença de outros elementos como oxigênio, alumínio e fósforo.

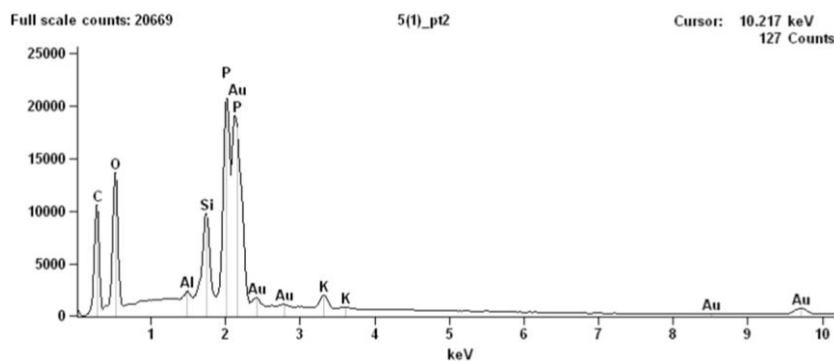
Figura 19- Análise EDS para carvão S-ICA.



Fonte: Autor, 2025

O espectro EDS para o carvão ativado P-ICA (Figura 21), revela que a amostra de carvão ativado é rica em carbono, porém o que a diferencia dos demais é a presença de vários outros elementos em grandes quantidades como O (Oxigênio), P (Fósforo) e Si (Silício), que podem ser provenientes de contaminações ou tratamentos específicos durante a preparação do material.

Figura 21- Análise EDS para carvão P-ICA.

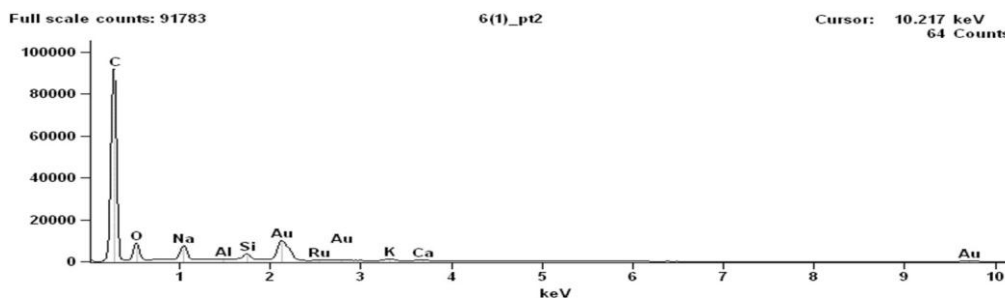


Fonte: Autor, 2025

No espectro EDS para o carvão ativado S-ICB (Figura 22), que teve seu endocarpo impregnado com NaOH e posteriormente carbonizado, os elementos identificados foram Carbono (C) em concentração adequada, com pico alto, semelhante aos outros carvões tratados, indicando uma boa formação de matriz carbonosa, Oxigênio (O) presente também em quantidades significativas, Sódio (Na) detectado devido ao processo de ativação com NaOH e outros elementos como silício (Si), possivelmente oriundos de impurezas ou do processo de ativação. A presença de altos teores de carbono em carvões ativados está diretamente relacionada à eficiência dos processos de carbonização e ativação, os quais promovem a eliminação de materiais voláteis e o enriquecimento da matriz carbonácea, favorecendo a capacidade adsortiva do material (Zeng *et al.*, 2018)

O aparecimento de quantidades de ouro nas análises de EDS também foi observado por Linhares; Marcílio & Melo (2016), que sugere que está relacionado ao procedimento de metalização das amostras com esse elemento para a realização da análise.

Figura 22- Análise EDS para carvão S-ICB.



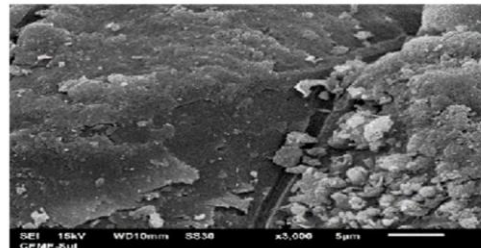
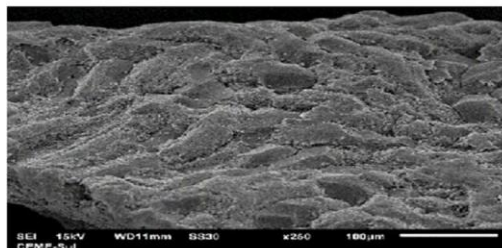
Fonte: Autor, 2025

### 5.1.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de carvões ativados em diferentes granulometrias

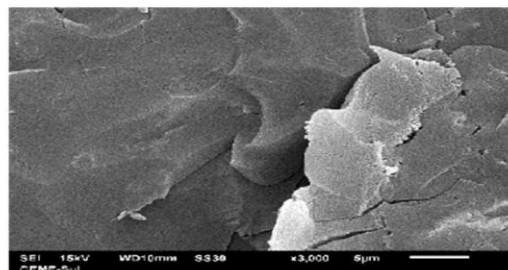
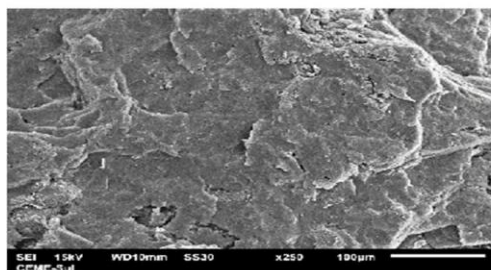
A interpretação das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para biomassa e carvões ativados com ampliações de 250x e 3000x, revela informações sobre as características estruturais dos materiais, especialmente em relação à formação de poros, textura superficial, e presença de estruturas específicas que impactam as propriedades de adsorção e reatividade do carvão ativado. Nas Figuras 23 abaixo, encontram-se as imagens com as informações do endocarpo de Bocaiuva e dos carvões ativados.

Figura 23- Microscopia eletrônica de varredura referente a biomassa (endocarpo de Bocaiuva in natura) e aos diferentes tipos de carvão ativado.

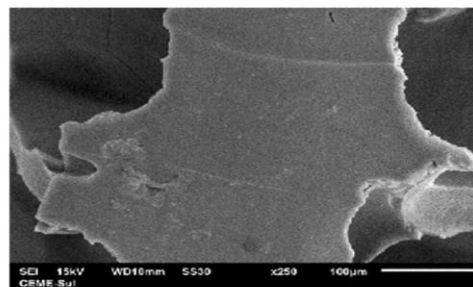
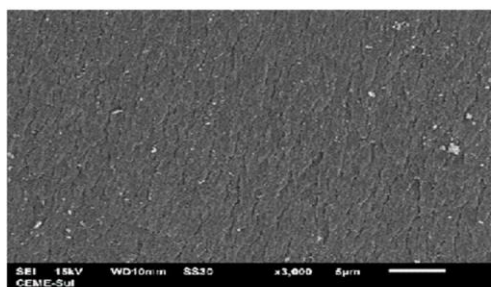
### MEV BIOMASSA



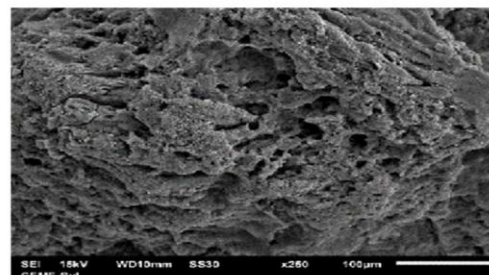
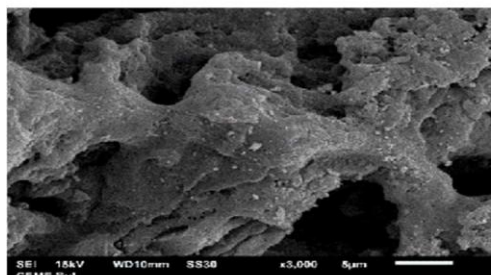
### MEV AC10



### MEV AC16



### MEV AC30



### MEV AC 70

Fonte: Autor, 2025

### MEV-BIOMASSA

Com ampliação de 250x da biomassa antes da carbonização exibi uma superfície lisa e organizada, sem evidência de grande porosidade. Também é possível observar pequenas fissuras na parede celular da biomassa com uma ampliação de 3000x.

### MEV-AC10

Com ampliação de 250x é possível observar na superfície a presença de médios poros (mesoporos) e fraturas são evidentes. Já com o aumento de ampliação para 3000x

é possível observar presença de estruturas menores, evidenciando a presença de microporos.

#### **MEV-AC16**

Com ampliação de 250x e possível observar a ativação química modificou a estrutura da biomassa, criando cavidades significativas. Já com ampliação de 3000x e possível observar formação de menores partículas que se aglomeraram na superfície, sugerindo presença de mesoporos.

#### **MEV-AC30**

Com ampliação de 250x no AC30 é possível observar uma superfície mais irregular em comparação ao AC10 e AC16, com fraturas e fendas profundas indicando um maior nível de carbonização. Também é possível observar um maior número de poros em comparação com os demais carvões. Com ampliação de 3000x é possível perceber a presença de macroporos, porém com predominância para os mesoporos.

#### **MEV-AC70**

Com a ampliação de 250x e possível observar grande quantidade de poros formadas. Na ampliação de 3000x é possível observar que microporos dominam a superfície, sugerindo uma área superficial significativamente ampliada.

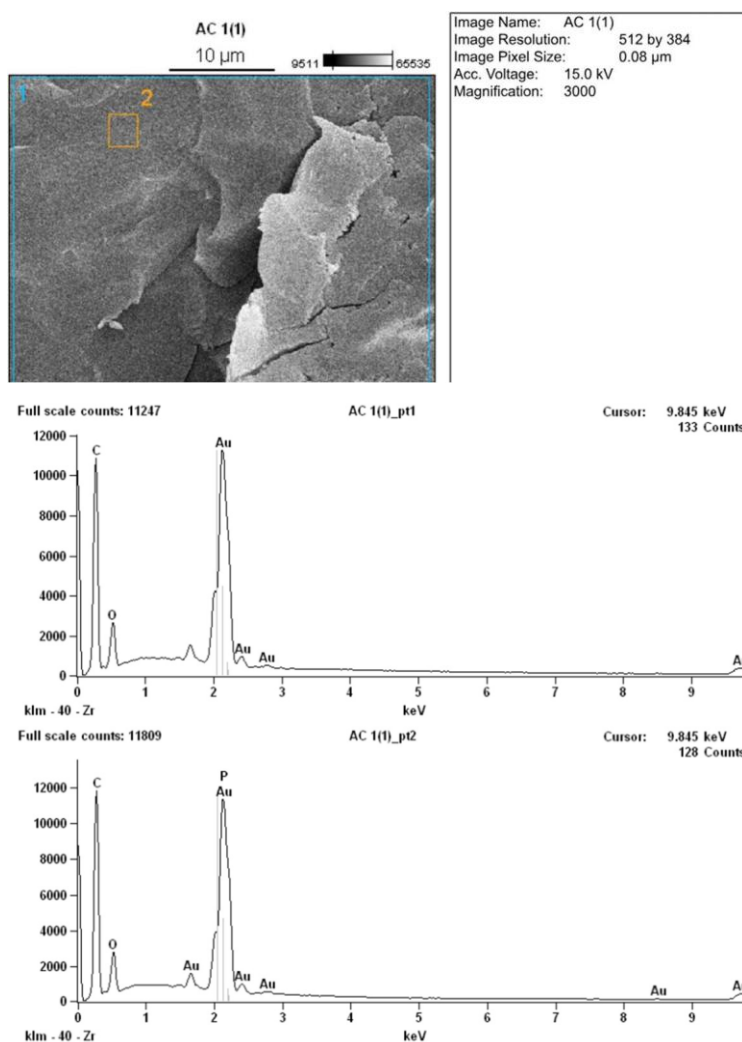
O aumento da porosidade e a transformação da estrutura superficial da biomassa para o carvão ativado demonstram como o processo de carbonização e ativação química ( $H_3PO_4$ ) modifica profundamente a morfologia do endocarpo. Nos carvões de AC10 a AC70, observa-se um aumento progressivo de porosidade e heterogeneidade, com AC30 também é possível observar um maior número de poros em comparação com os demais carvões.

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou uma evolução significativa na superfície do endocarpo de Bocaiúva após a ativação química com  $H_3PO_4$ , evidenciada pelo aumento progressivo da porosidade nas amostras AC10 a AC70. Este comportamento é consistente com os achados de Soares (2014), que observou um incremento na área superficial específica e na presença de micro e mesoporos em carvões ativados com  $H_3PO_4$ . Morais (2014) também destacou que a ativação com  $H_3PO_4$  resultou em estruturas porosas mais desenvolvidas, favorecendo a adsorção de corantes. Além disso, Ferreira (2023) demonstrou que carvões ativados com  $H_3PO_4$  apresentam morfologia adequada para a adsorção de alguns compostos, corroborando a eficácia desse agente ativante na modificação da estrutura porosa dos carvões.

### 5.1.6 Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvões ativados em diferentes granulometrias

A comparação entre as amostras mostra que AC10 possui maior nível de ativação devido ao aumento na relação Oxigênio e Carbono, enquanto AC16 e AC30 apresentam picos menores. Nas imagens abaixo, Figura 22 a 24 é possível observar nos gráficos os componentes presentes nas amostras dos diferentes tipos de carvão ativado.

Figura 24- Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvão ativado AC10 de endocarpo de Bocaiuva

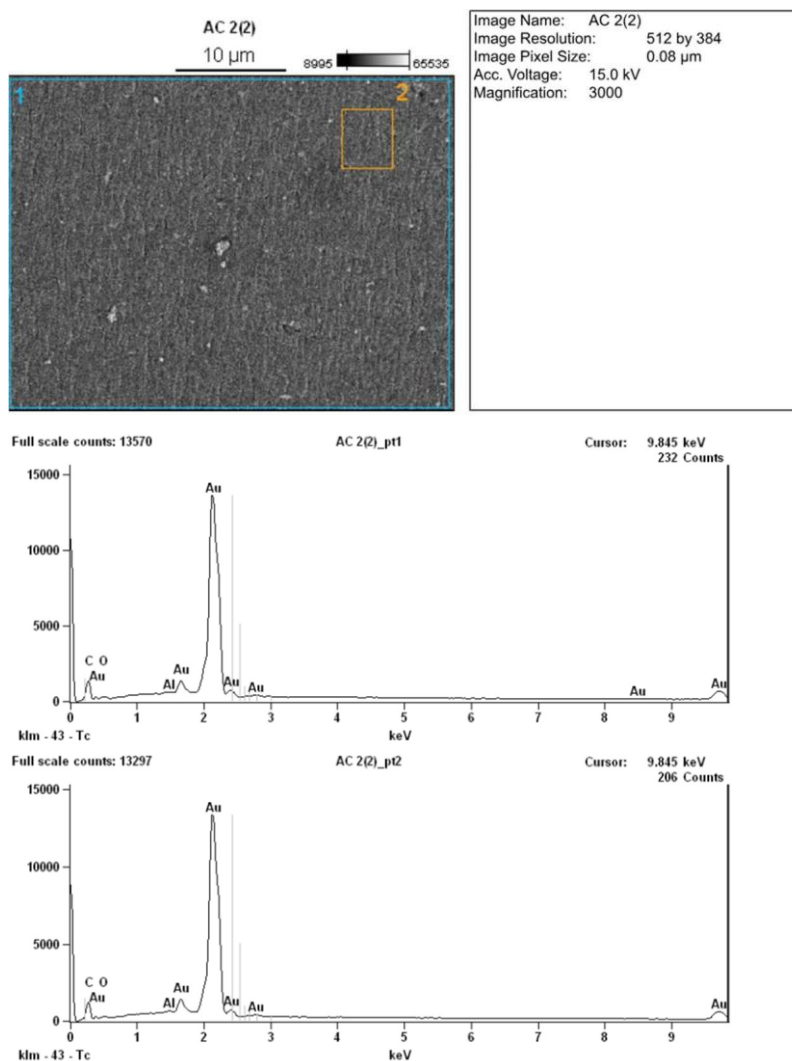


Fonte: Autor, 2025

Os resultados de AC10 Figura 24, mostram predominância de Carbono (C) e Oxigênio (O), característico de materiais carbonizados. Pequenas quantidades de outros elementos podem indicar resíduos da matéria-prima ou do processo de ativação.

Em AC16, Figura 25, é possível observar a presença do Ouro (Au) como elemento predominante, com pouca presença de (C) carbono e (O) oxigênio.

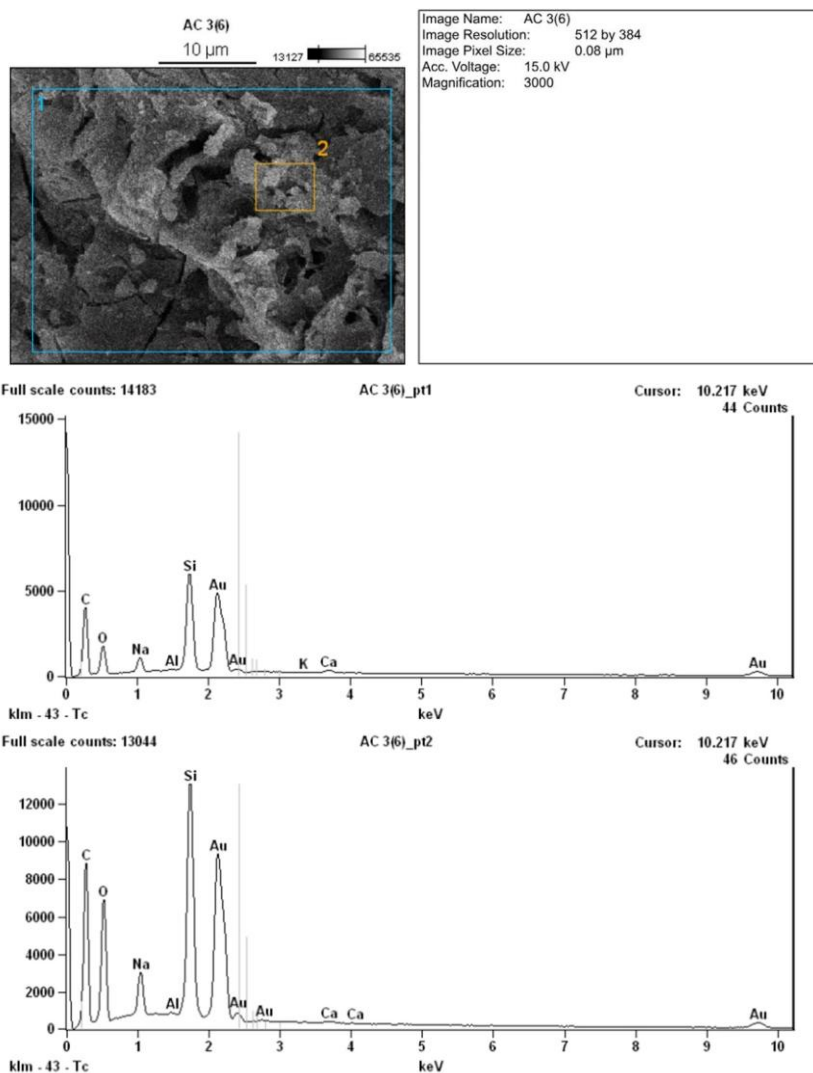
Figura 25- Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvão ativado AC16 de endocarpo de Bocaiuva



Fonte: Autor, 2025

Já na amostra de AC30, Figura 26, é possível observar a presença de Carbono (C) e o oxigênio em alta proporção, porém em menor quantidade em relação a mostra de AC10. É possível observar também que presença de sílica (Si) é predominante na amostra de AC30.

Figura 26- Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) das amostras de carvão ativado AC30 de endocarpo de Bocaiuva



Fonte: Autor, 2025

Os resultados indicam que o Carbono (C) e o Oxigênio (O) são os principais constituintes das amostras do carvão AC10 com razoável quantidade na amostra do carvão AC30 em diferentes proporções. Os resultados de EDS mostraram a predominância de C e O em AC10 e AC30, com presença significativa de silício em AC30.

### 5.1.7 Caracterização textural dos carvões ativados de endocarpo de Bocaiuva

#### 5.1.7.1 Resultados das análises texturais dos carvões ativados em diferentes granulometrias

Para as análises texturais dos carvões produzidos foram utilizadas as mesmas metodologias descritas por Lissaneddine *et al.* (2021). Com relação a análise dos dados

das amostras na Área BET a amostra de AC30 possui a maior área, podendo ser considerada a melhor entre as amostras. Enquanto é possível observar na Amostras P-CIB, P-ICB e S-ICB têm áreas muito baixas, em comparação com as demais amostras. Com relação a área Langmuir, a amostra AC30 também obteve maior área com 3128,73 m<sup>2</sup>/g o que destaca uma alta eficiência para adsorção. As amostras com menor Área Langmuir foi a S-ICB com apenas 0,07 m<sup>2</sup>/g, refletindo a baixa área superficial total e limitações para adsorção. As amostras P-CIB e P-ICB também têm áreas Langmuir baixas, tornando as de baixa eficiência, conforme Tabela 7

Tabela 4- Resultados das análises texturais dos carvões com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e diferentes granulometrias

Amostra	Área BET (m <sup>2</sup> /g)	Área Langmuir (m <sup>2</sup> /g)	Volume Total de Poros (cm <sup>3</sup> /g)	Volume de Microporos (t-Plot) (cm <sup>3</sup> /g)	Diâmetro Médio BJH (nm)
P-CIB	3,00	4,31	0,00051	0,00231	Não calculado
P-ICB	3,92	5,84	0,00479	0,00154	14,68
S-ICB	0,06	0,07	0,00148	Não calculado	104,16
S-ICA	155,49	231,16	0,0841	0,06387	2,42
P-ICA	108,20	163,84	0,0612	0,02571	2,41
AC10	1590,18	2503,39	1,0727	0,0470	2,86
AC16	1862,94	2933,62	1,1729	0,04085	2,61
AC30	1978,63	3128,73	1,2479	0,0038	2,66
AC70	1086,60	1706,30	0,6757	0,03271	25,74

Fonte: Autor, 2025

Sobre o volume total de poros as amostras AC10, AC16 e AC30 apresentam os maiores volumes de poros, com valores acima de 1 cm<sup>3</sup>/g. As amostras P-CIB, S-ICB e AC70 têm volumes extremamente baixos. Quando se observa o volume de microporos (t-Plot) é possível perceber que a amostra S-ICA possui o maior volume de microporos (0,06387 cm<sup>3</sup>/g). A amostra AC30, apresenta o menor volume de microporos, refletindo sua natureza predominantemente mesoporosa. Sobre o diâmetro médio BJH a amostras com diâmetro médio entre 2 e 3nm (S-ICA, P-ICA, AC10 e AC16) são classificadas como mesoporosas, ideais para transporte de moléculas médias. Amostras P-ICB e S-ICB têm diâmetros muito maiores, indicando predominância de macroporos.

Os diâmetros médios de poros, mostrados pelos dados BJH, destacam a diversidade de tamanhos de poros entre as amostras. As análises texturais indicam que

AC30 possui área superficial e volume de poros superiores, adequados para adsorção de moléculas grandes. Comparativamente, estudos recentes (Wang *et al.*, 2023) confirmam que carvões ativados quimicamente com alta área BET têm melhor desempenho na remoção de corantes e metais pesados.

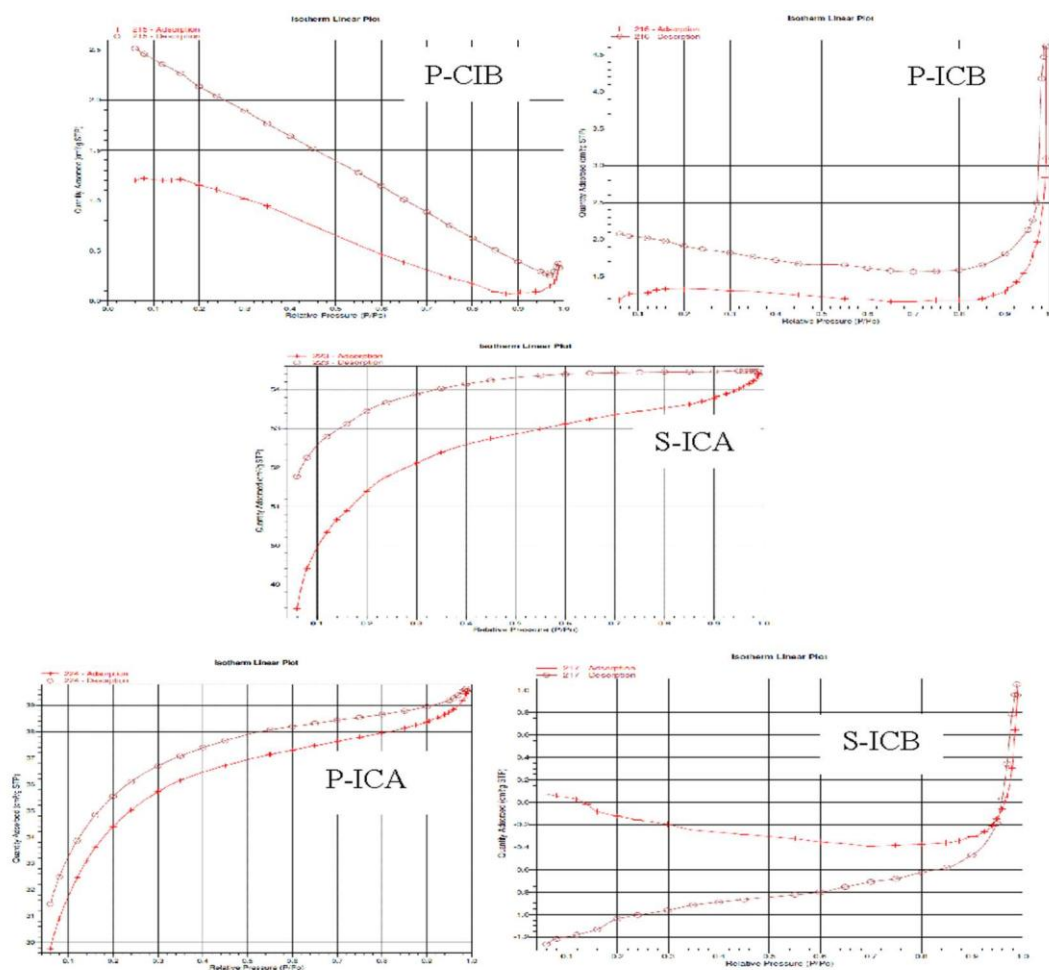
Com relação a área microporosa (t-Plot) a amostra S-ICA se destaca com a maior área microporosa (119,46 m<sup>2</sup>/g), sugerindo alta eficiência para adsorção em microporos. A amostra AC30 praticamente não possui microporos, sendo considerada insignificante, confirmando sua adequação para adsorção de moléculas maiores. Com relação as aplicações as amostras (S-ICA, P-ICA, AC10, AC16, AC30) mesoporosas com áreas BET e Langmuir altas são versáteis para moléculas médias a grandes. Já as amostras (S-ICA, AC70) possuem áreas microporosas com moderação, podendo ser ideal para a adsorção de moléculas menores.

De acordo com Heidarinejad *et al.*, (2020), durante o processo de ativação, a reação do ácido H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> com o precursor, à base de carbono ativo leva à formação de produtos na forma de partículas ou substâncias voláteis, que como resultado criam poros ou aumentam o número de poros nos locais anteriormente ocupados por este material. O H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> também leva à expansão de poros microporosos e mesoporosos no carvão ativado, então, o carvão ativado produzido a partir de resíduos de lignocelulose por meio da ativação com ácido fosfórico é poroso. O autor afirma que, na ativação química, o ácido fosfórico é usado para ativar materiais lignocelulósicos que não foram carbonizados anteriormente, ou seja, que não tenham sofrido nenhum tratamento térmico ainda.

#### 5.1.7.2 Isotermas Adsorção/Dessorção

Na Figura 27 abaixo é possível observar as informações dos diferentes tipos de carvões ativados com agente NaOH e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> através de gráficos de isotermas.

Figura 27- Gráficos de isoterma de Adsorção/Dessorção dos diferentes de carvões.



(P-CIB, Pré-aquecimento + Carbonização e impregnação; (P-ICB, Pré-aquecimento + impregnação e Carbonização); (S-ICA, Endocarpo in natura + impregnação e Carbonização); (P-ICA, Pré-aquecimento + impregnação e Carbonização); (S-ICB, Endocarpo in natura + impregnação e Carbonização). \*Erro na análise.

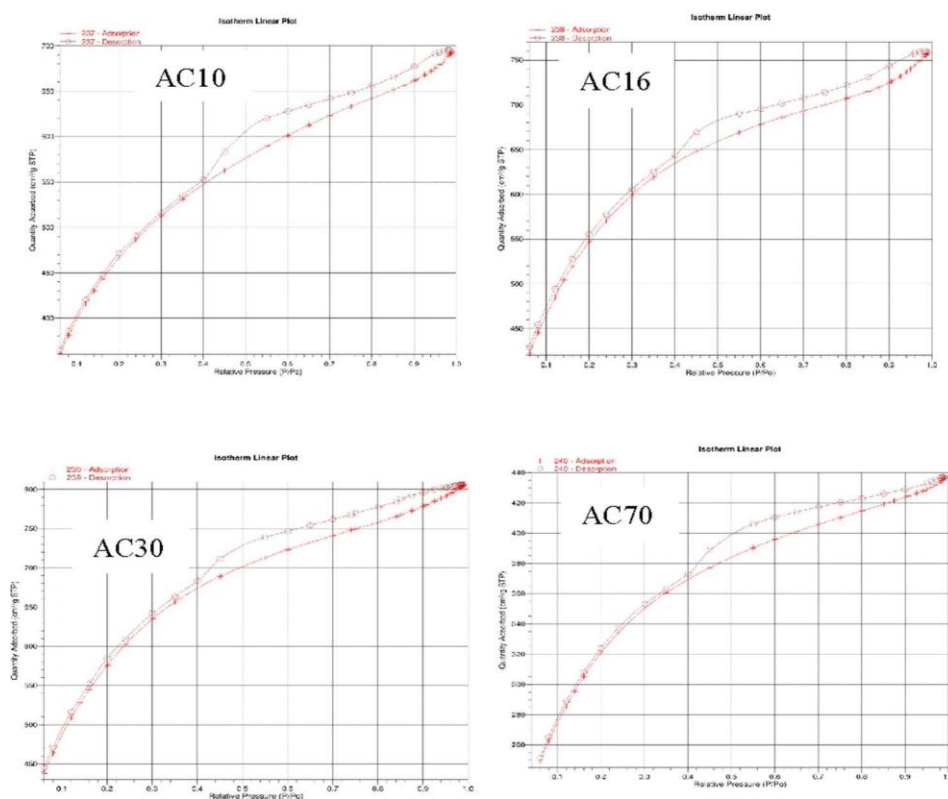
Fonte: Autor, 2025

As isotermas de adsorção/dessorção (figura 28) dos carvões ativados P-CIB, P-ICB e S-ICB apresentam formato do tipo I com histerese, indicando a presença predominante de mesoporos (2–50nm), conforme descrito por Moraes *et al.* (2019). A histerese observada está associada à condensação capilar nos poros, evidenciando estruturas mesoporosas.

Entre esses, o carvão P-CIB apresenta histerese mais pronunciada, sugerindo maior quantidade de mesoporos e capacidade de adsorção inicial superior. Já os carvões P-ICB e S-ICB exibem histerese menos acentuada, indicando menor mesoporosidade e desempenho de adsorção inicial reduzido em comparação ao P-CIB, com o S-ICB mostrando leve melhoria sobre o P-ICB.

Para os carvões ativados com  $H_3PO_4$  (S-ICA e P-ICA), as isotermas também são do tipo I com presença de histerese, confirmando a existência de mesoporos. À medida que a pressão relativa aumenta, observa-se um aumento na quantidade de gás adsorvido, caracterizando o preenchimento dos poros por capilaridade. A curva de dessorção difere da de adsorção, formando um loop de histerese, típico de materiais mesoporosos com efeitos capilares.

Figura 28- Gráficos de isoterma de Adsorção/Dessorção dos carvões ativados com  $H_3PO_4$  em diferentes granulometrias



Fonte: Autor, 2025

As isotermas de adsorção indicam a combinação de microporos e mesoporos, com destaque para estruturas microporosas nas amostras de AC10 e AC16, enquanto nas amostras de AC30 e AC70 pode se sugerir uma maior presença de mesoporos. O gráfico BET válida a área superficial das amostras, onde a amostra de AC30 se destaca por sua alta área superficial como pode ser observado na Tabela 4 acima.

## 5.2 Análise dos dados experimentais obtidos no teste de adsorção com azul de metileno com carvão produzido em diferentes granulometrias

Os testes de adsorção com azul de metileno evidenciaram que o carvão ativado AC10, produzido a partir do endocarpo de Bocaiúva, apresentou a melhor performance entre os adsorventes testados, com taxa de remoção atingindo 100% sob condições experimentais otimizadas (90 minutos de contato, 0,20 g de adsorvente e 6,02 mg/L de corante) (ensaio 14).

Esse desempenho pode ser atribuído não apenas à área superficial específica (1590,18 m<sup>2</sup>/g), mas também à acessibilidade e distribuição dos poros, fatores cruciais para a adsorção eficaz de moléculas orgânicas, conforme sugerido por Saleem *et al.* (2019) e corroborado por Foo e Hameed (2010), que destacam a importância da estrutura porosa na cinética de adsorção.

Embora AC16 e AC30 tenham exibido maiores áreas BET (1862,94 m<sup>2</sup>/g e 1978,63 m<sup>2</sup>/g, respectivamente), a eficiência prática do AC10 destaca que a estrutura interna e a estabilidade química têm influência significativa. Conforme discutido por Soffian *et al.* (2022), a presença de microporos bem distribuídos pode aumentar a difusão intra partícula, favorecendo a adsorção mesmo com área superficial menor.

Além disso, o teste com endocarpo in natura revelou remoções variando entre 17,27% e 85,80%, o que destaca a presença de grupos funcionais ativos mesmo na ausência de ativação química. Estudos como os de Ahmad; Ahmad; Bello (2014) sustentam que materiais lignocelulósicos podem apresentar capacidade adsortiva inicial relevante devido à presença de hidroxilas e carboxilas, atuando como sítios de ligação.

A instabilidade química observada com o uso do endocarpo in natura em algumas soluções, com liberação de coloração, representa uma limitação prática, que poderá comprometer aplicações industriais, conforme alertado por Bronzeado; Ahmad; Hameed, (2015), que ressaltam a importância da estabilidade físico-química em materiais adsorventes.

Tabela 5- Resultados obtidos nos testes de adsorção com azul de metileno feito com os quatro tipos de carvão ativado com  $H_3PO_4$  e diferentes granulometrias e endocarpo in natura.

Ensaio	t(min)	m(g)	Conc (mg/L)	Remoção %				
				AC 10	AC16	AC30	AC70	Endocarpo in natura
1	60	0,1	2,0	81,261	81,007	61,465	74,067	60,531
2	120	0,1	2,0	70,180	86,041	74,462	56,699	71,188
3	60	0,3	2,0	67,207	71,579	57,849	52,153	51,896
4	120	0,3	2,0	80,495	57,849	33,272	18,134	17,270
5	60	0,1	5,0	74,795	71,314	89,234	91,665	80,804
6	120	0,1	5,0	84,147	92,381	89,234	86,772	85,807
7	60	0,3	5,0	86,770	90,876	82,014	81,570	77,865
8	120	0,3	5,0	96,487	90,876	83,166	60,801	69,940
9	39,55	0,2	3,5	94,602	93,028	80,743	87,751	76,159
10	140,4	0,2	3,5	98,511	90,016	85,458	75,601	70,732
11	90	0,03	3,5	88,487	82,718	89,463	95,562	81,138
12	90	0,37	3,5	98,963	88,307	77,819	77,560	66,992
13	90	0,2	0,98	96,521	50,517	22,295	24,085	22,605
14	90	0,2	6,02	100,00	96,230	90,824	82,030	83,354
15	90	0,2	3,5	100,00	90,450	84,484	65,014	73,656
16	90	0,2	3,5	98,963	90,450	84,905	33,300	79,900
17	90	0,2	3,5	97,208	92,594	84,905	68,931	77,397

t (tempo de contato); m (massa de carvão), Conc (concentração de azul de metileno).

Fonte: Autor, 2025

A análise de variância (ANOVA) reforçou esses achados ao demonstrar um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 94,61% para o modelo do endocarpo in natura, seguido por 93,91% para AC30, 89,45% para AC16 e 84,45% para AC70. Tais valores evidenciam a boa adequação dos modelos estatísticos para prever a eficiência de remoção, estando em conformidade com os critérios estabelecidos por Halim e Sarbon (2017), que consideram que para que haja um bom ajuste do modelo, o  $R^2$  deverá apresentar um valor maior que 0,80, o que foi observado no estudo. Por outro lado, o AC10 apresentou  $R^2$  de apenas 50,95%, sugerindo a necessidade de ajustes no modelo de regressão para esse adsorvente específico.

Tabela 6- Análise de variância (ANOVA) do endocarpo de Bocaiuva e dos diferentes carvões ativados.

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	Fcalc	Modelo	R <sup>2</sup>
<b>AC10</b>						
Regressão	5943,9	9	60,4	13,7	$Y_1=77,10-2,64X_1-1,65X_1^2-7,70X_2-1,43X_2^2+15,79X_3-8,89X_3^2-7,28X_1X_2+2,63X_1X_3+5,47X_2X_3$	94,61%
Resíduos	338,6	7	8,4			
Falta de ajuste	318,8	5	63,8	6,5		
Erro puro	19,7	2	9,9			
<b>Total</b>	6282,4	16				
<b>AC16</b>						
Regressão	985,4	9	109,5	0,8	$Y_1=99,75+2,04X_1-4,29X_1^2+2,80X_2-5,29X_2^2+3,58X_3-3,68X_3^2+3,09X_1X_2+2,11X_1X_3+3,51X_2X_3$	50,95%
Resíduos	948,7	7	35,5			
Falta de ajuste	944,7	5	88,9	94,9		
Erro puro	4,0	2	2,0			
<b>Total</b>	1934,1	16				
Fonte de variação	SQ	GL	QM	Fcalc	Modelo	R <sup>2</sup>
Regressão	2445,9	9	271,8	6,6	$Y_1=91,34+0,53X_1-0,49X_1^2-0,74X_2-2,61X_2^2+9,22X_3-6,90X_3^2-4,98X_1X_2+3,72X_1X_3+6,96X_2X_3$	89,45%
Resíduos	288,6	7	1,2			
Falta de ajuste	285,5	5	57,1	37,3		
Erro puro	3,1	2	1,5			
<b>Total</b>	2734,5	16				
<b>AC30</b>						
Regressão	6022,6	9	669,2	12,0	$Y_1=84,92-0,18x_1-1,14x_1^2-5,69x_2-0,95x_2^2+16,98x_3-10,52x_3^2-4,55x_1x_2+1,59x_1x_3+3,94x_2x_3$	93,91%
Resíduos	390,6	7	5,8			
Falta de ajuste	390,4	5	8,1	1321,7		
Erro puro	0,1	2	0,1			
<b>Total</b>	6413,1	16				
<b>AC70</b>						
Regressão	7308,7	9	12,1	4,2	$Y_1=56,37-7,14x_1+7,03x_1^2-9,29x_2+8,76x_2^2+15,90x_3-3,09x_3^2$	84,45%
Resíduos	1345,3	7	92,2			
Falta de ajuste	581,8	5	16,4	0,3		
Erro puro	763,6	2	81,8			
<b>Total</b>	8654,1	16				

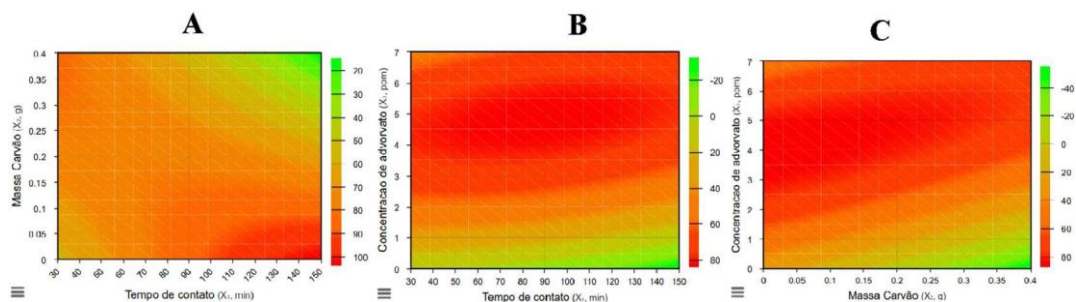
					$4,07x_1x_2+3,22$ $x_1x_3+3,05x_2x_3$
--	--	--	--	--	--

SQ=Soma dos quadrados; GL=Graus de liberdade; QM= Quadrado médio

Fonte: Autor, 2025

O comportamento dos carvões ativados frente às variáveis independentes — tempo de contato ( $X_1$ ), massa do adsorvente ( $X_2$ ) e concentração do adsorvato ( $X_3$ ) — revelou que  $X_2$  e  $X_3$  foram determinantes em quase todos os sistemas testados. Tal tendência também foi observada por Bezerra *et al.* (2008), ao afirmarem que a massa do adsorvente e a concentração do adsorvato influenciam significativamente a capacidade adsorvente do material. Para melhor visualização dos efeitos das variáveis foram obtidos os gráficos de superfície de resposta que estão apresentados nas Figuras 29 a 32.

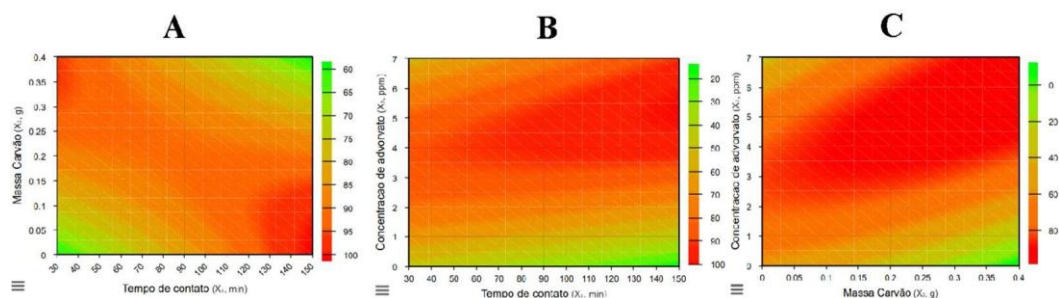
Figura 29- Gráficos gerados no experimento para endocarpo de Bocaiuva.



Legenda:  $X_1$ = Tempo de contato (min);  $X_2$ = Massa de carvão ativado (g);  $X_3$ = Concentração do adsorvato  
Interações: A –  $X_1 \times X_2$ ; B –  $X_1 \times X_3$ ; C –  $X_2 \times X_3$ . Fonte: Autor, 2025

O endocarpo in natura apresentou capacidade de adsorção, com remoções entre 17,270% e 85,807%, em comparação aos carvões ativados que atingiram até 100%. As interações entre tempo de contato e concentração e entre massa e concentração foram essenciais para alcançar a máxima remoção. Isso mostra que o material possui atividade adsorvente mesmo sem ativação química, porém de forma mais limitada.

Figura 30 - Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento para carvão AC16 de endocarpo de Bocaiuva.



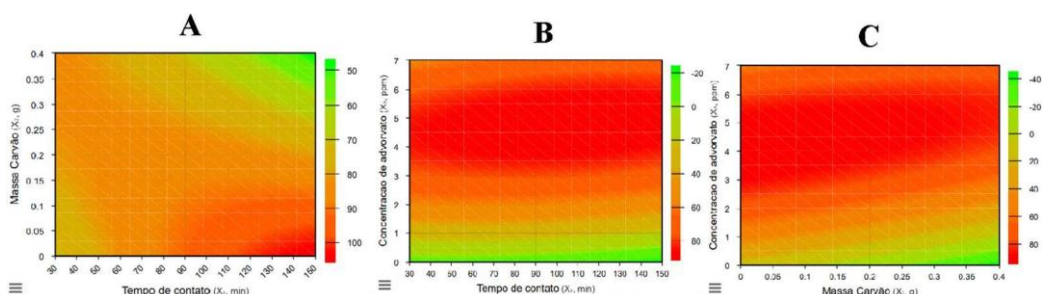
Legenda:  $X_1$ = Tempo de contato (min);  $X_2$ = Massa de carvão ativado (g);  $X_3$ = Concentração do adsorvato. Interações: A –  $X_1 \times X_2$ ; B –  $X_1 \times X_3$ ; C –  $X_2 \times X_3$ . Fonte: Autor, 2025

Na Figura 30 está o gráfico de contorno para carvão AC16 de endocarpo de Bocaiuva, com base nas variáveis analisadas: tempo de contato ( $X_1$ ), massa do adsorvente ( $X_2$ ) e concentração da solução ( $X_3$ ). O carvão ativado AC16 apresenta desempenho eficiente em baixas concentrações de adsorvato, com valores de remoção entre 57,849% e 96,230%, dependendo das variáveis combinadas.

A variável massa de carvão ativado ( $X_2$ ) se destaca como a mais influente, especialmente quando combinada com altas concentrações do adsorvato ( $X_3$ ). Já o tempo ( $X_1$ ) apresentou menor variação na resposta, sugerindo que, para o carvão AC16, a massa e a concentração são variáveis mais significativas, enquanto o tempo é menos determinante.

Na Figura 31 estão os gráficos de contorno para carvão AC30 de endocarpo de Bocaiuva, com base nas variáveis analisadas: tempo de contato ( $X_1$ ), massa do adsorvente ( $X_2$ ) e concentração da solução ( $X_3$ ).

Figura 31- Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento para carvão AC30 de endocarpo de Bocaiuva.



Legenda:  $X_1$ = Tempo de contato (min);  $X_2$ = Massa de carvão ativado (g);  $X_3$ = Concentração do adsorvato. Interações: A –  $X_1 \times X_2$ ; B –  $X_1 \times X_3$ ; C –  $X_2 \times X_3$ . Fonte: Autor, 2025

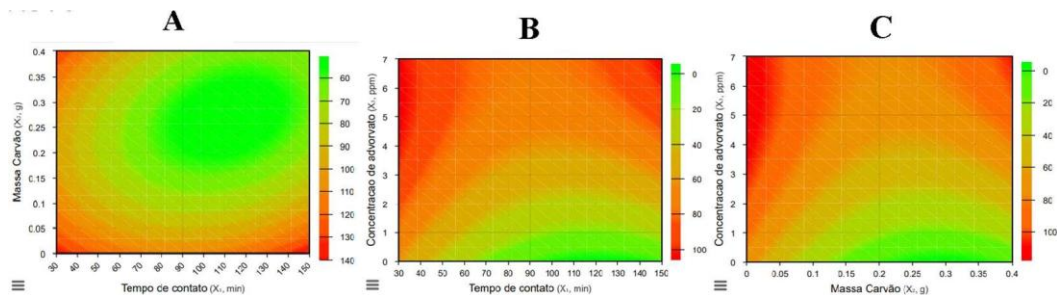
O carvão AC30 apresentou remoção máxima de 90,824%, com desempenho equilibrado na concentração e massa moderada. O tempo de contato ideal está entre 90 a 120 minutos.

Todas as variáveis influenciaram positivamente, mas a concentração do adsorvato ( $X_3$ ) teve efeito dominante, seguida da massa de carvão ativado ( $X_2$ ). A interação entre concentração e tempo também foi expressiva. Assim, neste sistema, todas as variáveis foram significativas, com destaque para  $X_3$  (concentração).

Abaixo, é possível observar os resultados do coeficiente de regressão para o carvão AC70 produzido a partir do endocarpo de Bocaiuva.

Nas Figuras 30 estão os gráficos de contorno para carvão AC70 de endocarpo de Bocaiuva, com base nas variáveis analisadas: tempo de contato ( $X_1$ ), massa do adsorvente ( $X_2$ ) e concentração da solução ( $X_3$ ).

Figura 32 - Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento para carvão AC70 de endocarpo de Bocaiuva.



Legenda:  $X_1$ = Tempo de contato (min);  $X_2$ = Massa de carvão ativado (g);  $X_3$ = Concentração do adsorvato. Interações: A –  $X_1 \times X_2$ ; B –  $X_1 \times X_3$ ; C –  $X_2 \times X_3$ . Fonte: Autor, 2025

O carvão AC70 apresentou uma remoção máxima de 95,562% sob condições experimentais específicas. O desempenho ótimo foi alcançado com uma massa de adsorvente de apenas 0,03 g, tempo de contato de 90 minutos, e concentração adequada do adsorvato. Esses resultados indicam uma alta eficiência do carvão ativado AC70 mesmo com baixas dosagens de adsorvente e tempo relativamente curto, o que o torna altamente vantajoso em termos econômicos e operacionais.

As variáveis tempo de contato ( $X_1$ ) e concentração do adsorvato ( $X_3$ ) demonstram influência significativa, especialmente quando aumentadas em conjunto. As variáveis  $X_2$  Massa de carvão ativado e concentração do adsorvato ( $X_3$ ), embora relevante, teve influência mais moderada em comparação às demais. Dessa forma, para o carvão AC70,

as variáveis  $X_1$  e  $X_3$  foram significativas, sendo responsáveis pelas melhores condições de adsorção observadas.

Em síntese, os resultados reforçam a viabilidade do uso de carvão ativado de Bocaiúva, principalmente o AC10, para a remoção de contaminantes orgânicos como o azul de metileno em soluções aquosas, sendo a sua escolha justificada não apenas pelos percentuais de remoção, mas também pela estabilidade e previsibilidade do desempenho sob diferentes condições experimentais.

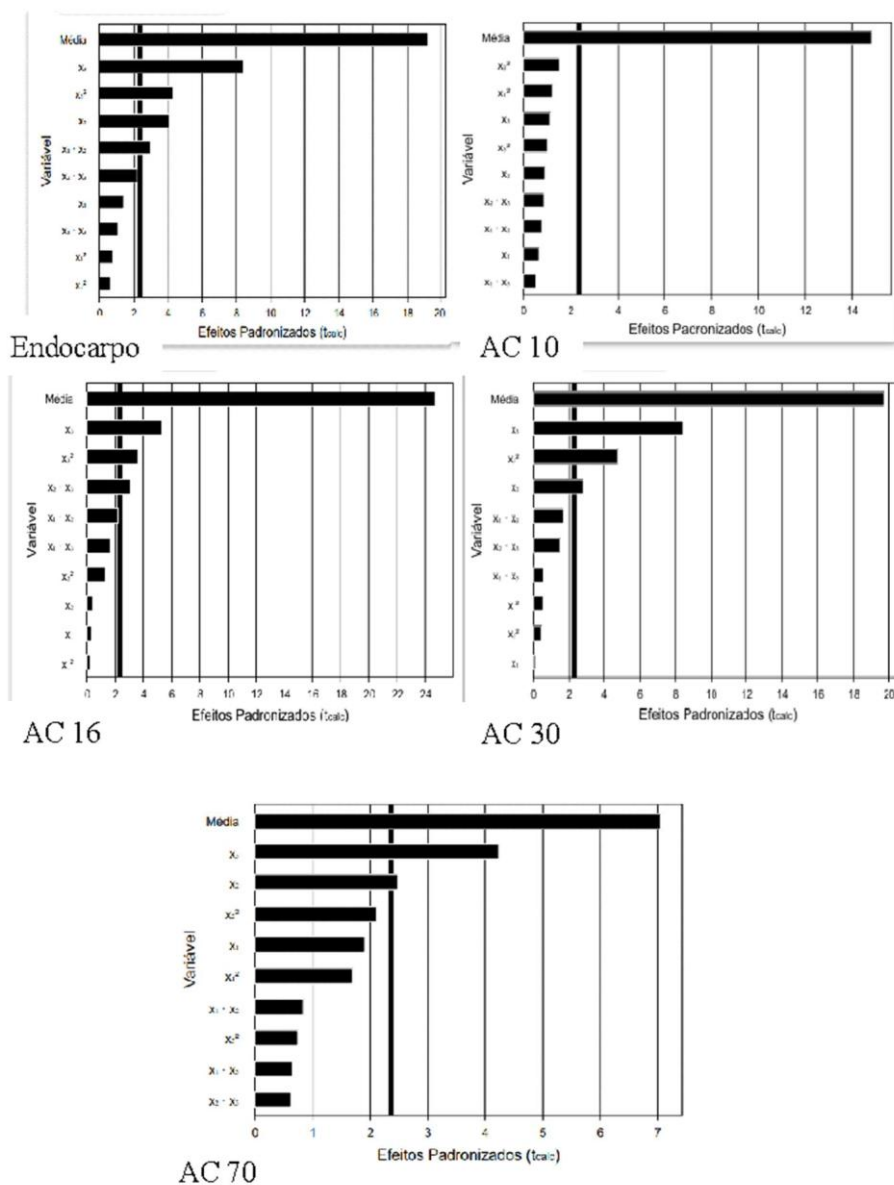
#### 5.2.1 Resultados das Análises de variância do modelo de regressão para testes de adsorção com o endocarpo in natura e os diferentes tipos de carvão ativado com azul de metileno

A partir das equações dadas pelo modelo de regressão foram obtidos os valores preditos de adsorção para cada tipo de adsorvente. Ao verificar os valores experimentais preditos para os diferentes adsorventes foi possível observar que para o endocarpo da Bocaiúva, para o carvão AC16, para AC30 e AC70 que os resíduos se encontram bastante próximo a linha de tendência, indicando que o modelo ajustou se de forma satisfatória. Já para o carvão AC10, o modelo se ajustou de forma relativamente baixa.

Os de gráficos Pareto, mostram as variáveis codificadas em ordem de importância para o modelo de regressão. As barras escuras na horizontal representam a contribuição de cada efeito sobre a eficiência de remoção dos adsorventes, indicando quais influenciam mais entre si no experimento.

Na Figura 33 abaixo é possível observar o gráfico Pareto, mostrando as variáveis codificadas em ordem de importância para o modelo de regressão do endocarpo da Bocaiúva e para os diferentes tipos de carvão.

Figura 33– Gráfico de Pareto para endocarpo e para os carvões ativados de endocarpo de Bocaiúva em diferentes granulometrias.



Legenda:  $X_1$ = Tempo de contato (min);  $X_2$ = Massa de carvão ativado (g) e  $X_3$ = Concentração do adsorvato. Fonte: Autor, 2025

### 5.3 Resultados das análises do teste de adsorção com o carvão AC10

Após avaliação das características físicas dos carvões ativados em diferentes granulometrias e dos ensaios de adsorção com azul de metileno, foi selecionado o carvão AC10 para os ensaios de adsorção com os diferentes compostos.

#### 5.3.1 Resultados das análises do teste de adsorção do ácido gálico com o carvão AC10

De acordo com os resultados o maior percentual de remoção conseguido foi de 99,21% com tempo de contato de 90 minutos e 2,0g de carvão e em concentração de 1200

mg/L (ensaio 8), e o menor de 69,02% com tempo de contato de 60 minutos 2,0g de carvão e em concentração de 200 mg/L (ensaio 3) de ácido gálico (Tabela 7).

Tabela 7- Resultados obtidos nos testes de adsorção do carvão AC10 com ácido gálico

Ensaio	Tempo (Min)	Massa (g)	Concentração (mg/L)	Percentual de remoção (%)
1	60	0,50	200	95,91
2	90	0,50	200	96,70
3	60	2	200	69,02
4	90	2	200	96,63
5	60	0,50	1200	86,18
6	90	0,50	1200	95,51
7	60	2	1200	98,62
8	90	2	1200	99,21
9	50	1,25	700	98,62
10	100	1,25	700	98,66
11	75	0	700	0,00
12	75	2,51	700	98,45
13	75	1,25	0	100
14	75	1,25	1550	98,43
15	75	1,25	700	98,13
16	75	1,25	700	98,36
17	75	1,25	700	97,85

Fonte: Autor, 2025

O carvão ativado AC10 demonstrou excelente desempenho na adsorção do ácido gálico. Os dados obtidos nos ensaios revelaram taxas de remoção elevadas, superiores a 99% sob condições otimizadas para o ácido gálico, com tempo de contato de 90 minutos, 2,0 g de adsorvente e concentração de 1200 mg/L, evidenciando a eficácia do AC10 na remoção destes compostos de soluções aquosas.

#### 5.3.1.1 Resultados das análises de variância do modelo de regressão para carvão ativado AC10 com ácido gálico

A análise de variância (ANOVA) para o modelo de regressão aplicado ao ácido gálico indicou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 60,38%, (tabela 8) valor considerado moderado conforme Halim e Sarbon (2017), que apontam que modelos com  $R^2 \geq 70\%$  podem ser usados para previsão em sistemas de adsorção. Embora o modelo apresentado tenha um  $R^2$  inferior a 70%, ele ainda fornece informações importantes sobre a influência das variáveis estudadas.

A equação de regressão obtida destacou a influência das variáveis "massa do adsorvente" ( $X_2$ ) e "concentração do adsorvato" ( $X_3$ ) na eficiência adsorvativa. A análise evidenciou a presença de interações entre as variáveis, sugerindo efeitos combinados que impactam o comportamento do sistema. Tais achados estão em consonância com Bezerra *et al.* (2008), que relataram a importância de interações sinérgicas entre variáveis em modelos experimentais multifatoriais.

Tabela 8- Análise de variância (ANOVA) para carvão AC10 com ácido gálico.

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F <sub>calc</sub>	Modelo	R <sup>2</sup>
Regressão	5709,8	9	634,4	1,2	$Y_1 = 97,41 + 2,81 x_1 + 2,59 x_1^2 + 11,33 x_2 - 14,88 x_2^2 + 1,36 x_3 + 2,79 x_3^2 + 2,26 x_1 x_2 - 2,31 x_1 x_3 + 5,39 x_2 x_3$	60,38 %
Resíduos	3746,4	7	535,2			
Falta de ajuste	3746,3	5	749,3	11548,5		
Erro puro	0,1	2	0,1			
<b>Total</b>	9456,2	16				

SQ=Soma dos quadrados; GL=Graus de liberdade; QM= Quadrado médio Fonte: Autor, 2025

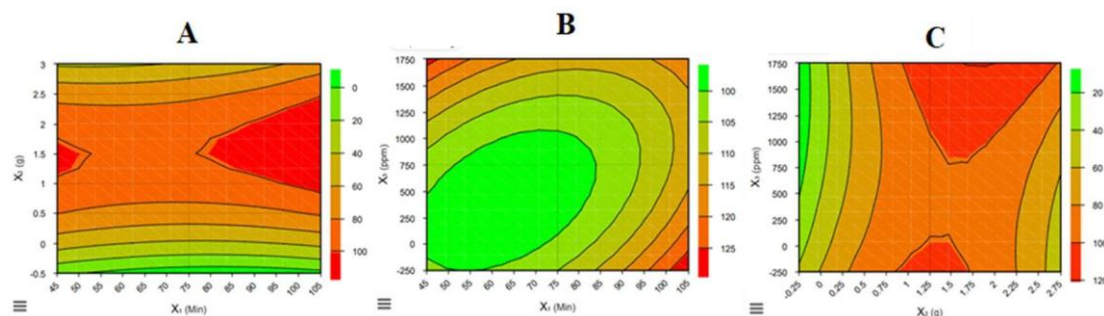
A partir do planejamento experimental realizado, foi possível analisar a influência de três variáveis independentes ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ) na remoção de ácido gálico.

A análise dos gráficos obtidos por meio do planejamento experimental revelou o comportamento do sistema de adsorção do ácido gálico em diferentes combinações de variáveis:  $X_1.X_2$ ,  $X_1.X_3$  e  $X_2.X_3$ , sendo  $X_1$  = Tempo de contato (min);  $X_2$  = Massa de carvão ativado (g) e  $X_3$  = Concentração do adsorvato.

Os gráficos de superfície de resposta (Figura 34) mostraram que as interações entre as variáveis apresentaram baixa influência sobre a eficiência de remoção do ácido gálico. As variáveis massa do adsorvente e tempo de contato foram os fatores mais significativos, atuando positivamente no processo. A interação entre tempo de contato e

concentração do adsorvato demonstrou efeito negativo, indicando que o aumento simultâneo dessas variáveis pode reduzir a eficiência adsorptiva. Esses resultados reforçam a importância de otimizar principalmente as variáveis isoladas, especialmente a massa do adsorvente, para obter melhores taxas de remoção.

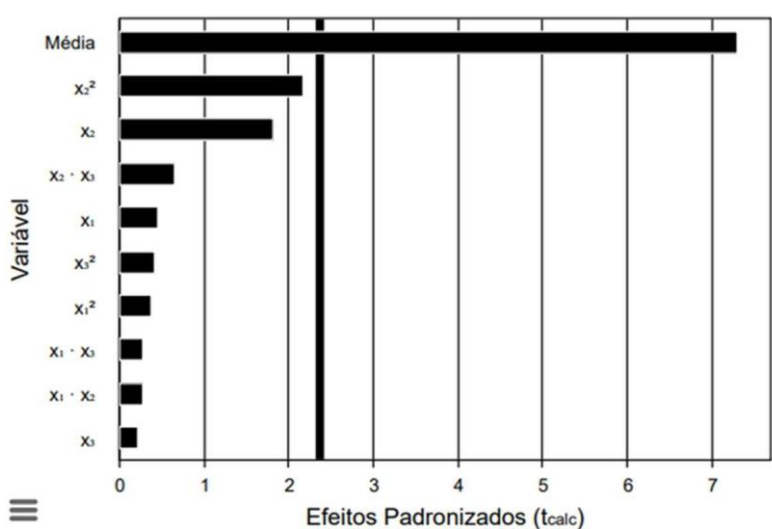
Figura 34- Gráficos de superfície de resposta gerados no experimento com ácido gálico.



Legenda:  $X_1$ = Tempo de contato (min);  $X_2$ = Massa de carvão ativado (g);  $X_3$ = Concentração do adsorvato.  
Interações: A –  $X_1 \times X_2$ ; B –  $X_1 \times X_3$ ; C –  $X_2 \times X_3$ . Fonte: Autor, 2025

Na Figura 35, o gráfico de Pareto apresentado no experimento, evidencia os fatores mais relevantes no processo de adsorção. As barras que ultrapassam a linha de significância (geralmente 95%) indicam quais variáveis ou interações possuem efeito estatisticamente significativo sobre a eficiência de remoção do ácido gálico.

Figura 35– Gráfico de Pareto para carvão (AC10) com ácido gálico



Fonte: Autor, 2025

### 5.3.2 Resultados do teste de adsorção do ácido tânico com o carvão AC10

De acordo com a Tabela 9 é possível observar as condições dos testes de adsorção do adsorvato ácido tânico para 3 diferentes concentrações.

Tabela 9 - Média  $\pm$  desvio padrão dos testes de adsorção com ácido tânico em diferentes concentrações no carvão AC10.

Concentração do adsorvato (mg/L)	% Remoção médio
80	92,17 <sup>a</sup> $\pm$ 2,44
120	91,90 <sup>a</sup> $\pm$ 1,03
200	86,84 <sup>b</sup> $\pm$ 0,41

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ( $p \leq 0,05$ ). Resultados expressos em média e  $\pm$  desvio padrão. Fonte: Autor, 2025

Os ensaios de adsorção realizados com ácido tânico em diferentes concentrações no carvão ativado AC10 evidenciaram elevadas taxas de remoção, variando entre 86,84% e 92,17%. A análise estatística dos dados, expressos como média  $\pm$  desvio padrão, revelou que, embora os valores absolutos de remoção sejam próximos, o aumento da concentração do adsorvato influenciou significativamente a eficiência de remoção.

A amostra com menor concentração inicial (80 mg/L) apresentou o maior valor médio de remoção (92,17  $\pm$  2,44%), estatisticamente semelhante ao resultado obtido com 120 mg/L (91,90  $\pm$  1,03%), conforme indicado pelas letras iguais (a) no teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Por outro lado, a concentração mais alta (200 mg/L) resultou em um valor significativamente inferior (86,84  $\pm$  0,41%), classificado com letra diferente (b).

Esse comportamento confirma que a eficiência adsortiva do carvão diminui com o aumento da concentração do ácido tânico, o que pode estar relacionado à saturação dos sítios ativos do adsorvente. De acordo com Foo e Hameed (2010), à medida que a concentração do adsorvato aumenta, mais moléculas competem pelos sítios de adsorção, e quando esses sítios estão completamente ocupados, a eficiência do processo diminui, mesmo com a manutenção das demais variáveis operacionais constantes. Isso é consistente com a teoria da saturação dos sítios de adsorção, prevista pelos modelos de isoterma de Langmuir, os quais assumem que há um número finito de locais de adsorção disponíveis na superfície do adsorvente.

Zhou *et al.* (2022), ao produzirem carvão ativado a partir da lignina do sabugo de milho, relataram uma área superficial de até 1215,83 m<sup>2</sup>/g e 77,3% de mesoporos, características estruturais que favorecem a adsorção eficiente de moléculas de maior tamanho, como os taninos. Esses resultados reforçam o potencial de biomassas vegetais como precursoras de adsorventes sustentáveis aplicáveis ao tratamento de efluentes. Sendo assim, carvões ativados obtidos de biomassas lignocelulósicas podem apresentar excelente desempenho na remoção de compostos orgânicos devido à sua elevada área superficial e significativa proporção de mesoporos.

O carvão ativado (CA) é o adsorvente mais empregado e eficiente no tratamento de água por adsorver compostos que causam gosto, odor, cor, mutagenicidade e toxicidade à água. Porém, sua capacidade de adsorção está ligada à reatividade dos diferentes elementos químicos que compõem a estrutura do material. Sendo que, as características do adsorvato, como sua massa molecular e os grupos funcionais de sua molécula, também influenciam a eficiência da adsorção. Esta eficiência também pode estar relacionada a fatores como, as condições experimentais, que incluem pH, temperatura, tempo de contato entre adsorvente e adsorvato, agitação e a presença de compostos em água que podem competir por sítios de adsorção (Araújo *et al.*, 2018).

### 5.3.3 Resultados do teste de adsorção dos íons Ca<sup>2+</sup> em solução com o carvão AC10

Na Tabela 10 podemos observar os resultados obtidos para a adsorção de íons Ca<sup>2+</sup>.

Tabela 10 - Média  $\pm$  desvio padrão dos testes de adsorção com íons Ca<sup>2+</sup> em diferentes concentrações para o AC10

Concentração do adsorvato (mg/L)	% Remoção médio
80	85,17 <sup>a</sup> $\pm$ 14,75
120	91,71 <sup>a</sup> $\pm$ 14,36
200	100,00 <sup>a</sup> $\pm$ 0,00

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ( $p \leq 0,05$ ). Resultados expressos em média e  $\pm$  desvio padrão. Fonte: Autor, 2025

Os testes de adsorção com íons Ca<sup>2+</sup> utilizando o carvão ativado AC10 também apresentaram alta eficiência de remoção. Os resultados expressos como média  $\pm$  desvio

padrão mostraram um aumento gradual da eficiência com o incremento da concentração, culminando em remoção completa ( $100,00 \pm 0,00\%$ ) na concentração de 200 mg/L.

Contudo, a análise estatística, com base no teste de Tukey a 5% de significância, revelou que não houve diferença estatística significativa entre os grupos, uma vez que todos foram identificados com a mesma letra (“a”). Esse resultado pode ser atribuído à elevada variabilidade nos valores de remoção nas concentrações mais baixas, como evidenciado pelos altos desvios-padrão (14,75 e 14,36).

Portanto, embora o desempenho adsorptivo aumente numericamente com a concentração, essa diferença não é estatisticamente significativa, indicando uma robustez do AC10 na remoção de íons  $\text{Ca}^{2+}$  mesmo em concentrações menores.

Este fenômeno é comum em experimentos com adsorção envolvendo íons metálicos, especialmente em fases iniciais de interação adsorvente/adsorvato. Conforme apontado por Ho e McKay (2000), a variabilidade nos dados de adsorção pode estar associada à heterogeneidade da superfície do adsorvente e à distribuição desigual dos grupos funcionais disponíveis para interação com os íons. Ainda segundo os autores, quando os desvios padrão são elevados, mesmo diferenças reais entre médias podem não alcançar significância estatística devido ao alargamento do intervalo de confiança.

Estes resultados estão em consonância com estudos anteriores que destacam a eficácia de carvões ativados derivados de biomassa na remoção de contaminantes. Por exemplo, Alves *et al.* (2015) demonstraram que o carvão ativado obtido do endocarpo da amêndoa-da-praia apresentou uma remoção de até 99,98% de corantes orgânicos em meio aquoso, evidenciando a alta capacidade adsorptiva desses materiais.

Além disso, Jaguaribe *et al.* (2006) observaram que a aplicação de carvão ativado de endocarpo de coco na redução da dureza da água resultou numa diminuição de até 97% na dureza total, com 90% atribuída à remoção de íons cálcio, reforçando o potencial desses materiais na remoção de cátions específicos.

No contexto específico do carvão de endocarpo de Bocaiúva, Magalhaes *et al.* (2022) indicaram que adsorventes derivados destas biomassas apresentam uma capacidade máxima de adsorção de 10,06 mg/g para o herbicida diuron, ajustando-se bem

ao modelo de isoterma de Langmuir, o que sugere uma adsorção monolayer em superfícies homogêneas.

## **6-CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A produção de carvão ativado a partir do endocarpo da Bocaiúva demonstrou ser uma alternativa sustentável e eficiente para a valorização de resíduos agroindustriais do Cerrado brasileiro. A ativação química com NaOH e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> resultou em carvões com capacidade adsortiva, confirmada por testes com diferentes adsorvatos de interesse para a indústria alimentícia. Os carvões ativados apresentaram desempenhos expressivos na remoção de azul de metileno, com percentuais de remoção que atingiram até 100% para o AC10 e 95,56% para o AC70. Nos ensaios com ácido gálico, o carvão AC10 obteve remoções superiores a 99% em condições otimizadas, comprovando a sua eficácia na adsorção destes compostos.

Para o ácido tânico, as remoções também foram elevadas, ultrapassando 93% para concentrações menores, reforçando a versatilidade dos carvões na purificação de soluções orgânicas. Por fim, na remoção de íons cálcio (Ca<sup>2+</sup>), alcançaram-se remoções de até 100% com o AC30, demonstrando a potencialidade destes materiais na redução de dureza da água e tratamento de efluentes.

Os modelos matemáticos ajustados às superfícies de resposta exibiram coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) elevados, variando entre 84% e 94% para a maioria dos carvões, o que indica forte correlação entre as variáveis estudadas e a eficiência de remoção. Deste modo, o carvão ativado produzido a partir do endocarpo de Bocaiúva mostrou ser um adsorvente de baixo custo, elevada eficiência e aplicação promissora na indústria alimentícia e em processos de tratamento de águas, promovendo assim a sustentabilidade e a inovação tecnológica a partir de recursos naturais subutilizados.

## **7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Diante dos resultados promissores obtidos, trabalhos futuros podem explorar a reutilização dos carvões ativados por meio de testes de dessorção, avaliando sua capacidade de regeneração e manutenção da eficiência adsortiva ao longo de múltiplos ciclos. Além disso, é possível ampliar os estudos com outros compostos orgânicos e inorgânicos de interesse industrial, bem como realizar testes em escala piloto para

validação em condições reais de processo. Investigações complementares sobre a estabilidade estrutural dos carvões, seu comportamento em diferentes faixas de pH e a aplicação em matrizes alimentares ou efluentes complexos também representam caminhos relevantes para ampliar o potencial de uso desses materiais sustentáveis.

## 8. REFERÊNCIAS

ACEVEDO, N. I. A.; ROCHA, M. C. G.; BERTOLINO, L. C. Determinação da área superficial específica e da porosidade de duas amostras de argilas provenientes da bacia de Taubaté- São Paulo / Determination of specific surface area and porosity of two clays originated from Taubaté-Basin – São Paulo. **Brazilian Applied Science Review**. v. 5, n. 1, p. 39-57, 2021.

AGUIAR, M. R. M. P. N.; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**. V. 25, n. 6b, p. 1145-1154, 2002.

AHMAD, M. A.; AHMAD, N.; BELLO, O. S. (2014). Adsorptive removal of congo red dye using durian seed-based activated carbon. **Water Air Soil Pollut.** p. 2-18, 2014.

ALBERTI, A.; ZIELINSKI, A. A. F.; ZARDO, D. M.; DEMIATE, I. M.; NOGUEIRA, A.; MAFRA, L. I. Optimisation of the extraction of phenolic compounds from apples using response surface methodology. **Food Chemistry**. v. 149, p. 151-158, 2014.

ALMEIDA, C. F. **PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO QUIMICAMENTE A PARTIR DA PALMÁCEA MAURITIA FLEXUOSA E O ESTUDO DE SUAS PROPRIEDADES ADSORTIVAS**. Dissertação (Mestrado). Universidade federal da grande dourado faculdade de ciências exatas e tecnologia programa de pós-graduação em química. Dourados, 2015.

ALMEIDA, M. A.; COATTI, L.; GHANI, Y. A.; COLOMBO, R. Desenvolvimento de carvão ativado a partir de bagaço de cana-de-açúcar e sua aplicação na adsorção de ácido orgânico. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**. v.4, n.3, p. 2955-2965, 2021.

ALVES, M. F.; BRITO, M. J. P.; BORGES, M. V.; BATISTA, A. S.; JESUS, F. W. A.; FERNANDES, S. A. A. Produção de carvão ativado a partir do endocarpo da Amêndoa-da-Praia para adsorção de corantes orgânicos em meio aquoso. **Caderno de Ciências Agrárias**. v. 7 n. 2, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/2843>

ARAÚJO, L. S.; COUTINHO, A. R.; ALVAREZ-MENDEZ, M. O. A.; MORUZZI, R. B.; CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Caracterização e avaliação de fatores que determinam a remoção de microcistina-LR em carvão ativado granular produzido a partir de diferentes matérias-primas. **Eng Sanit Ambient**. v.23 n.6, p. 1131-1142, 2018.

ARMINDA, M.; JOSÚE, C.; CRISTINA, D. M. S. C.; FABIANA, S.; YOLANDA, M. Use of activated carbons for detoxification of a lignocellulosic hydrolysate: Statistical optimisation. **Journal of environmental management**. v. 296, p. 113320, 2021.

ARSLANOG˘LU, F. N.; KAR, F.; ARSLAN, N. Adsorption of dark coloured compounds from peach pulp by using powdered-activated carbon. **Journal of Food Engineering**, v. 71, n. 2, p. 156–163, 2005.

AZIZ, K.; HAYDARI, I.; KAYA, S.; MANDI, L.; OUAZZANI, N.; AZIZ, F. Phenolic compounds removal in table olive processing wastewater by column adsorption: conditions optimization. *Environmental science and pollution research international*. 2023.

BELINI, R. **COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO ATIVADO ORIUNDO DA SEMENTE DA UVA E CARVÃO ATIVADO PRODUZIDO A PARTIR DO BAGAÇO NA CLARIFICAÇÃO DE VINHO**. 2020. 59 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. CAXIAS DO SUL, 2020.

BEN, H.; WU, Z.; HAN, G.; JIANG, W.; RAGAUSKAS, A. Behavior of Major Biomass Components in Waste Biomass." *Polymers*, v. 11, n. 2, p. 324, 2019 <https://doi.org/10.3390/polym11020324MDPI>

BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, v.76, n.5, p.965-977, 2008.

BRANDÃO, A. C. T.; QUEIROZ, V.; SILVA, R. G. C. Síntese e caracterização de carvão ativado quimicamente com H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e NaOH à partir da casca de pequi (*Caryocar brasiliense*). *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/index.php/BRJD/article/view/15444>

BRONZEADO, I. A. W.; AHMAD, A. L.; HAMEED, B. H. (2015). Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous Materials*, v. 154, n. 1-3, p.337-346, 2015.

CABAL, B.; ANIA, C. O.; PARRA, J. B.; PIS, J. J. Kinetics of naphthalene adsorption on an activated carbon: Comparison between aqueous and organic media. *Chemosphere*. v. 76, n. 4, p. 433-438, 2009.

CASTRO, D. A.; MILHOMEM, M. P. S.; PEREIRA, D. H.; LEAL, P. V.B. GURUPI ISOTHERMS PLOT (GIP): UMA FERRAMENTA COM INTERFACE GRÁFICA INTUITIVA E GRATUITA COMO ALTERNATIVA PARA O CÁLCULO DE PARÂMETROS DE ISOTERMA DE ADSORÇÃO. *Quim. Nova*, v. 44, n. 8, p.1028-1035, 2021.

CHEUNG, Y.; MEENU, M.; YU, X.; XU, B. Phenolic acids and flavonoids profiles of commercial honey from different floral sources and geographic sources. *International Journal of Food Properties*, v. 22, n. 1, p. 290–308, 2019.

CHIN, Y. H., LEE, C. L., CHIN, K. L., H'NG, P. S., KHOO, P. S., & RASHID, U. *Fabrication of Highly Microporous Structure Activated Carbon via Surface Modification with Sodium Hydroxide*. *Polymers*, v. 13, n. 22, p.3954, 2021 <https://doi.org/10.3390/polym13223954>

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul**, Brasil. 2012. 128f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, MS. 2012.

CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. Dissertação (Mestrado) UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA. Florianópolis. p. 90, 2003.

COELHO, E. R. C.; BREGA, R. S. Evaluation of a pilot system for removal of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and absorbance determination after clarification and adsorption on granular activated carbon. *In Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 28, 2023.

CORRÊA, M. S.; FERREIRA, C. E. C.; OLIVEIRA, D. C.; SOUZA, G. D. S. C.; MENDONÇA, N. M. Efeito do tempo de contato e massa de carvão ativado do caroço de açaí (1,2mm) na adsorção de corante catiônico. Ciências ambientais e o desenvolvimento sustentável na Amazônia 3. Paraná: **Atena**, cap. 21, p. 182-190, 2018. Disponível em: <https://livroaberto.ufpa.br/items/c18b42fd-fb61-43b3-980b-9b15bc798989>

CRISPIM, S. C. L. **Remoção de Cálcio (II) em solução aquosa por meio de carvões ativadas submetidos a tratamentos superficiais**. 2009. 127 f. Tese (Doutorado em Química). UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, João Pessoa, 2009.

CUNHA, R. S. S.; MOTA, J. D.; SOUSA, A. K. F.; RODRIGUES, M. G. F. Use of organophilic Bofe clay in removing oily contaminants. **Brazilian Journal of Development**. v.7, n.5, p. 47133-47151, 2021.

DUARTE, M. M. M. B.; SILVA, J. J. P.; SILVA, M. N. S.; GUEDES, G. A. J. C.; SANTOS, J. H. L. III-523 - ADSORVENTES PREPARADOS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA REMOÇÃO DE CORANTE TÊXTIL: PREPARAÇÃO, SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO. **ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**,iii-005 - XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21° SILUBESA 2024.

ESTEVES, B. M.; MORALES-TORRES, S.; MADEIRA, L. M.; MALDONADO-HODAR, F. J. Specific adsorbents for the treatment of OMW phenolic compounds by activation of bio-residues from the olive oil industry. *Journal of environmental management*. v. 306, p. 114490, 2022.

FARIAS, H. R.; MELO, A. R.; MARQUES, C. R. M.; BORTOLATTO, L. B. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DO CORANTE TÊXTIL AZUL MARINHO K -BF UTILIZANDO BENTONITA. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 12, n. 2, 2020.

FARIAS, J. A.; CAVALCANTI, P. H. M.; SILVA, J. C. R. ; MORENO, A. C. ; SANTOS, L. V. E.; MOURA, A. B. ; FILHO, G. M.; CALHEIROS, L. C. S. ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE LANGMUIR PARA FÓSFORO EM SOLOS DE ALAGOAS. **Ciência Agrícola**. v. 22, p. 1-6, 2024.

FERREIRA, I. V. **Carvão ativado de resíduo de Baru para adsorção de fármacos**. 2022. (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pampa. Bagé, 2022.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p.2-10, 2010.

FRANÇOIS, L. L.; HARO, N. K.; SOUZA, F. S.; FÉRIS, L. A. Caffeine removal by adsorption on activated carbon. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA (SCI. CUM IND.)**, v.4, n. 2, p. 64 -68, 2016.

GE, X.; WU, Z.; MANZOLI, M.; WU, Z.; CRAVOTTO, G. Feasibility and the Mechanism of Desorption of Phenolic Compounds from Activated Carbons. *Industrial & engineering chemistry research*. v. 59, n. 26, p. 12223-12231, 2020.

GOMES, P. B.; BIANCHI, M. L.; MAGALHÃES, F. Obtention of activated carbon from candeia soot residue. **Revista Materia**. v. 26, n. 2, 2021.

GONÇALVES, B.J. A. FIGUEIREDO, K. C. S. ADSORÇÃO DE ÁCIDO ACÉTICO EM CARVÃO ATIVADO PARA O ENSINO DE ADSORÇÃO. **The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC**. v. 06 n. 05, 2020.

GUERRA, A. B.; TONUCCI, M. C.; SUSANA, B.; CEBALLOS, O.; GUIMARÃES, R. C.; LOPES, W. S.; AQUINO, S. F.; LIBÂNIO, M. eutrofizadas por clarificação e filtração seguidas de adsorção em carvão ativado granular. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 20 n. 4, p 603-612, 2015.

HAFIZUDDIN, M. S. ; LEE, C. L.; CHIN, K. L. ; H'NG, P. S. ; KHOO, P. S.; RASHID, U. Fabricação de carvão ativado de estrutura altamente microporosa via modificação de superfície com hidróxido de sódio. **Polymersv.**13, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13223954>

HAFIZUDDIN, M. S., LEE, C. L., CHIN, K. L., H'NG, P. S., KHOO, P. S.; RASHID, U. Fabrication of Highly Microporous Structure Activated Carbon via Surface Modification with Sodium Hydroxide. **Polymers**, v.13, n. 22, p.3954, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13223954>  
HALIM, N. R. A.; SARBON, N. M. A response surface approach on hydrolysis condition of

HEIDARINEJAD, Z.; DEHGHANI, M. H.; HEIDARI, M.; JAVEDAN, G.; ALI, I.; SILLANPÄÄ, M. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*. V. 18, n. 2, p. 393-415, 2020.

HEYLMANN, K. K. A.; LOPES, B. V.; AFONSO, T. F.; DEMARCO, C. F.; CADAVAL JUNIOR, T. R.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Production, characterization, and application of activated charcoal from peach kernel in textile effluent treatment. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 485–494, 2021.

HEYLMANN, K. K. A; LOPES, B. V.; AFONSO, T. F.; DEMARCO, C. F.; CADAVAL JUNIOR, T. R.;QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil. **Eng Sanit Ambient.** v.26, n.3, p. 485-494, 2021.

HO, Y. S.; MCKAY, G. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. **Water Research**, v. 34, n. 3, p.735–742, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00232-8)

HÜBNER, J. V. M. A V A L I A Ç Ã O E X P E R I M E N T A L D A H A B I L I D A D E D O C A R V Ã O A T I V A D O E M A D S O R V E R C A F E Í N A M Ú L T I P L A S V E Z E S. Porto Alegre. Dissertação (mestrado ENGENHARIA QUÍMICA). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Porto Alegre, 2020.

IHEANACHO, O. C.; NWABANNE, J. T.; OBI, C. C.; IGWEGBE, C. A.; ONU, C. E.; DAHLAN, I. Adsorptive Dephenolization of Aqueous Solutions Using Thermally Modified Corn Cob: Mechanisms, Point of Zero Charge, and Isothermic Heat Studies. *Adsorption science & technology*. V. 2023, P. 1-14, 2023.

JAGUARIBE, E. F.; OLIVEIRA, M. F. D.; VIEIRA, H. M.; MEDEIROS, L. L.; PORPINO, K. K. P.; CRISPIM, S. C.; OLIVEIRA, W.M. DE; E SOUTO, U.T.C.P. Uso de carvões ativado de endocarpo de coco na redução da dureza na água. **46º Congresso Brasileiro de Química**. 2006. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2006/trabalhos2006/3/930-1087-3-T2.htm>

JANU,R.;MRLIK,V.;RIBITSCH,D.;HOFMAN,J.C.;SEDLÁČEK, P.; BIELSKÁ, L.; SOJA, G. "Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature." *Carbon Resources Conversion*, n.4, P.36–46, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.01.003>

LINHARES, F. A.; MARCÍLIO, N. R.; MELO, P. J. Estudo da produção de carvão ativado a partir do resíduo de casca da acácia negra com e sem ativação química. **Scientia cum Industria**. V. 4, n. 2, p. 74-79, 2016.

LISSANEDDINE, A.; MANDI, L.; ACHABY, M. E.L.; MOUSSET, E.; RENE, E. R.; OUAZZANI, N.; PONS, M. N.; AZIZ, F. Performance and dynamic modeling of a continuously operated pomace olive packed bed for olive mill wastewater treatment and phenol recovery. **Chemosphere (Oxford)**. v. 280, p. 130797, 2021.

LOURENÇO NETO, L.; MARQUES, A. P.; MOREIRA, K. C. B. PARTIAL REPLACEMENT OF COARSE AGGREGATE WITH ENDOCARP FROM MACAÚBA SEEDS IN THE PRODUCTION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE. **Revista Novos Desafios**. v.4, n.1, p. 3, 2024.

MAGALHÃES, T. F. S.; BARBOSA, A. G.; GOLIN, R.; TEREZO, A. J. VASCONCELOS, L. G.; MORAIS, E. B. Síntese de hidrocarvão a partir da casca do fruto de Bocaiúva e sua aplicação na remoção de diuron de água contaminada. **Nativa, Sinop**, v. 4, p. 486-494, 2022. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/13783>

MENEZES, M. S.; SANTOS, P. O. L.; SANTOS, B. L. P.; PRADO, A. A. O. S.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Biossurfactantes a partir de resíduos agroindustriais: perspectivas de aplicações em biorremediação. **Anais do XII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**. (2023). São Cristóvão. **Anais**. São Cristóvão: SE, 2023 Repositório Institucional da Universidade Federal de Sergipe - RI/UFS, p. 160 – 168, 2023.

MONTGOMERY, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. **John Wiley & Sons**.

MORAIS, E. D. (2014). **Produção do carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía utilizando H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COONa e KOH como ativantes**. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2014.

MORAIS, R. DE M.; SANTANA, G. M.; LELIS, R. C. C.; SCHUELER, M. V. E.; MORBECK, F. L.; PAES, J. B. Produção de carvão ativado a partir de Eucalyptus dunnii para adsorção de corante azul de metileno. **Revista Ciência Da Madeira - RCM**, v. 10, n. 1, p. 78–87, 2019.

MORAIS, R. M.; SANTANA, G. M.; LELIS, R. C.C.; PAES, J. B.; SCHUELER, M. V. E.; MORBECK, F. L. Produção e desempenho de carvão ativado fisicamente a partir de Bambusa vulgaris. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 39, p. 1-7, 2019.

MORAIS, S. A. L. de; PEZOTTI, K. L.; MAZZO, T. M. de A.; CAVALHEIRO, A. A.; RIBEIRO, M. M. A.; TAVARES, M. I. B. Caracterização de carvão ativado obtido a partir de biomassa residual por diferentes agentes ativantes. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, p. 1-14, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0618>

MOURA, F. C. C.; RIOS, R. D. F.; GALVÃO, B. R. L. Emerging contaminants removal by granular activated carbon obtained from residual Macauba biomass. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 26, p. 26482–26492, 2018.

MU'AZU, N. D.; ZUBAIR, M.; IHSANULLAH, I. Process Optimization and Modeling of Phenol Adsorption onto Sludge-Based Activated Carbon Intercalated MgAlFe Ternary Layered Double Hydroxide Composite. *Molecules (Basel, Switzerland)*. v. 26, n. 14, p. 4266, 2021.

NAYAK, S. S.; MIRGANE, N. A.; SHIVANKAR, V. S.; PATHADE, K. B.; WADHAWA, G. C. Adsorption of methylene blue dye over activated charcoal from the fruit peel of plant hydnocarpus pentandra. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, n. 2, p. 2302–2305, 2020.

SILVA, O. A.; CORTEZ-VEGA, W. R.; PRENTICE, C.; FONSECA, G. G. Development and characterization of biopolymer films based on Bocaiuva (*Acromonia aculeata*) flour. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, p. 1157–1168, 2020.

OLIVEIRA, E.; BONK, B.; FELIX, E. P.; DOMINGUES, R. C. P. R. Adsorção de monóxido de carbono em carvão ativado convencional e impregnado com 5% de nióbio. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 4, 2021.

OLIVEIRA, G. F. **Produção de carvão ativado a partir do pecíolo do babaçu**. Dissertação (Mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA. Dourados-MS. 2016.

PEDROZA, M. M.; SILVA, A. C.; BARROS, P. A. P. C.; REZENDE, C. S. A.; LÔBO, R. N.; ARRUDA, M. G. PREPARAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE DE VAGENS DE FLAMBOYANT (*Delonix regia*). **Revista AIDIS Ingeniería y ciências ambientales: investigación, desarrollo y práctica**. v. 16, n.3, p.779-796, 2023.

RAMOS, P. H.; GUERREIRO, M. C.; DE RESENDE, E. C.; GONÇALVES, M. Production and characterization of activated carbon prepared from pva defect coffee. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p. 1139–1143, 2009.

RIOS, R. D. F. **Produção de materiais baseados em carvão ativado granular obtidos de resíduos do endocarpo de macaúba e da mineração de ferro para remediação ambiental**. 2019. 140 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de química.

SALEEM, J.; SHAHID, U. B.; HIJAB, M.; MACKAY, H.; MCKAY, G. Production and applications of activated carbons as adsorbents from olive stones. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 2019.

SANTANA, M. B.; MENEZES, G. C.; BRANDÃO, P. V. R.; BRANCO, R. C. C.; ARAÚJO, D. N. ; RESENDE, V. B. Carbon capture: advances and challenges of technologies in the energy contexto. **Latin American Journal of Energy Research**. v. 11, n. 2, p. 264–282, 2024.

SCHIASSI, M. C. E. V.; SOUZA, V. R.; LAGO, A. M. T.; CAMPOS, L. G.; QUEIROZ, F. Fruits from the Brazilian Cerrado region: physico-chemical characterization, bioactive compounds, antioxidant activities, and sensory evaluation. **Food chemistry**, v. 245, n. 1, p. 305–311, 2018.

SCHWENDLER, L. A. **Análise preliminar da viabilidade econômica do uso de resinas de troca iônica e carvão ativado na clarificação do xarope para a indústria de refrigerantes**. Porto Alegre. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. (TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA), 2015.

SILVA NETO, H. A.; GARCIA, H. L.; ARAUJO, R. G. O.; GARCIA, C. A. B. Adsorção em coluna de leito fixo aplicada para a pré-concentração de cádmio em amostras de água. **Scientia Plena**. V. 14, n. 6, p. 1-10, 2018.

SILVA, F. A.; CANTANHEDE, L. B.; MARQUES, I. S.; ARAÚJO, W. S.; PINHEIRO, V. L. F. Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado derivado das cascas do fruto do tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*): Estudo cinético e isotérmico. **Anais do Congresso Brasileiro de Química – CBQ 2022**. Recuperado de <https://www.abq.org.br/cbq/2022/trabalhos/2/646-802.html>

SILVA, F. A.; CANTANHEDE, L. B.; MARQUES, I. S.; ARAÚJO, W. S.; PINHEIRO, V. L. F. Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado preparado a partir da casca do tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*). **Química Nova**, São Paulo, v. 47, n. 3, 2024.

SILVA, J.; GUARDA, E. A.; SILVA, Y. V.; RODRIGUES, W. B. F.; MENDES, M. L. B.; PIRES, C. R. F.; MARTINS, G. A. S.; GUARDA, P. M. Removal of phenolic compounds by adsorption in liquid media with activated carbon: a systematic review. **REVISTA OBSERVATORIO DE LA ECONOMIA LATINOAMERICANA**. v.23, n.1, p. 01-21. 2025.

SILVA, K. K.; RIBEIRO, M. A.; SILVA, E. B. C.; DOMICIANO, R. S.; ZANDONÁ, C. H. review article on the treatment of textile effluents by adsorption of methylene blue using activated carbon from green coconut mesocarp. **Revista de Gestão e Secretariado –GeSec**. v. 15, n. 12, p. 01-24, 2024.

SILVA, K. M.; ZIELINSKI, A. A. F.; BENVENUTTI, L.; BORTOLINI, D. G.; ZARDO, D. M.; BELTRAME, F. L.; NOGUEIRA, A.; ALBERTI, A. Effect of fruit ripening on bioactive compounds and antioxidant capacity of apple beverages. **Food Science and Technology (Brazil)**. v. 39, n.2, p.294-300, 2019.

SILVA, L. A. (2023). *Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de castanha-do-pará e sua aplicação na remoção de fenol de meio aquoso*. (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Maria. 2023.

SILVA, S. K. C.; SANTOS, A. G.; LEITE, R. H. L.; AROUCHA, E. M. M.; SANTOS, F. K. G. Adsorption of BF-5G reactive blue dye using Manihot Esculenta Crantz. **revista Matéria**, v.27, n.1, 2022.

SINGLETON, V. L. E. ROSSI, J.C. A. Colorimetria de Fenólicos Totais com Reagente de Ácido Fosfomolibdico-Fosfotúngstico. *American Journal of Enology and Viticulture*, v.16, 144-158, 1965. Disponível em: <http://www.ajevonline.org/content/16/3/144.full.pdf+html>

SOARES, L. A. (2014). *Síntese, ativação e caracterização de carvão obtido a partir de bagaço de cana de açúcar e avaliação da capacidade de adsorção*. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2014.

SOFFIAN, M. S.; HALIM, F. Z.A.; AZIZ, F.; RAHMAN, M. A.; AMIN, M. A. M.; CHEE, D. N. A. Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment. **Environmental Advances**, 2022.

SOUSA, A. A. O.; OLIVEIRA, T.S.; AZEVEDO, L. E. C.; NOBRE, J. R. C.; STEFANELLI, W. F. R.; COSTA, T. A. P. S.; SILVA, J. P. S.; BARRAL, A. V. S. Adsorção do corante básico Verde Malaquita via carvão ativado a partir do caroço de açaí. **Research, Society and Development**. v. 10, n. 2, e49110212871, 2021.

SOUSA, M. P. S.; SOUZA, C. D. R.; NASCIMENTO, L. O. N.; OLIVEIRA, M. S. Adsorção do corante alaranjado de metila em carvão ativado obtido da casca do cupuaçu. **research, society and Development**. v. 12, n. 14, 2023.

SOUSA, M. S. (2019). *Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí para utilização como material filtrante no tratamento de água superficial do rio Guamá*. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Pará. Disponível em: <https://ppgec.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2019/MONICA%20SILVA%20DE%20SOUSA.pdf>

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, C. A.; PIRES, J. F.; PIMENTEL, T. C.; RAICES, R. S. L.; NOGUEIRA, L. C.; Physicochemical characteristics and sensory acceptance of a mixed beverage based on organic apple juice and cardamom tea (*Elettaria cardamomum*) with allegation of functional Properties. **Food Science and Technology (Brazil)**. v. 40, n. 2, p. 669-676, 2020.

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

SOUZA, C. D. R.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, S. R. L. Influência dos parâmetros na síntese do carvão ativado da casca do *Astrocaryum aculeatum* no processo de adsorção. **Revista Principia**. v. 60, n. 3, p. 958–976, 2023.

SOUZA, W. D. M.; OLIVEIRA, T. M. B. F.; OLIVEIRA, D. S.; ALVES, J. J. F. APLICAÇÃO DA CASCA DA LARANJA PARA A REMOÇÃO DE METAIS PESADOS: UMA REVISÃO. **Química: ciência, tecnologia e sociedade**. v. 4, n.1, 2015.

TAO, J.; FU, X.; DU, C.; ZHANG, D. Tea Residue-Based Activated Carbon: Preparation, Characterization and Adsorption Performance of o-Cresol. *Arabian journal for science and engineering* (2011). v. 46, n. 7, p. 6243-6258, 2021.

WANG, B.; LAN, J.; BO, C.; GONG, B.; OU, J. Adsorção de metais pesados em carvão ativado derivado de biomassa: revisão. **RSC Advances**, v.13, p.4275–4302, 2023.

WATERHOUSE, A. L. Determination of total phenolics. *Current protocols in food analytical chemistry*. WROLSTAD, R. E. New York. Supplement 6: 1-8 p. 2002.

WOOD, R.; MAŠEK, O.; ERASTOVA, V. Desenvolvendo uma compreensão em nível molecular de materiais de biochar usando dados públicos de caracterização. **Cell Reports Physical Science**. v. 5, 2024.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D. H., & ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781–1788, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

ZENG, Y.; WANG, X.; WANG, Y.; WANG, X.; WANG, Y. Preparation of Microporous Carbon from *Sargassum horneri* by Hydrothermal Carbonization and KOH Activation for CO<sub>2</sub> Capture. **Journal of Chemistry**, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4319149>

ZHOU, Y., ZHANG, M., LI, Y., LI, Z.,; GAO, B. Alkali-assisted hydrothermal carbonization of corn cob lignin to prepare mesoporous activated carbon for methylene blue adsorption. *Industrial Crops and Products*, v. 185, n. 115091, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669022000790>

SMITH, B. C. Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach. **Boca Raton: CRC Press**, 2011.