



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

WASHINGTON BATISTA LIRA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE BURITI (MAURITIA FLEXUOSA) PARA A
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO E SUA APLICAÇÃO**

**PALMAS - TO
2025**

WASHINGTON BATISTA LIRA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE BURITI (MAURITIA FLEXUOSA) PARA A
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO E SUA APLICAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro
Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus
Palmas.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**PALMAS - TO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- L768a Lira, Washington Batista
Aproveitamento de poda de Buriti (*Mauritia Flexuosa*) para a
produção de carvão ativado e sua aplicação / Washington Batista
Lira. – Palmas, TO, 2025.
50 p. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.
- Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Poda de buriti. 2. Carvão ativado. 3. Pirólise. I. Pedroza,
Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

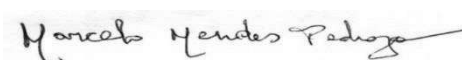
WASHINGTON BATISTA LIRA

APROVEITAMENTO DE PODA DE BURITI (MAURITIA FLEXUOSA) PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO E SUA APLICAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus
Palmas, como exigência à obtenção do grau
em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 08/02/2025

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza (IFTO)

Orientador



Prof. Dra. Elaine da Cunha Silva Paz (IFTO)



Prof. Me. Evanuzia Miranda da Silva (IFTO)

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também o resultado de esforços coletivos e do apoio inestimável de diversas pessoas.

Primeiramente, agradeço a Deus e a Nossa Senhora, pela força, proteção e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada. Sem Sua luz e amparo, os desafios teriam sido ainda maiores, e a realização deste sonho não teria sido possível.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, Manoel Lira e Antonia Batista, e aos meus irmãos, Wilton, Wellington, Williane, Anna Emanuely e Weverton, pelo suporte incondicional, pelo incentivo nos momentos de desafio e pela compreensão nas horas de dedicação intensa aos estudos. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

À minha namorada, Héllia Cristinne, por todo carinho, paciência e apoio durante essa jornada. Sua presença foi fundamental para que eu me mantivesse motivado e determinado a alcançar este objetivo.

Ao meu orientador, Marcelo Pedroza, pela paciência, dedicação e orientação essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este resultado.

Aos meus colegas de curso, em especial Rafael José e Paulo Vittor, pela parceria, amizade e pelo apoio mútuo ao longo dessa trajetória acadêmica. A jornada foi mais leve e enriquecedora graças a vocês.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

À Union Arquitetura e Construção, pelo apoio, incentivo e, principalmente, pela compreensão durante a realização deste trabalho. Agradeço pela oportunidade de aprendizado e pelo suporte essencial nessa fase tão importante da minha formação.

Aos profissionais e pesquisadores cujos estudos e descobertas serviram de base para este trabalho, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre carvão ativado via pirólise.

Por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste TCC, meu sincero agradecimento.

RESUMO

LIRA, Washington Batista. **Aproveitamento de poda de buriti (*Mauritia Flexuosa*) para a produção de carvão ativado e sua aplicação.** 2025. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2025.

A *Mauritia flexuosa*, popularmente conhecida como buriti, é a palmeira mais abundante do Brasil, atingindo uma altura média de 20 a 35 metros e encontrada principalmente na região Norte. Devido à sua grande produção anual de mais de 400 toneladas de frutos em cada safra, o buriti é amplamente explorado e extraído. Portanto, o objetivo deste trabalho é reutilizar o resíduo da poda de buriti, frequentemente descartado de forma inadequada, para a produção de carvão ativado através do processo de pirólise, com o objetivo de testá-lo como adsorvente de corante químico. Para esse fim, a poda de buriti foi caracterizada através dos testes de análise imediata, que são: teor de umidade (8,1%), teor de material volátil (79,9%), teor de cinzas (3,3%) e teor de carbono fixo (8,7%). Na sequência, a degradação térmica da poda de buriti foi realizada em reator de leito fixo em temperaturas de 550 e 650 °C, durante o tempo de 30 min à uma taxa de 30 °C/min e depois da obtenção do carvão ativado, foi feita a caracterização nos mesmos aspectos da amostra inicial da biomassa. Os rendimentos de carvão obtidos nos ensaios de pirólise a 550 °C e 650 °C foram, respectivamente, de 30,70% e 29,20%. Foi realizado o teste de adsorção do corante azul de metileno utilizando o carvão ativado produzido a 650 °C, conforme o planejamento delineado de faces centradas. Esse planejamento envolveu 11 combinações diferentes de massa de carvão e concentração de corante. Os resultados obtidos variaram de uma razão de adsorção de (0,58 mg/g a 9,40 mg/g), com massas de material variando entre (0,90 g e 0,30 g). Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o carvão ativado produzido pela pirólise da poda de buriti se mostrou um adsorvente eficaz.

Palavras-chave: Buriti, Carvão ativado, Pirólise, Corante químico.

ABSTRACT

LIRA, Washington Batista. **Aproveitamento de poda de buriti (*Mauritia Flexuosa*) para a produção de carvão ativado e sua aplicação.** 2025. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2025.

Mauritia flexuosa, popularly known as buriti, is the most abundant palm tree in Brazil, reaching an average height of 20 to 35 meters and found mainly in the North region. Due to its large annual production of more than 400 tons of fruit in each harvest, buriti is widely exploited and extracted. Therefore, the objective of this work is to reuse the waste from buriti pruning, often discarded in a concentrated form, for the production of activated carbon through the pyrolysis process, with the aim of testing it as a chemical dye adsorbent. To this end, buriti pruning was detailed through immediate analysis tests, which are: moisture content (8.1%), volatile material content (79.9%), ash content (3.3%) and fixed carbon content (8.7%). Next, the thermal manipulation of buriti pruning was carried out in a fixed bed reactor at temperatures of 550 and 650 °C, for a period of 30 min at a rate of 30 °C/min and after obtaining the activated carbon, the characterization in the same aspects as the initial biomass sample. The charcoal yields obtained in the pyrolysis tests at 550 °C and 650 °C were, respectively, 30.70% and 29.20%. The methylene blue dye adsorption test was carried out using the activated mechanism produced at 650 °C, according to the outlined planning of centered faces. This planning involved 11 different combinations of charcoal mass and dye concentration. The results obtained ranged from an adsorption ratio of (0.58 mg/g to 9.40 mg/g), with masses of material varying between (0.90 g and 0.30 g). Based on the results obtained, it can be concluded that the activated carbon produced by the pyrolysis of buriti pruning proved to be an effective adsorbent.

Keywords: Buriti, Activated charcoal, Pyrolysi, Chemical dye.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aspectos do processo de pirólise.....	18
Tabela 2 – Fatores e níveis empregados.....	31
Tabela 3 – Ordem dos experimentos no planejamento experimental.....	32
Tabela 4 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa	35
Tabela 5 – Rendimento do carvão ativado 550 °C e 650 °C	35
Tabela 6 – Comparativo entre os rendimentos de carvão ativado 550 °C e 650 °C..	36
Tabela 7 – Análise de carvão ativado da poda de Buriti	37
Tabela 8 – Comparativo entre os trabalhos de análise de carvão ativado	37
Tabela 9 – Resultados do ensaio de adsorção do carvão 650 °C	39
Tabela 10 – Coeficientes de regressão e valores estatísticos	40
Tabela 11 – Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição do bioma Cerrado no Brasil, representado em cor laranja ...	12
Figura 2 - Vereda com Buriti	14
Figura 3 - Tronco do Buriti	15
Figura 4 - Composição da folha do Buriti	15
Figura 5 - Inflorescência do macho	16
Figura 6 - Inflorescência da fêmea	16
Figura 7 - Composição anatômica do buriti	17
Figura 8 - Estrutura de poros do carvão ativado	20
Figura 9 - Formatos mais utilizados do carvão ativado	20
Figura 10 - Diagrama de atividades que serão desenvolvidas	21
Figura 11 - Talo extraído de buritizeiro	22
Figura 12 – Estufa modelo SP-200	23
Figura 13 – Dessecador	24
Figura 14 - Forno mufla	24
Figura 15 - Reator termoelétrico será utilizado no processo de pirólise	27
Figura 16 – Autoclave vertical	28
Figura 17 - Equipamentos envolvidos no processo de pirólise	28
Figura 18 - Fracos preparados para o experimento	31
Figura 19 - Mesa agitadora orbital tecnal modelo "Shaker TE 141"	32
Figura 20 – Processo de filtração da substância adsolvida	33
Figura 21 – Espectrofotômetro modelo Hach DR 6000.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Contribuição das variáveis para a razão de adsorção	41
Gráfico 2 – Gráfico de predição do modelo da razão da adsorção	42
Gráfico 3 – Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis	43
Gráfico 4 – Relação entre Razão de Adsorção x Variáveis Independentes	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Problema de pesquisa	11
1.2 Justificativa.....	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	13
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Buriti.....	13
2.1.1 <i>História</i>	13
2.1.2 <i>Aspectos botânicos</i>	14
2.1.3 <i>Perspectiva de mercado</i>	17
2.2 PROCESSO DE PIRÓLISE	18
2.3 CARVÃO ATIVADO E SUAS PROPRIEDADES ADSORVENTES.....	19
3. ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	21
3.1 COLETA DO MATERIAL.....	22
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	22
3.2.1 Umidade	22
3.2.2 Teor de cinzas	24
3.2.3 Material Volátil	25
3.2.4 Teor de carbono fixo	25
3.2.5 Densidade.....	26
3.3 PIRÓLISE DO MATERIAL	26
3.3.1 BALANÇO DE MASSA	29
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO	29
3.4.1 Umidade	29
3.4.2 Teor de cinzas	29
3.4.3 Material volátil	29
3.4.4 Teor de carbono fixo	30
3.4.5 Densidade.....	30
3.4.6 Adsorção.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	34

4.1.1 <i>Análise imediata</i>	34
4.2 RENDIMENTO DO CARVÃO ATIVADO DA PODA DE BURITI	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO.....	36
4.4 TESTE DE ADSORÇÃO	38
4.4.1 <i>Razão de adsorção (Q)</i>	39
5. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

A *Mauritia Flexuosa* também conhecida popularmente como Buriti é a palmeira mais abundante do país, tendo em média de 20 a 35 metros de altura e pode ser encontrada na região norte em uma extensão territorial de aproximadamente 3.870.000 km², além de se manifestar no nordeste, centro-oeste e sudeste. Para que possa se desenvolver, necessita de solos com terrenos baixos e que tenha a presença de água sendo primordial que o solo seja ácido para que haja floração e frutificação (Barros; Jardine, 2021).

O buriti contribui de forma significável por desempenhar um papel importante, sendo completamente aproveitável. A partir das folhas e/ou palhas até a raiz, sendo utilizado popularmente para a criação de artesanato em geral aproveitando as folhas de forma trançada e também colabora com remédios caseiros que são feitos a partir da extração da raiz da palmeira Pio, 2010.

Os autores em Oliveira *et al.* 2020 apontam que o óleo de buriti conta com um ótimo valor nutricional, possuindo ação protetiva como efeito antioxidante e antidiabético que pode proporcionar uma renda para as comunidades rurais mantendo a preservação das espécies das palmeiras.

O aumento populacional, econômico e tecnológico trouxe mudanças significativas no estilo de vida da sociedade que impactaram diretamente nos modos de produção e consumo pelo aumento da produção tanto em quantidade quanto em variedade da geração dos resíduos sólidos (Marchi; Gonçalves, 2020).

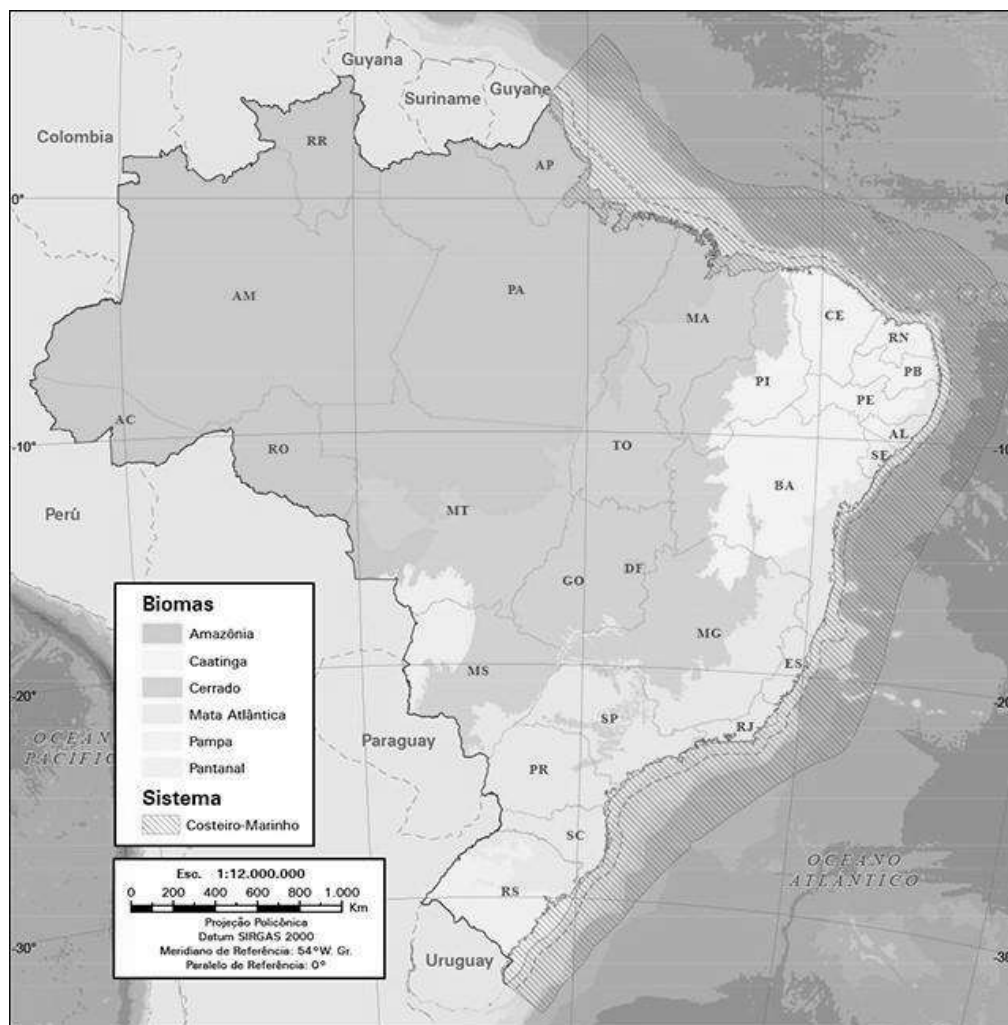
Dentro do contexto da produção do Buriti, com toda a possibilidade de aproveitamento da palmeira seja para a produção de artefatos artesanais que geram renda ou para fins medicinais para o tratamento e prevenção de doenças, uma outra alternativa seria o aproveitamento da poda do Buriti para a produção de carvão ativado. Ocorrendo por meio do processo de pirólise, onde a biomassa sofreria decomposição pelo calor (Silvério; Barbosa; Pilô-Veloso, 2008).

1.1 Problema de pesquisa

Sendo o Brasil considerado um dos países que possui a maior biodiversidade biológica do mundo e o cerrado sendo o segundo maior bioma brasileiro Figura 1, no qual ocupa cerca de 21% de todo o território nacional onde atravessa desde a região

nordeste ao sudeste Souza, 2021. Estima-se um território com cerca de 3.870.000 km², com a produção anual de mais de 400 toneladas de frutos em cada safra, tendo em vista a grande diversidade no qual pode ser encontrado nas diferentes regiões por todo o cerrado brasileiro (IBGE, 2023).

Figura 1 - Distribuição do bioma Cerrado no Brasil, representado em cor laranja.



Fonte: IBGE (2019)

Dessa forma, seria uma alternativa sustentável desenvolver o carvão ativado a partir da grande quantidade de resíduos gerados pela poda do buriti?

1.2 Justificativa

Levando em consideração que o buriti possui uma vasta capacidade de produção durante todo o ano, com uma média de dez cachos de frutos maduros em cada safra, totalizando cerca de 450 a 2.000 frutos, sendo explorados e extraídos durante todo o período (Sampaio; Carrazza, 2012).

Os autores Teixeira *et al.* (2009) destacam a importância da poda, cujo principal objetivo é manter e desenvolver uma estrutura vigorosa na árvore, promovendo sua saúde e vitalidade. Além disso, enfatizam que as podas extraídas podem ser reaproveitadas para diversos fins.

Nesse sentido, é possível realizar a produção de carvão ativado a partir do processo de pirólise, reutilizando o talo para inúmeras aplicações além das que o buriti já proporciona, sejam elas para artefatos artesanais, fins medicinais, dentre outras. Dessa forma, além de não haver perda do resíduo, reduziria o descarte incorreto dos talos quando fossem necessários realizar os cortes que não seriam mais utilizados após a extração dos frutos, tornando-se uma opção viável e acessível para a produção de carvão ativado.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo Geral*

Reaproveitar a poda de Buriti (*Mauritilia Flexuosa*) para a produção de carvão ativado, através do processo de pirólise.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Caracterizar a biomassa escolhida;
- Realizar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo visando a produção de carvão ativado;
- Caracterizar o material adsorvente obtido;
- Testar o carvão ativado produzido nessa pesquisa em ensaio de adsorção de corante químico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Buriti

2.1.1 *História*

O buriti, também conhecido como miriti, muriti, palmeira-do-brejo, moriche, carangucha e aguaje, tem como nome científico (*Mauritia flexuosa* L. f.), pertencente à

família Arecaceae. É considerado uma palmeira brasileira e pode ser encontrado principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, em veredas com áreas úmidas e pantanosas (Figura 2), nas margens de rios e brejos (Guimarães *et al.*, 2021; Sampaio; Carrazza, 2012).

Figura 2 - Vereda com Buriti



Fonte: INPA (2010)

Possuindo seu nome de origem indígena – 'biriti', que em tupi-guarani tem vários significados, como “árvore que emite óleo”, “aquela que contém água” ou até mesmo “árvore da vida” (Guimarães, 2014). Tais significados refletem tudo o que a palmeira proporciona, devido ao seu alto índice de aproveitamento e por atender grande parte das necessidades do ser humano.

As tribos indígenas da América do Sul tiveram por muito tempo como sustento o proveito que o buriti possibilitava através de sua extração, obtendo madeira, fibra, palha e óleo (Silva *et al.*, 2010). Nesse contexto, os frutos produzidos pela palmeira foram de suma importância, principalmente contribuindo na alimentação desses povos, devido ao seu ótimo valor nutricional.

Além de serem úteis como sustento, os buritizais desempenham um papel fundamental na manutenção e equilíbrio do cerrado, conservando a umidade do solo e colaborando no aporte dos corpos hídricos, principalmente no período de seca (Souza; Viana, 2018).

2.1.2 Aspectos botânicos

Sendo o buriti uma das maiores palmeiras nativas do Brasil, capaz de atingir até 40 metros de altura e possuir um tronco (caule) que pode variar de 13 a 55 centímetros

de diâmetro à altura do solo (Figura 3), esta palmeira possui uma composição diversificada em cada uma de suas partes estruturais (Sampaio; Carrazza, 2012).

Figura 3 -Tronco do Buriti



Fonte: Denis (2007).

Os buritizais adultos possuem de 20 a 30 folhas, com até 3 metros de comprimento cada, compostas por: capemba (bainha) que é a parte mais larga que fixa a folha ao tronco (caule) do buriti; o talo (pecíolo) que é coberto por uma fibra dura também conhecida como tala; e a palha (limbo foliar), que são as demais partes da folha (Figura 4) (Sampaio, 2011).

Figura 4 - Composição da folha do Buriti



Fonte: Sampaio (2011)

Além disso, os buritizeiros são classificados em buritis machos e fêmeas, de tal modo que, para que aconteça a produção de frutos, é necessária a existência de ambos. Enquanto os machos produzem cachos com folhas de coloração alaranjada, mas sem frutos (Figura 5), as fêmeas produzem cachos com folhas de coloração alaranjada e frutos (Figura 6) (Sampaio; Carrazza, 2012; Sampaio, 2011).

Figura 5 - Inflorescência do macho



Fonte: Sampaio (2011).

Figura 6 - Inflorescência da fêmea

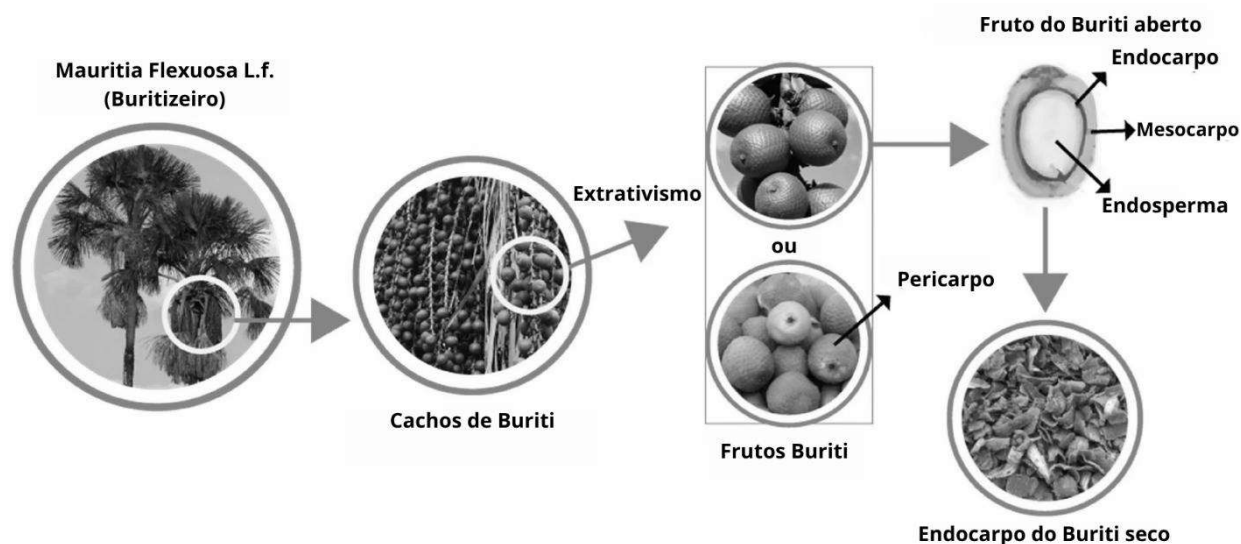


Fonte: Sampaio (2011).

Cada fêmea é fertilizada pelo pólen de um macho para que os frutos sejam produzidos, de tal maneira que esse processo é feito especialmente por abelhas nativas das regiões, besouros e algumas espécies de moscas pequenas. Nesse parâmetro, o florescimento do buriti no cerrado se dá de novembro a abril (Sampaio; Carrazza, 2012).

Os buritis possuem uma forma elíptica a oval, com uma composição anatômica (Figura 7) envolta por uma casca (pericarpo) na parte externa, composta por pequenas escamas com tonalidade que varia do marrom ao vermelho, cuja função principal é proteger os frutos contra possíveis ataques de animais e inibir a passagem de água. Depois, está a polpa do fruto (mesocarpo), que possui coloração amarela ou alaranjada, com aspecto oleoso e carnosos, podendo ser consumida. Em seguida, a bucha (endocarpo), que envolve o caroço/semente e possui um tecido esponjoso de baixa densidade, possibilitando que os frutos flutuem. Por fim, a semente (endosperma), que ocupa a maior parte do fruto (Sampaio; Carrazza, 2012; Sampaio, 2011).

Figura 7 - Composição anatômica do buriti



Fonte: Adaptada de Guimarães et al., (2021).

2.1.3 Perspectiva de mercado

Saraiva e Sawyer (2007) afirmam que há poucos estudos direcionados ao extrativismo, viabilidade econômica e ambiental, apesar de a palmeira ser uma das mais utilizadas e populares para essa finalidade no Brasil. No entanto, ressaltam que a extração sustentável do buriti ocasiona não só mudanças ambientais, mas também sociais e econômicas.

Sendo assim, apesar de ser explorada para diferentes aplicações, seu maior uso se dá através da fruta, que é utilizada na extração de óleos para alimentação, elaboração de cosméticos para fins medicinais, bebidas, doces e polpas. A demanda só aumenta, visto que os maiores produtores do país colhem em média 70 mil toneladas por safra. Além disso, observa-se que uma das partes do buriti, o endocarpo, embora não tenha finalidade industrial direta, por sua composição, pode ser introduzido no processo de reaproveitamento energético (Guimarães *et al.*, 2021).

2.2 PROCESSO DE PIRÓLISE

O termo pirólise tem origem grega e pode ser definido como a “decomposição através do calor”, ou seja, o material sofrerá degradação por energia térmica. Nesse processo, a biomassa é aquecida a altas temperaturas, entre 500 e 900 °C, dentro de uma câmara fechada e na ausência de oxigênio. Esse procedimento pode produzir produtos sólidos, líquidos ou gasosos que podem ser utilizados como combustíveis, carvão ativado, carvão vegetal, bio carvão, dentre outras substâncias (Silvério; Barbosa; Pilô-Veloso, 2008; Velmurugan, 2021).

Pode ser classificada em três modos (pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise flash), que se diferenciam de acordo com os parâmetros de manipulação e combinação que ocorrem em cada processo, como a taxa de aquecimento, a temperatura e o tempo de resistência da biomassa no reator (Pereira; Nascimento; Da Silva, 2022). Nesse contexto, esses procedimentos são divididos em categorias de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Aspectos do processo de pirólise.

Processo	Tempo de residência	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Produto principal
Pirólise lenta (Carbonização)	horas/dias	300-500	Muito baixa	Carvão vegetal
Pirólise convencional	5-30min	400-600	Baixa	Bio-óleo, Carvão e gases
Pirólise rápida	0,5 – 5s	400-650	Alta	Bio-óleo
Pirólise flash				
- Líquidos	< 1s	400-650	Alta	Bio-óleo
- Gases	< 1s	> 650	Alta	Químicos e gás comb.
Ultra-rápida	< 0,5s	1000	Muito alta	Químicos e gás comb.

Fonte: Adaptado de Rocha, 1997 (Mohan et al. 2006, Huber et al., 2006).

Dessa forma, pelo processo de pirólise possuir uma grande flexibilidade em gerar combinações de produtos, além proporcionar a transformação de materiais com baixa densidade energética em biocombustível uma das grandes vantagens se dá pela vasta possibilidade de utilização de diferentes tipos de matéria-prima, incluindo os materiais contendo carbono, orgânicos e inorgânicos em métodos comumente utilizados para descarte de resíduos (Czajczyńska *et al.*, 2017).

2.3 CARVÃO ATIVADO E SUAS PROPRIEDADES ADSORVENTES

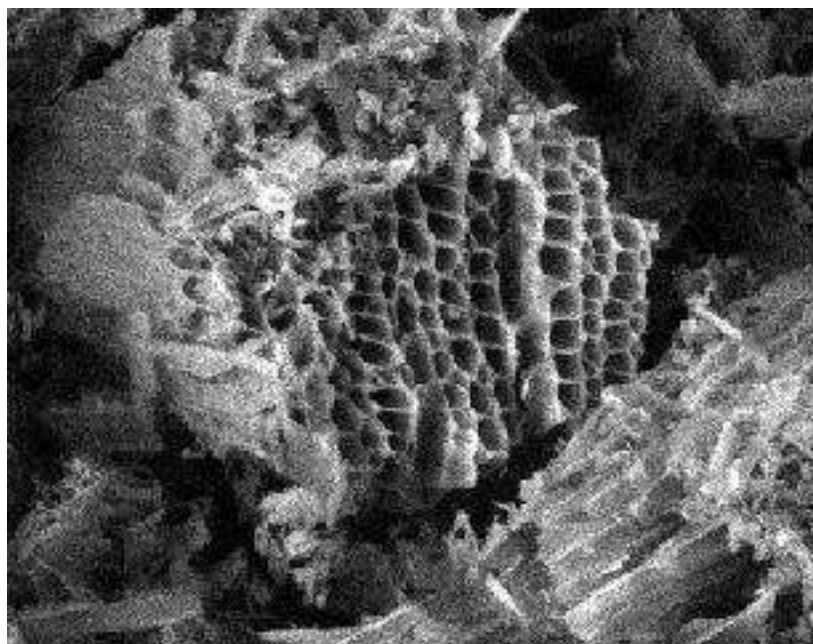
O carvão ativado é produzido a partir de um material carbonáceo poroso, que apresenta uma forma microcristalina e que sofre um tratamento para aumentar sua porosidade interna. Pode ser obtido através de materiais que possuam um alto teor de carbono, como biomassas derivadas da madeira, da casca de coco, do grão de café, do bambu, etc., sendo assim convertidos em carvão ativado (Ramos *et al.*, 2009).

Existem diversos usos descritos na literatura, como a purificação de água e ar, a aplicação em alimentos e na indústria em geral. Devido às suas características físico-químicas, também é utilizado na medicina (Murillo *et al.*, 2005; Froehlich, Moura, 2014).

Nesse aspecto, o carvão ativado é considerado um dos adsorventes mais utilizados devido ao seu alto índice de capacidade de captura de moléculas por interação química e à grande taxa de remoção, pois possui uma superfície específica de grande dimensão. Quando aplicado no tratamento de efluentes, está associado à redução de material orgânico, especialmente na alteração da cor dos efluentes (de Costa, Furmanski, Domingui, 2015).

Além disso, a porosidade é uma das principais características para a qualificação do carvão ativado, tendo em vista que os atributos da adsorção estão diretamente relacionados com a estrutura dos poros do material, conforme Figura 8 (Claudino, 2003).

Figura 8 - Estrutura de poros do carvão ativado



Fonte: SNatural (2017).

Podendo ser usado em diversos formatos, o carvão ativado possui duas configurações nas quais são mais utilizadas, sendo elas a configuração em pó ou granular (Figura 9). A escolha por qual formato será utilizado depende das necessidades de cada tratamento. Enquanto a configuração em pó é mais usual e aplicável nos tratamentos de líquidos, a granular é utilizada principalmente na remoção de gases (Júnior, Benetti, 2021; Souza, 2021).

Figura 9 - Formatos mais utilizados do carvão ativado

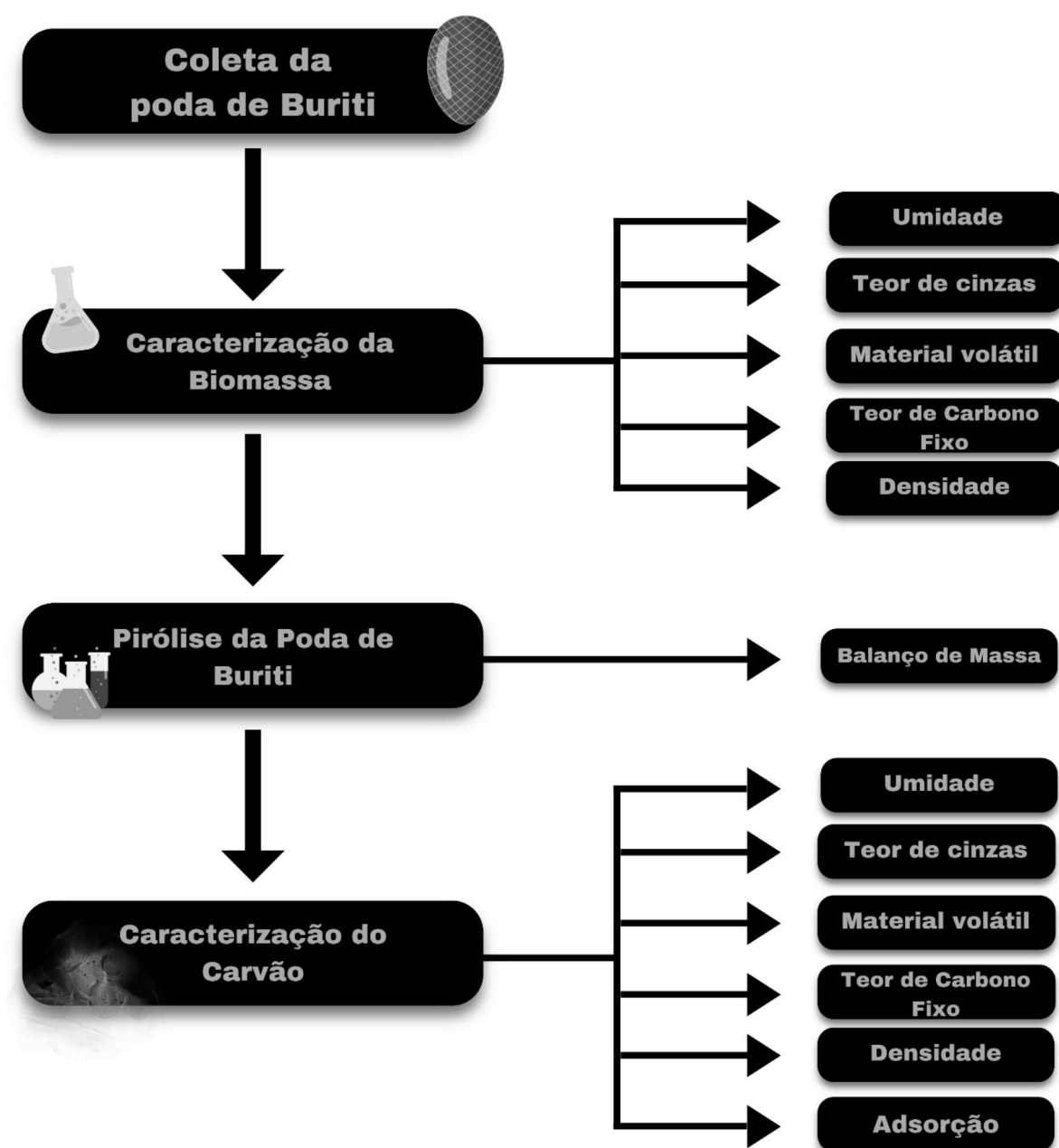


Fonte: Adaptado de Correra (2023).

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

As atividades previstas para esta pesquisa estão ilustradas na (Figura 10). Os ensaios experimentais destinados à caracterização da amostra foram desenvolvidos no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), localizado no campus Palmas.

Figura 10 - Diagrama de atividades que serão desenvolvidas



Fonte: Próprio autor (2024).

3.1 COLETA DO MATERIAL

A coleta do material ocorreu em uma vereda localizada em uma fazenda próxima à cidade de Miracema do Tocantins, onde foi realizada a poda de um buritizeiro para a extração de um talo sem frutos (Figura 11).

Figura 11 - Talo extraído de buritizeiro



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Para caracterizar a biomassa que será estudada (poda de Buriti), foram realizados diversos ensaios com o objetivo de coletar suas características, como teor de umidade, teor de cinzas, material volátil, teor de carbono fixo, densidade e uma análise cinética da perda de massa. Inicialmente, o material passará por um processo de secagem em estufa a 50 °C, visando remover qualquer excesso de umidade presente na poda do talo do buriti.

3.2.1 Umidade

A determinação do teor de umidade do material, foi realizada com base na Norma ASTM D3173-87. Nesse sentido, uma amostra com aproximadamente 1 grama foi colocada em um cadinho de porcelana, registrando-se os valores dos pesos iniciais. O recipiente foi depositado em uma estufa modelo SP-200 (Figura 12) a uma temperatura de 105 °C por um período de 1 hora.

Figura 12 – Estufa modelo SP-200

Fonte: Próprio autor (2024).

Em seguida, o material foi retirado da estufa e transferido para um dessecador (Figura 13), onde permaneceu por 15 minutos, sendo pesado após esse intervalo. Com os dados obtidos, a Equação 1 foi aplicada para calcular o percentual de umidade.

$$Umidade (\%) = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (Equação.1)$$

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra inicial;

B = peso do cadinho vazio + peso amostra pós-aquecimento na estufa;

C = peso da amostra inicial.

} (g)

Figura 13 – Dessecador



Fonte: Phlab (2024).

3.2.2 Teor de cinzas

Seguindo as recomendações da Norma ASTM D3174-04 para determinar o teor de cinzas da biomassa, conforme suas instruções e recomendações. Para isso, será foi utilizada uma amostra de 1 grama, colocada em um cadinho de porcelana de peso conhecido e introduzida em um forno mufla (Figura 14) por um período de 1 hora, a uma temperatura de 710 °C.

Figura 14 - Forno mufla



Fonte: Labnano (2020).

Após isso, o recipiente com a biomassa foi retirado do forno realocado para um dessecador por mais 1 hora, sendo realizado a pesagem após esse período. Com as informações obtidas, foi utilizada a Equação 2 para calcular a porcentagem:

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad \textbf{(Equação.2)}$$

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra inicial;
 B = peso do cadinho vazio + peso amostra pós-aquecimento em forno mufla;
 C = peso da amostra inicial.

} **(g)**

3.2.3 Material Volátil

Para a determinação do material volátil da biomassa da poda do buriti, foi utilizada a Norma ASTM D3175-07. Assim, durante um período de 7 minutos, a amostra foi aquecida em um forno mufla a uma temperatura de 850 °C na ausência de oxigênio. Após o aquecimento no tempo e temperatura estipulados, o teor de material volátil foi determinado conforme a Equação 3.

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad \textbf{(Equação.3)}$$

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra inicial;
 B = peso do cadinho vazio + peso amostra pós aquecimento na estufa;
 C = peso da amostra inicial.

} **(g)**

3.2.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo presente na biomassa estudada, foi determinado por a diferença descrita de acordo com a Equação 4:

$$\text{Teor de Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} - \text{Teor de cinzas(\%)} - \text{Material volátil(\%)}] \quad \textbf{(Equação.4)}$$

3.2.5 Densidade

Para calcular e determinar a densidade do resíduo sólido da poda de buriti, foi utilizada uma proveta de 100 mL, vinculada a uma balança de alta precisão para tarar o peso. Após esse procedimento, frações da biomassa foram colocadas progressivamente na proveta, anotando-se os respectivos pesos nos intervalos de volumes equivalentes a 20, 40, 60, 80 e 100 mL. Com os dados obtidos, a densidade média do material foi calculada utilizando a Equação 5.

$$\text{Densidade} \left(\frac{g}{mL} \right) = \left[\frac{m}{v} \right] \quad (\text{Equação.5})$$

Onde:

g = massa (em gramas);

v = volume (em mL).

3.3 PIRÓLISE DO MATERIAL

Nesse processo, foram realizados dois procedimentos de pirólise a diferentes temperaturas, correspondendo a 550 e 650 °C. Ambos os experimentos foram conduzidos por 30 minutos em cada uma das temperaturas, com uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto.

Dessa forma, o material que foi submetido ao processo de pirólise transferiu-se previamente seco para uma estufa a 50 °C, colocado em uma barca metálica e pesado em uma balança analítica. O mesmo procedimento foi realizado com a barca vazia para aferir a massa do resíduo a ser pirolisado e examinar o rendimento. Em seguida, o recipiente contendo a amostra foi inserido em um reator termoelétrico (Figura 15), posicionando-o de maneira centralizada para garantir estabilidade durante o procedimento.

Figura 15 - Reator termoeletrico foi utilizado no processo de pirólise



Fonte: Próprio autor (2024).

Antes de iniciar o processo de degradação térmica, se fez necessário ajustar o reator termoeletrico com as características específicas para o processo de pirólise, como a temperatura, a taxa de aquecimento da matéria e o tempo de permanência da biomassa no reator. Além disso, foi definido a potência da autoclave vertical (Figura 16), que será responsável por produzir o vapor d'água utilizado como gás de arraste no procedimento de pirólise.

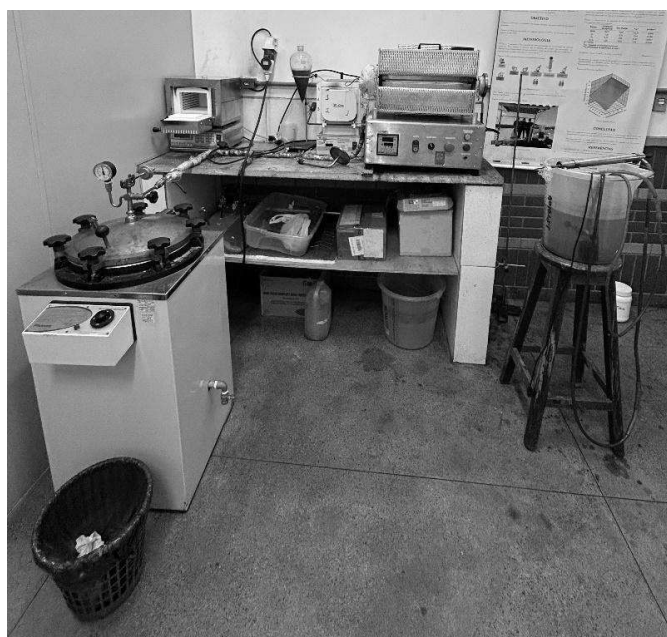
Figura 16 – Autoclave vertical



Fonte: Próprio autor (2024).

A Figura 17 mostra todos os aparelhos e equipamentos que foram utilizados no sistema de pirólise.

Figura 17 - Equipamentos envolvidos no processo de pirólise



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.1 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa foi baseado no princípio da Lei de Conservação de Massa, no qual foi popularizada pelo químico Antoine Lavoiser. Dessa forma, foi medido o peso da biomassa que entrou no reator e o peso do carvão que foi obtido após o procedimento, calculando o balanço de massa conforme Equação 6, assim como o rendimento conforme Equação 7.

$$M_c = M_e - M_s \quad \textbf{(Equação. 6)}$$

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{M_c}{M_e} * 100 \quad \textbf{(Equação. 7)}$$

Onde:

M_c = massa do carvão;

M_e = massa de entrada;

M_s = massa de saída.

} (g)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO OBTIDO

A caracterização do carvão no qual foi obtido após o processo de pirólise, passou por uma descrição semelhante à da biomassa, de acordo com os métodos descritos a seguir.

3.4.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com o item 3.2.1, seguindo as recomendações da Norma ASTM D3173-87.

3.4.2 Teor de cinzas

O teor das cinzas foi aferido segundo o item 3.2.2 e as orientações da Norma ASTM D3174-04.

3.4.3 Material volátil

O teor do material volátil foi definido de acordo com item 3.2.3 e as instruções da Norma ASTM D3175-07

3.4.4 Teor de carbono fixo

Conforme exposto no item 3.2.4, a determinação do teor de carbono foi de acordo a metodologia exposta.

3.4.5 Densidade

A densidade do carvão foi definida conforme está apresentado no item 3.2.5, calculando a relação entre massa e volume.

3.4.6 Adsorção

O teste de adsorção foi realizado utilizando o carvão ativado no qual foi obtido através do processo de pirólise da poda de buriti na temperatura de 650 °C com a taxa de aquecimento igual a 30 °C/minuto, na forma de pó, com granulometria de 0,45 milímetros. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), localizado no campus Palmas.

Para determinar a capacidade de adsorção do carvão produzido, foi utilizado uma solução corante (Azul de Metileno), cuja fórmula química é $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot 3H_2O$, sendo usados 30 mL de solução padrão em todos os testes, relacionados a diferentes massas de carvão ativado.

Com o objetivo de determinar os distintos valores e direcionar o estudo, o experimento foi realizado com o auxílio do software “Protimiza Experimental Design”, desenvolvido por Maria Isabel Rodrigues e Paulo Costa. O software foi programado com base na metodologia denominada Delineamento de Faces Centradas (DFC), que permite a avaliação eficiente de dados em um espaço multidimensional, analisando a relação entre as variáveis dependentes (respostas) e as variáveis independentes: massa do carvão (X_1) e concentração da solução do corante (X_2).

Nesta abordagem, para melhorar a avaliação, os fatores são codificados em três níveis: (-1), (0) e (+1). Esses códigos representam os níveis mínimo, médio e máximo, no qual serão utilizados no teste, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores e níveis empregados

Fatores	Unidade	Níveis		
		-1	0	1
Massa de carvão (X1)	g	0,30	0,60	0,90
Concentração do corante (X2)	mg/L	20	60	100

Fonte: Próprio autor (2024).

Com o auxílio do programa, foi estipulado o número de experimentos necessários para a análise, estabelecendo uma repetição igual a 1 e o número de pontos centrais igual a 3, totalizando 11 experimentos, que abrangem todas as combinações possíveis de níveis, além dos três pontos centrais. Dessa forma, os frascos de Erlenmeyer foram numerados e preenchidos (Figura 18) conforme a Tabela 3.

Figura 18 – Frascos preparados para o experimento

Fonte: Próprio autor (2025).

Tabela 3 – Ordem dos experimentos no planejamento experimental

Experimentos	Níveis decodificados		Níveis codificados	
	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	X1	X2
1	0,30	20	-1	-1
2	0,90	20	+1	-1
3	0,30	100	-1	+1
4	0,90	100	+1	+1
5	0,30	60	-1	0
6	0,90	60	+1	0
7	0,60	20	0	-1
8	0,60	100	0	+1
9	0,60	60	0	0
10	0,60	60	0	0
11	0,60	60	0	0

Fonte: Próprio autor (2024).

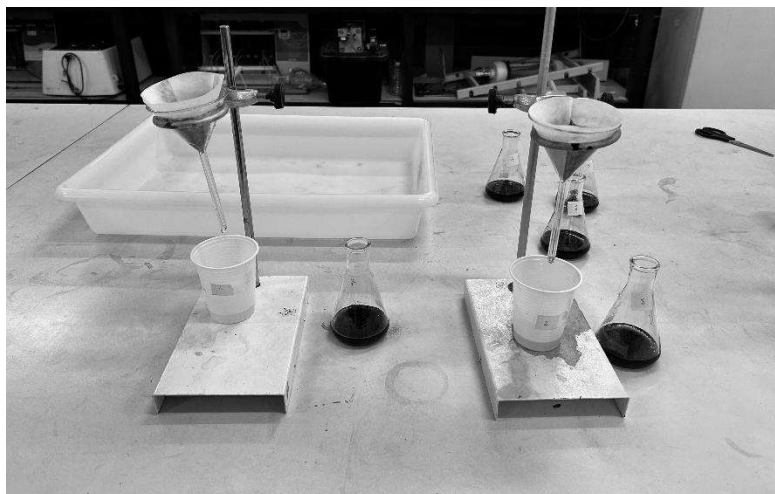
O ensaio foi realizado em uma mesa agitadora orbital modelo Shaker TE 141 (Figura 19), durante o período de 30 minutos com uma rotação igual a 30 rpm.

Figura 19 - Mesa agitadora orbital tecnal modelo “Shaker TE 141”

Fonte: Próprio autor (2025).

Após o processo de agitação, os materiais dos recipientes foram transferidos para funis de vidro contendo papel filtro qualitativo, conforme mostra a Figura 20, com o objetivo de realizar a filtração, separando as partículas de carvão e o azul de metileno já adsorvido.

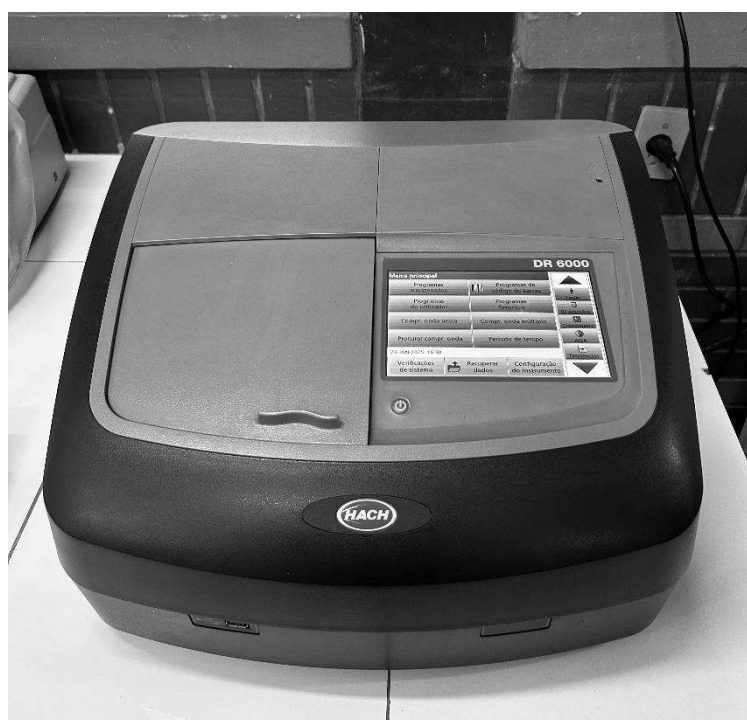
Figura 20 - Processo de filtração da substância adsorvida



Fonte: Próprio autor (2025).

Após o processo de filtração do material, o líquido filtrado foi avaliado em um espectrofotômetro (Figura 21), no qual mede a absorbância da substância em função de um determinado comprimento de onda, onde o do corante azul é de 660 nm.

Figura 21 – Espectrofotômetro modelo Hach DR 6000



Fonte: Próprio autor (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Com a finalidade de caracterizar a biomassa, foi realizada a análise imediata no qual está incluso a determinação do teor de umidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo e material volátil.

4.1.1 *Análise imediata*

O teor de umidade representa a quantidade de água perdida pela biomassa quando submetida a temperaturas próximas de 100 °C. Isso ocorre porque, ao ser aquecida, a amostra sofre uma redução de peso devido à evaporação da água presente em sua composição. Sendo assim, quanto menor for o teor de umidade, maior será a produção de calor (Do Vale *et al.*, 2000). De acordo com (Almeida, 2008), para transformações em processos termoquímicos, um teor de umidade de até 10% é considerado adequado. Nesse contexto, a poda de buriti, que apresentou um teor de umidade de 8,1% (Tabela 4), configura-se como uma biomassa apropriada para combustão e processos como a pirólise.

De acordo com (Pereira, Seye (2014), o teor de cinzas representa a fração da biomassa que não sofre combustão. (Fernandes *et al.* 2015) destacam que um alto teor de cinzas não é ideal, pois, além de reduzir o poder calorífico, também gera uma maior quantidade de resíduo. Nesse sentido, o valor de 3,3% (Tabela 4) encontrado na poda de buriti pode ser considerado satisfatório, uma vez que indica um baixo teor de cinzas, tornando a biomassa mais eficiente para processos energéticos.

O teor de carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono que há presente em uma biomassa (Dionizio, 2017). A maior parcela de fonte energética que há em uma biomassa é o teor de carbono fixo (Pires, 2013). De acordo com os autores (Chaves *et al.*, 2013), a porcentagem alta do teor de carbono fixo trará um maior conteúdo energético. Assim, o teor de carbono fixo encontrado da poda de Buriti foi equivalente a 8,7%.

Na poda de Buriti o material volátil encontrado foi de 79,9%. De acordo com (Vieira, 2012) a biomassa ao apresentar um alto teor volátil tem maior facilidade de

queimar e incendiar, ou seja, quanto maior for o teor volátil presente no carvão, mais rápido ele queimar.

Tabela 4 – Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa

Variável analítica	Biomassa desta pesquisa	Outros autores	
		Lôbo, (2021) ^(a)	Pedroza <i>et al.</i> (2021) (b)
Umidade (%)	8,1	5,97	6,4
Material volátil (%)	79,9	81,9	80,0
Teor de cinzas (%)	3,3	0,66	6,5
Carbono fixo (%)	8,7	11,47	7,1

^(a)Biomassa a partir da poda de jambolão;

^(b) Biomassa a partir de poda de árvores na região amazônica brasileira.

Fonte: Próprio autor (2025).

4.2 RENDIMENTO DO CARVÃO ATIVADO DA PODA DE BURITI

Depois de realizados os processos de pirólise, o peso do carvão produzido foi determinado pela diferença entre os pesos de entrada e saída dos procedimentos, permitindo a análise do rendimento, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Rendimento do carvão ativado 550 °C e 650 °C

Massa (g)	Carvão 550 °C	Carvão 650 °C
Peso da biomassa	26,67	37,13
Peso do carvão	8,19	10,86
Rendimento (%)	30,7	29,2

Fonte: Próprio autor (2025).

Dessa maneira, nota-se que o processo de pirólise realizado a 550 °C produziu 8,19 gramas de carvão ativado, onde a massa de entrada da poda de buriti foi igual a 26,67 gramas, apresentando, por conseguinte, um rendimento de 30,70%. Enquanto o carvão que foi produzido a 650 °C teve uma massa de 10,86 gramas, com 37,13 gramas de biomassa inserida, resultando assim em 29,20% de rendimento.

Os valores obtidos se aproximam ao de (Pedroza *et al.*, 2021), onde foram realizadas pirólises de podas de árvores na região amazônica do Brasil em diversos cenários, alcançando um rendimento médio de 33%, enquanto o aproveitamento médio da poda de Buriti foi de 29,95%, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Comparativo entre os rendimentos de carvão ativado 550 °C e 650 °C

Temperatura de pirólise (°C)	Rendimento do carvão (%)	Outros autores	
		Lôbo, (2021) ^(a)	Pedroza <i>et al.</i> (2021) ^(b)
550	30,70	26,26	33,93
650	29,20	17,47	32,07
Rendimento médio (%)	29,95	21,865	33

Fonte: Próprio autor (2025).

A produção de carvão ativado pode ocorrer a partir de qualquer substância orgânica com alto teor de carbono em sua composição, sendo esses carvões amplamente utilizados como adsorventes (De Aguiar Linhares, Marcílio, Melo, 2016). Desse modo, observa-se a eficiência produtiva obtida neste trabalho em comparação com a literatura analisada. Com base no rendimento médio constatado e nos dados de perda de massa, estima-se que uma tonelada de poda de Buriti em base seca seria capaz de produzir aproximadamente 307 kg de carvão ativado a 550 °C ou 292 kg de carvão processado a 650 °C.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO

Semelhante ao procedimento realizado na caracterização da biomassa, os carvões ativados produzidos nas temperaturas de 550 °C e 650 °C foram submetidos a testes de análise imediata, incluindo a determinação do teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo. Esses parâmetros são essenciais para avaliar a qualidade e o potencial de aplicação do carvão ativado.

Após a realização dos testes, foi possível determinar os valores característicos do carvão produzido de acordo com a Tabela 7, conforme a metodologia proposta, possibilitando a comparação com dados da literatura e a verificação da eficiência do processo de pirólise na conversão da biomassa em carvão ativado.

Tabela 7 – Análise de carvão ativado da poda de Buriti

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)
Umidade (%)	6,1	6,5
Material volátil (%)	28,5	19,9
Cinzas (%)	7,5	7,7
Carbono fixo (%)	57,9	65,9

Fonte: Próprio autor (2025).

Constatou-se que, durante a realização da pirólise, o aumento da temperatura resultou em um carvão produzido com uma maior porcentagem de umidade. Segundo o autor (Garcia, 2010), um elevado teor de umidade acarreta em perdas de energia e um menor tempo de secagem.

A título de análise e comparação, a Tabela 8 apresenta os resultados deste estudo em relação a outras pesquisas disponíveis na literatura acadêmica. Os carvões ativados comparados foram obtidos por meio de processos termoquímicos realizados em temperaturas entre 640 °C e 650 °C, produzidos a partir da poda de jambolão e de árvores na região amazônica.

Tabela 8 – Comparativo entre trabalhos de análise de carvão ativado

Variável analítica	Carvão 1 (550 °C)	Carvão 2 (650 °C)	Outros autores	
			Lôbo, (2021) ^(a)	Pedroza <i>et al.</i> (2021) ^(b)
Umidade (%)	6,1	6,5	7,7	-
Material volátil (%)	28,5	19,9	25	24,5
Cinzas (%)	7,5	7,7	2,5	18,3
Carbono fixo (%)	57,9	65,9	64,8	57,2

^(a) Carvão produzido a partir pirólise de jambolão a 650°C

^(b) Carvão produzido a partir de poda de árvores a 640°C

Fonte: Próprio autor (2025).

Dessa maneira, os resultados obtidos na análise imediata dos carvões ativados demonstraram similaridade com os valores encontrados na literatura, especialmente quando comparados ao estudo de (Pedroza *et al.*, 2021). Nesse trabalho, a biomassa utilizada também foi derivada de podas de árvores, apresentando uma porcentagem semelhante de teor de carbono fixo. Essa correspondência reforça a viabilidade do carvão ativado produzido a partir da poda de buriti e seu potencial aplicação em processos adsorventes.

Comparando-se as biomassas da poda de jambolão (Lôbo, 2021) e de árvores (Pedroza *et al.*, 2021), observa-se que os carvões produzidos apresentam um baixo teor de voláteis, em torno de 24%. Esse resultado era esperado, uma vez que grande parte dessas substâncias sofre volatilização ao longo do processo de pirólise, especialmente em temperaturas mais elevadas. A redução do teor de voláteis está diretamente relacionada à maior conversão da biomassa em carbono fixo, fator essencial para a qualidade do carvão ativado.

De acordo com dados expostos por (Farinhaque, 1981), o valor da umidade não pode ultrapassar 20%, pois amostras com valores elevados de umidade necessitam de uma maior quantidade de energia para dar início ao processo de combustão. Segundo Silva (2009), é preferível que o teor de umidade do carvão ativado esteja em níveis baixos para garantir uma maior eficiência na adsorção, pois a presença de moléculas de água pode ocupar os poros do material, reduzindo sua capacidade de adsorver a substância-alvo.

Segundo (Hoffmann, 2010), um alto teor de cinzas pode resultar em uma diminuição da eficiência do processo de pirólise e da qualidade do carvão ativado, devido ao aumento do consumo de oxigênio necessário para derreter as cinzas, além da perda de calor com a saída das cinzas do reator.

Dessa forma, os resultados obtidos na análise imediata são satisfatórios, tanto em comparação com outros estudos existentes quanto em relação às orientações de diversos autores.

4.4 TESTE DE ADSORÇÃO

Os dados referentes ao teste de adsorção do carvão ativado derivado da poda de Buriti produzido a 650 °C estão apresentados na Tabela 9, incluindo a razão de adsorção (Q). Esses resultados permitem avaliar a capacidade do material em adsorver

o corante da solução, possibilitando uma análise comparativa com outros estudos e validando sua eficácia como adsorvente.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de adsorção do carvão 650 °C

Exp.	Massa de carvão (g)	Concentração do corante (mg/L)	Razão de adsorção (mg/g)
1	0,30	20	1,89
2	0,90	20	0,58
3	0,30	100	9,40
4	0,90	100	3,30
5	0,30	60	5,83
6	0,90	60	1,91
7	0,60	20	0,92
8	0,60	100	4,97
9	0,60	60	2,90
10	0,60	60	2,89
11	0,60	60	2,92

Fonte: Próprio autor (2025).

Ao inserir esses dados no software "Protimiza Experimental Design", foi desenvolvido um modelo de regressão linear que permitiu compreender como a resposta obtida variava em função da quantidade de carvão utilizado e da concentração do corante testado. Desta forma, o desempenho do carvão ativado durante a adsorção pode ser avaliado com mais detalhes.

4.4.1 Razão de adsorção (Q)

A Tabela 10 lista os coeficientes obtidos na construção do modelo baseado na variável razão de adsorção (Q). Este parâmetro está diretamente relacionado à quantidade de corante adsorvido por unidade de carvão ativado durante o processo de filtração. Portanto, valores elevados de Q são desejáveis, pois indicam que o carvão ativado é mais eficiente na remoção de corantes da solução.

Tabela 10 – Coeficientes de regressão e valores estatísticos

Nome	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
X ₁	-1,89	0,12	-16,26	0,0000
X ₁ ²	0,90	0,18	5,05	0,0039
X ₂	2,38	0,12	20,49	0,0000
X ₂ ²	-0,02	0,18	-0,12	0,9100
X ₁ • X ₂	-1,20	0,14	-8,43	0,0004

Fonte: Próprio autor (2025).

Com base nos dados obtidos, pode-se estabelecer a equação de regressão linear do modelo estatístico correspondente à taxa de adsorção, conforme mostrado na Equação 10. Adicionalmente, foi criado um diagrama de Pareto conforme Figura 6, para destacar as variáveis e suas interações que têm maior impacto no processo de adsorção.

$$Q = 2,93 - 1,89 X_1 + 0,90 X_1^2 + 2,38 X_2^2 + 0,02 X_2^2 - 1,20 X_1 \cdot X_2 \quad (\text{Equação 10})$$

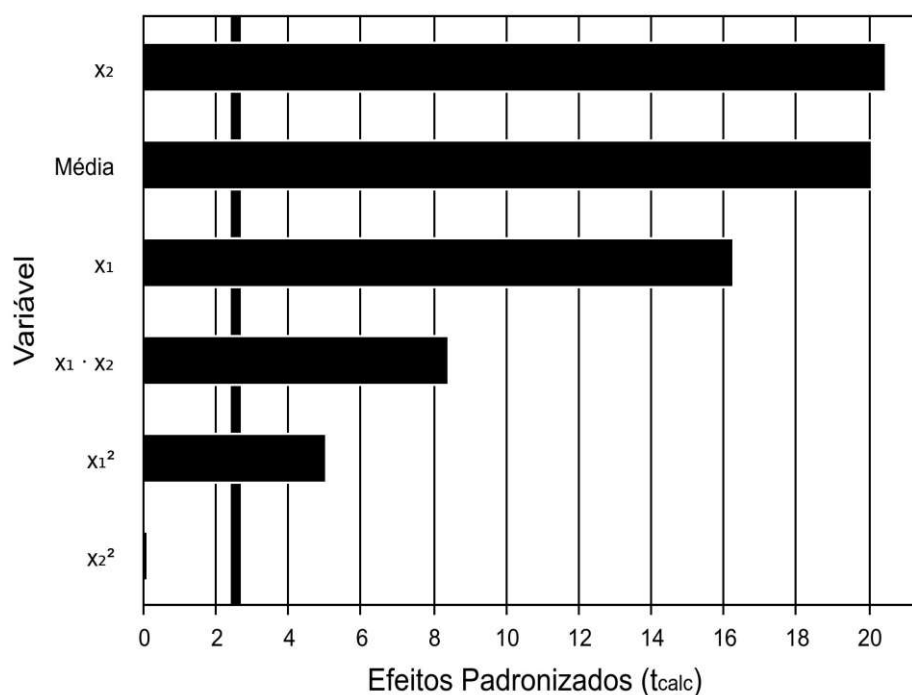
Onde:

Q = Razão de adsorção;

X₁ = massa de carvão (codificada);

X₂ = concentração do corante (codificada).

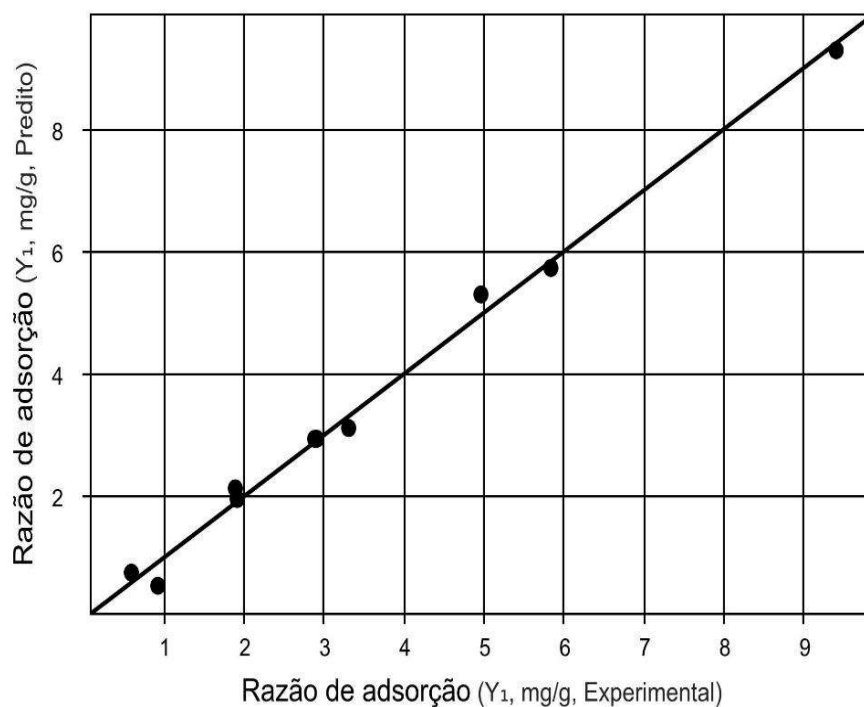
Adicionalmente, foi criado um diagrama de Pareto Gráfico 1, para destacar as variáveis e suas interações que têm maior impacto no processo de adsorção. Portanto, com base no valor p de baixa correlação e na análise do gráfico de Pareto, pode-se observar que a concentração de azul de metileno (X₂) é a variável independente com maior impacto estatístico na resposta analítica, seguida pela qualidade do carvão (X₁) usado no experimento.

Gráfico 1 – Contribuição das variáveis para a razão de adsorção

Fonte: Próprio autor (2025).

Portanto, com base no valor p de baixa correlação e na análise do gráfico de Pareto, pode-se observar que a concentração de azul de metileno (X_2) é a variável independente com maior impacto estatístico na resposta analítica, seguida pela qualidade do carvão (X_1) usado no experimento.

Como mostrado no gráfico de predição (Gráfico 2), os dados experimentais exibem uma excelente correlação com os valores preditos do modelo, conforme indicado pela proximidade ou pelo alinhamento dos pontos sobre ou acima da diagonal de referência.

Gráfico 2 – Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção

Fonte: Próprio autor (2025).

A tabela 11, a seguir, fornece os resultados ANOVA para a razão de adsorção, que contém informações sobre a significância estatística das variáveis fatoriais e interações incluídas no modelo, bem como os efeitos dos fatores.

Tabela 11 – Resultado da razão de adsorção das amostras por ANOVA

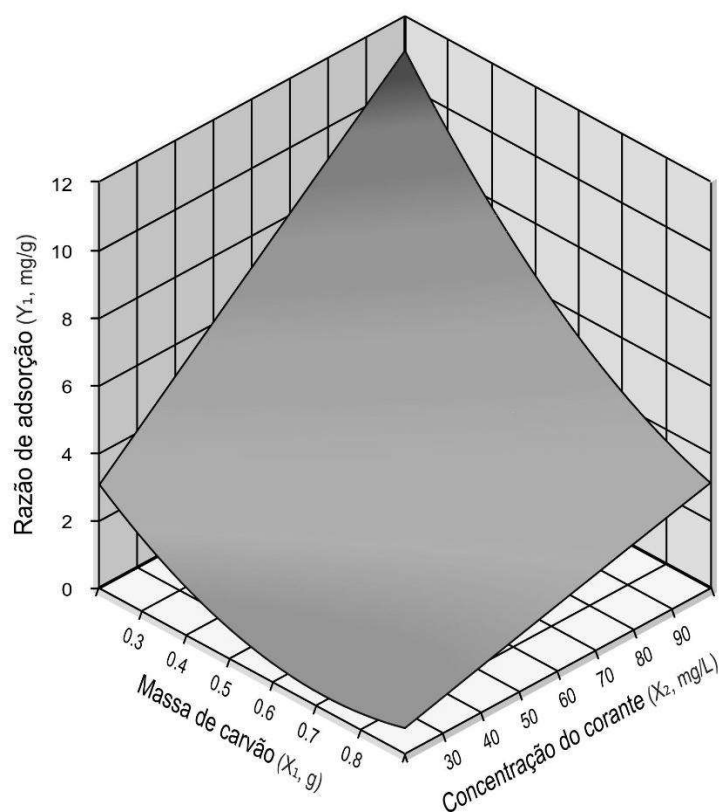
Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	63,2	5	12,6	156,50	0,00002
Resíduos	0,40	5	0,1	-	-
Falta de Ajuste	0,4	3	0,1	722	0,00138
Erro puro	0	2	0	-	-
Total	63,70	10	-	-	-

Fonte: Próprio autor (2025).

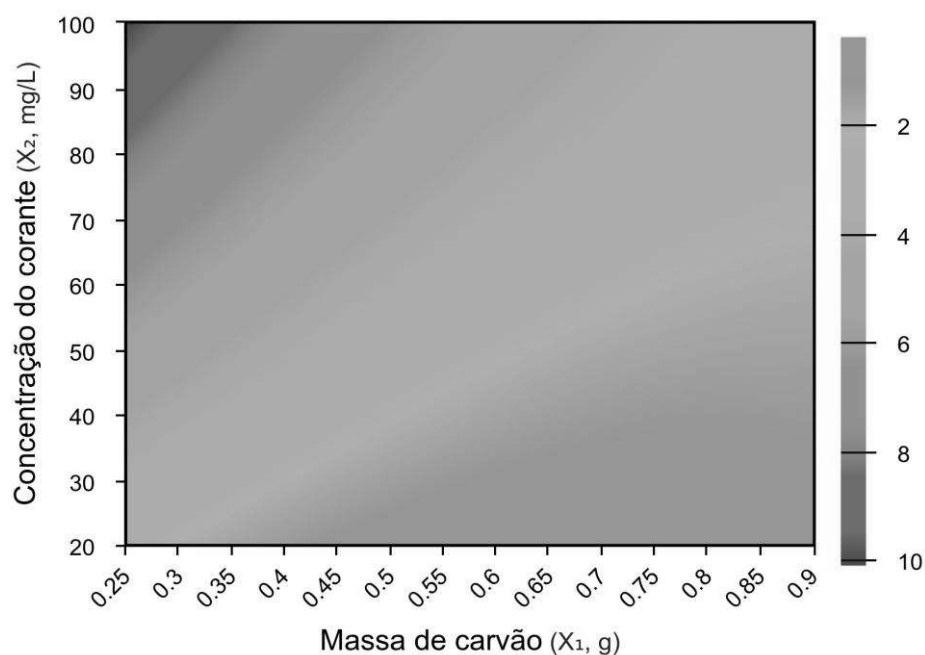
Visto isso, o valor obtido para o coeficiente de determinação R^2 no teste ANOVA para o modelo de adsorção obtido foi 99,36%, o que é um resultado altamente satisfatório. Esse nível de R^2 significa quanto mais próximo da totalidade, maior a capacidade com que o modelo explicou a variação ajustada, o que indica a excelente qualidade do ajuste do modelo à realidade observada.

Os Gráficos 3 e 4 apresentam a relação entre as variáveis massa de carvão X_1 , concentração do corante X_2 e razão de adsorção Q . As amostras com maior eficácia na adsorção são assinaladas em tons de vermelho no gráfico, ao passo que a cor verde indica a até então menor capacidade de adsorção.

Gráfico 3 – Relação tridimensional entre a razão de adsorção e as variáveis



Fonte: Próprio autor (2025).

Gráfico 4 – Relação entre Razão de Adsorção x Variáveis independentes

Fonte: Próprio autor (2025).

Desta forma, ao observar o gráfico, é possível perceber que o carvão ativado se destaca na eficiência de todas as massas em questão, proporcionando ainda um melhor desempenho quando a massa utilizada é menor. Ademais, quanto maior é a concentração de azul de metileno, maior a razão de adsorção do carvão produzido a 650 °C.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, a análise realizada nas amostras de biomassa testadas e caracterizadas foi bastante satisfatória em relação às referências bibliográficas sobre o assunto. Este estudo mostra que o processo de adsorção do carvão ativado produzido pode ser de viabilidade econômica e de produção para o comércio, uma vez que a matéria-prima é abundante.

O reaproveitamento da poda de buriti através do processo de pirólise mostrou-se muito promissor na produção de carvão ativado e os resultados alcançados foram satisfatórios. A biomassa estudada apresentou baixo teor de umidade (8,1%) e alto teor de voláteis (79,9%), o que favorecerá um processo de pirólise mais eficiente e com menor demanda energética. Esses atributos fortalecem o potencial desse resíduo como matéria-prima economicamente viável para produção de carvão ativado.

Além disso, a pirólise da poda de buriti resultou em carvões com características desejáveis, tornando o processo ainda mais atrativo. Um dos fatores essenciais para garantir uma maior eficiência na adsorção é a baixa umidade do carvão ativado, e os resultados obtidos confirmam que esse material atende a esse requisito.

O carvão ativado obtido a 650 °C apresentou a maior taxa de adsorção (9,40 mg/g) utilizando a quantidade mínima de massa de carvão experimentada (0,30 g). Além disso, o processo termoquímico apresentou bons rendimentos, superiores a 20%, o que está de acordo com os valores encontrados na literatura.

Portanto, este estudo demonstra que a poda de Buriti pode ser reaproveitada por meio da produção de carvão ativado, sugerindo que esta é uma solução eficaz e sustentável. Dada a ampla distribuição dessa biomassa na região do Cerrado brasileiro, convertê-la em carvão ativado não apenas reduziria o descarte inadequado, mas também aumentaria o valor do material. Além disso, seu potencial para aplicação no tratamento de água e na recuperação ambiental abre novas oportunidades econômicas, tornando essa abordagem ainda mais promissora.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marlon Brando Bezerra de. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico. 2008. 167 f.** 2008. Tese de Doutorado. Tese (Mestrado)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ASTM D3173-87. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass, Society of Testing Materials International.** West Conshohocken, 2003.

ASTM D3174-04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke.** West Conshohocken, 2004.

ASTM D3175-07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal.** West Conshohocken, 2007.

BARROS, Talita Delgrossi; JARDINE, José Gilberto. **Buriti - Portal Embrapa.** 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materias-primas/buriti>. Acesso em: 28 maio 2024.

CARRAZZA, Luis Roberto et al. **Manual tecnológico de aproveitamento integral do fruto e da folha do Babaçu.** 2012.

CHAVES, Antonio et al. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DA MADEIRA E CARVÃO VEGETAL DE CLONES DE Eucalyptus spp. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, 2013.

CLAUDINO, Andréia et al. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes.** 2003.

CZAJCZYŃSKA, D. et al. Potencial dos processos de pirólise no setor de gerenciamento de resíduos. **Ciência térmica e progresso da engenharia**, v. 3, p. 171-197, 2017.

DE AGUIAR LINHARES, Felipe; MARCÍLIO, Nilson Romeu; MELO, Pedro Juarez. 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, p. 74-79, 2016.

DE COSTA, Patrícia D.; FURMANSKI, Luana M.; DOMINGUINI, Lucas. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015.

DE OLIVEIRA, Terezinha Marisa Ribeiro; AMARAL, Carmem Lúcia Costa. OFICINA SOBRE COMPOSTAGEM: ESTUDO DE CASO SOBRE A EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM UMA ESCOLA ESTADUAL DE SÃO PAULO. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 17, n. 51, p. 405-425, 2024.

DE SOUZA, Cristiele Costa. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ADSORVENTES PARA REMOÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS EM MEIOS AQUOSOS**. 2021.

DIONIZIO, A. F. **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

DO VALE, Ailton Teixeira et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

FARINHAQUE, Roberto. " Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e aspectos gerais de combustão. 1981.

FERNANDES, Iara J. et al. Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa. **6º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, p. 1-9, 2015.

FROELICH, Paulo Leandro; MOURA, Angela. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 13-32, 2014.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

GUIMARÃES, Munique Gonçalves et al. Green energy technology from buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) for Brazilian agro-extractive communities. **SN Applied Sciences**, v. 3, p. 1-13, 2021.

GUIMARÃES, Márcio James Soares. **Contribuições do design para o desenvolvimento sustentável da produção artesanal**. 2014. 139 f. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Design de Produtos)-Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Maranhão, São Luís.

HOFFMANN, Bettina Susanne. O ciclo combinado com gaseificação integrada ea captura de CO₂: uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo. **S. I.: sn**, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Buriti. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/buriti/br>. Acesso em: 27 jan. 2025.

LÔBO, Ranyere do Nascimento. Degradação térmica de podas de árvores (*Syzygium Cumini*) visando a produção de carvão ativado para uso industrial. 2021.

MAVAIEIE, Paulo Augusto; BENETTI, Antônio Domingues. Remoção de carbono orgânico dissolvido de águas filtradas com tratamento complementar por pré-oxidação com ozônio e adsorção em carvão ativado. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 6, p. 989-1001, 2021.

MURILLO, R. et al. Production and Application of Activated Carbons Made from Waste Tire. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 18, p. 7228–7233, 1 ago. 2005.

NUNES, Luís; PATRÍCIO, Maria Sameiro; CORTEZ, José Paulo. Manutenção de árvores. **Manual de Boas Práticas em Espaços Verdes**, p. 111-117, 2010.

OLIVEIRA, Regina Maria Mendes et al. Óleo de buriti: Índice de qualidade nutricional e efeito antioxidante e antidiabético. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 1, p. 2-12, 2020.

PEDROZA, M. M. et al. Activated charcoal production from tree pruning in the Amazon region of Brazil for the treatment of gray water. **Journal of applied research and technology**, v. 19, n. 1, p. 49–65, 2021.

PEREIRA, Helder de Lucena; NASCIMENTO, Tatiane Maria do; SILVA, Adriano Lima da. **ASPECTOS TÉCNICOS DO PROCESSO DE PIRÓLISE**. p. 12, 2022.

RAMOS, Paulize H. et al. Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do defeito preto, verde, ardido (PVA) do café. **Química nova**, v. 32, p. 1139-1143, 2009.

PEREIRA, Thiago Voigtlander; SEYE, Omar. Caracterização física termica de biomassa local. **Cana**, v. 45, n. 43, p. 5-71, 2014.

PIO, Bruno Luiz de Assis. Comparação da distribuição geográfica potencial de Buriti, *Mauritia flexuosa* L.(araceae) gerada por diferentes modelos preditivos. 2010.

PIRES, A. A. F. **Resíduos lignocelulósicos para biocombustíveis sólidos: caracterização e termogravimetria aplicada**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

SAMPAIO, Maurício Bonesso et al. **Boas práticas de manejo para o extrativismo sustentável do buriti**. 2011.

SARAIVA, Nicholas; SAWYER, Donald. Análise do potencial econômico e socioambiental do artesanato do buriti em comunidades tradicionais nos Lençóis Maranhenses. **VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, Fortaleza**, v. 28, 2007.

SILVA, D. B.; MARTINS, R. C.; AGOSTINI-COSTA, T. S. Buriti. **Série Frutas Nativas** 2010. Edição Comemorativa dos 40 anos da SBF. Jaboticabal: Funep 2010. 52p; 21cm (Série Frutas Nativas, 3). (Segundo parágrafo da revisão bibliográfica).

SILVA, Janice da. Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos. 2009.

SILVÉRIO, Flaviano Oliveira; BARBOSA, Luiz Cláudio Almeida; PILÓ-VELOSO, Dorila. A pirólise como técnica analítica. **Química Nova**, v. 31, p. 1543-1552, 2008.

SOUZA, Evie dos Santos de. **Biodiversidade - Portal Embrapa**. 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/biodiversidade>. Acesso em: 1 jun. 2024.

SOUZA, Natália; VIANA, Deuzuita. Aspectos ecológicos e potencial econômico do buriti (*Mauritia flexuosa*). **Agrarian Academy**, v. 5, n. 09, 2018.

VELMURUGAN, V. Review of research and development on pyrolysis process. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 3679-3686, 2022.

VIEIRA, Ana Carla. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. **Universidade Estadual do Oeste do Paraná**, 2012.