



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

**CAMPUS PALMAS
CURSO ENGENHARIA CIVIL**

ANDRÉ TEIXEIRA CORRÊA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE MANGUEIRA (*MANGIFERA INDICA* L.)
VISANDO PRODUÇÃO DE MATERIAL ADSORVENTE**

PALMAS

2024

ANDRÉ TEIXEIRA CORRÊA

**APROVEITAMENTO DE PODA DE MANGUEIRA (*MANGIFERA INDICA* L.)
VISANDO PRODUÇÃO DE MATERIAL ADSORVENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel
do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza.

**PALMAS
2024**

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

C824a Corrêa, André Teixeira
 Aproveitamento de poda de mangueira (*Mangifera indica* L.)
 visando produção de material adsorvente. / André Teixeira Corrêa. –
 PALMAS, TO, 2024.
 46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, PALMAS, TO, 2024.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Produção de carvão ativado. 2. Pirólise de
biomassa. 3. Adsorção de corante químico. 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

ANDRÉ TEIXEIRA CORRÊA

APROVEITAMENTO DE PODA DE MANGUEIRA (*MANGIFERA INDICA* L.) VISANDO PRODUÇÃO DE MATERIAL ADSORVENTE.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Aprovado em: 21/06/2024

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador (IFTO)



Eng. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo



Dra. Elaine da Cunha Silva Paz (IFTO)

RESUMO

A carência de modelos eficientes para a administração dos resíduos provenientes da poda de árvores nas áreas urbanas tem gerado diversos problemas ambientais, sociais e econômicos devido à inadequada disposição desses materiais. Sendo a maioria dos resíduos de poda descartados em aterros e lixões, tal destinação acarreta custos elevados para os municípios, comprometimento de vastas áreas para sua disposição, aumento do risco de incêndios em aterros e terrenos baldios, degradação da paisagem e poluição do ar e da água. Além disso, a não utilização desse material representa um considerável desperdício de energia que poderia ser convertida em diversos outros produtos. Sendo assim, esse estudo tem como objetivo degradar termicamente resíduos de poda de mangueira (*Mangifera indica* L.) visando a produção de carvão ativado, apresentando uma possível destinação sustentável para os resíduos, além de uma alternativa para o aproveitamento do poder calorífico e do teor de matéria orgânica presente nas podas. Para isso, inicialmente os resíduos de podas de mangueira (*Mangifera indica* L.), foram caracterizados in natura, por meio dos testes de análise imediata, apresentando 5,7% de umidade, 83% de material volátil, 3,5% de teor de cinzas e 7,8% de teor de carbono fixo. Posteriormente, foi realizado o processo de pirólise, nas temperaturas de 550 °C e 650 °C, durante 30 minutos de degradação, a uma taxa de aquecimento de 30 °C/min. Em seguida foi realizado o balanço de massa do carvão ativado, obtendo-se um rendimento de 27,27% para a pirólise a 550 °C e 23,44% para a pirólise a 650 °C. De modo análogo a biomassa, foi realizada a análise imediata dos carvões ativados. Para o carvão produzido a 550 °C, os resultados foram: 5,3% de umidade, 24,1% de material volátil, 15,2% de teor de cinzas e 55,4% de teor de carbono fixo. Já para o carvão produzido a 650 °C, foram encontrados 4,9% de umidade, 19,5% de material volátil, 15,9% de teor de cinzas e 59,7% de teor de carbono fixo. Por fim, foi realizado o experimento de adsorção no carvão ativado produzido a 650°C, onde foi encontrado o valor máximo de 9,85 mg/g para a razão de adsorção.

Palavras-chave: Adsorção de corante químico, Aproveitamento de resíduos, *Mangifera indica* L., Pirólise de biomassa, Produção de carvão ativado.

ABSTRACT

The lack of efficient models for managing tree pruning waste in urban areas has led to a number of environmental, social and economic problems due to the improper disposal of these materials. As the majority of pruning waste is disposed of in landfills and dumps, this leads to high costs for municipalities, the commitment of vast areas for disposal, an increased risk of fires in landfills and vacant lots, degradation of the landscape and air and water pollution. In addition, not using this material represents a considerable waste of energy that could be converted into various other products. Therefore, this study aims to thermally degrade mango (*Mangifera indica* L.) pruning waste in order to produce activated carbon, presenting a possible sustainable destination for the waste, as well as an alternative for using the calorific value and organic matter content of the prunings. To this end, the mango (*Mangifera indica* L.) pruning waste was initially characterized in natura using immediate analysis tests, showing 5.7% moisture, 83% volatile material, 3.5% ash content and 7.8% fixed carbon content. The pyrolysis process was then carried out at temperatures of 550 °C and 650 °C for 30 minutes of degradation at a heating rate of 30 °C/min. The mass balance of the activated carbon was then carried out, yielding 27.27% for pyrolysis at 550 °C and 23.44% for pyrolysis at 650 °C. Similarly to biomass, the activated charcoal was analyzed immediately. For the charcoal produced at 550 °C, the results were: 5.3% moisture, 24.1% volatile material, 15.2% ash content and 55.4% fixed carbon content. For charcoal produced at 650 °C, the results were 4.9% moisture, 19.5% volatile material, 15.9% ash content and 59.7% fixed carbon content. Finally, the adsorption experiment was carried out on activated carbon produced at 650°C, where a maximum value of 9.85 mg/g was found for the adsorption ratio.

Keywords: Adsorption of chemical dyes, *Mangifera indica* L., Production of activated carbon, Pyrolysis of biomass, Use of waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Mangifera indica</i> L.	15
Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos que foram realizados ao longo da pesquisa	21
Figura 3 - Amostra cortada.	22
Figura 4 - Estufa que foi realizada a secagem da biomassa	22
Figura 5 - Dessecador	23
Figura 6 - Reator de leito fixo que foi utilizado no ensaio de pirólise	26
Figura 7 - Sistema de produção de vapor que foi utilizado no ensaio de pirólise	26
Figura 8 - Mesa de agitação (Shaker TE 141) que foi utilizada.	28
Figura 9 - Filtração das amostras.	29
Figura 10 - Espectrofotômetro utilizado.	29
Figura 11 - Solução pré e pós-filtração.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis e níveis que foram empregados no ensaio de adsorção.....	30
Tabela 2 - Quantidade de carvão e concentração do corante para o ensaio de adsorção.....	31
Tabela 3 - Resultados e comparativo da análise imediata da biomassa.	32
Tabela 4 - Dados dos balanços de massa e rendimento do carvão.	33
Tabela 5 - Resultados e comparativo da análise imediata dos carvões ativados.	34
Tabela 6 - Resultados do ensaio de adsorção.....	36
Tabela 7 - Coeficientes de regressão para definição da capacidade máxima de adsorção.....	36
Tabela 8 - Análise de variância para a razão de adsorção	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama de Pareto da capacidade máxima de adsorção do carvão.....	37
Gráfico 2 - Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção	38
Gráfico 3 - Superfície tridimensional para a razão de adsorção e as variáveis	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
3. JUSTIFICATIVA	13
4. OBJETIVOS	13
4.1. Objetivo geral	13
4.2. Objetivos específicos	14
5. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
5.1. <i>Mangifera indica</i> L., histórico e morfologia	14
5.2. Resíduos sólidos urbanos	16
5.3. Resíduos de poda urbana	17
5.4. Carvão ativado a partir de biomassa.....	18
5.5. Degradação térmica.....	19
6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
6.1. Coleta e preparação da amostra.....	21
6.2. Caracterização da biomassa.....	22
6.2.1.Umidade.	23
6.2.2.Teor de cinzas.	24
6.2.3.Material volátil.	24
6.2.4.Teor de carbono fixo.	25
6.3. Pirólise da poda de mangueira (<i>Mangifera indica</i> L.).....	25
6.3.1Balanço de massa.	27
6.4. Caracterização do carvão obtido.....	27
6.4.1.Umidade.	27
6.4.2.Teor de cinzas.	27
6.4.3.Material volátil.	27
6.4.4.Teor de carbono fixo.	27

6.4.5. Adsorção.....	28
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
7.1. Caracterização da biomassa da poda da <i>Mangifera indica</i> L.....	31
7.2. Balanço de massa.....	33
7.3. Caracterização do carvão ativado	34
7.4. Adsorção.....	35
7.4.1.Resposta do planejamento experimental: Razão de adsorção (Q).....	36
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

A poda na arborização urbana tem como objetivo principal garantir que as árvores desenvolvam uma forma adequada ao longo do seu crescimento, eliminando ramos que estejam mortos, danificados, doentes ou infestados por pragas. Além disso, visa remover partes da árvore que possam representar riscos à segurança das pessoas e também eliminar elementos que interfiram ou causem danos duradouros às edificações e aos equipamentos urbanos (São Paulo, 2019).

Contudo, na falta de uma gestão adequada, os resíduos provenientes da poda urbana passam a representar um problema, tendo em vista o grande volume e a destinação inadequada (Correia *et al.*, 2022).

Segundo Cortez (2011), a maioria dos resíduos de arborização urbana, constituinte por podas e cortes de árvores, é depositada em aterros e lixões. Tal descarte resulta na emissão de metano, um gás com potencial de efeito estufa 24 vezes maior que o do dióxido de carbono, na ocupação de grandes áreas dos aterros, na contaminação do solo e dos aquíferos subterrâneos, pelo chorume gerado no processo de decomposição, assim como na atração de pragas e vetores (Planares, 2022).

Além disso, a disposição de resíduos de podas em aterros sanitários, apesar de ser uma prática comum em várias cidades brasileiras, impede o aproveitamento do poder calorífico e do teor de matéria orgânica presente nas podas (Vale; Marinho; Vale, 2016).

Segundo Lima *et al.* (2012), uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos de poda urbana é a produção de carvão ativado, que é um material com grande capacidade de adsorção, sendo eficiente e muito utilizado para o tratamento de água e de efluentes. Entretanto, a fabricação desse material adsorvente na maioria das vezes é de alto custo devido à origem e o valor da matéria-prima (Baccar *et al.*, 2009).

Nesse sentido, o presente trabalho pretende avaliar a eficácia da utilização de podas de mangueira (*Mangifera indica* L.) para a produção de carvão ativado por meio do processo de pirólise, apresentando uma possível destinação sustentável para os resíduos, além de uma alternativa de matéria-prima de baixo custo para a produção de material adsorvente e sua aplicação na remoção de corante químico em meio aquoso.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

A falta de modelos eficazes para a administração dos resíduos de podas da arborização urbana, tem gerado diversos problemas sociais, ambientais e econômicos resultantes da disposição inadequada desses materiais (Chaluppe, 2013). Além disso, estes resíduos são muitas vezes subaproveitados do ponto de vista das suas potencialidades para valorização energética (Pereira, 2013). Diante desse contexto, a busca por alternativas sustentáveis de descarte e aproveitamento dessa biomassa se torna essencial.

Nesse sentido, seria viável e eficiente a produção de material adsorvente a partir de resíduos de podas de mangueira (*Mangifera indica* L.)?

3. JUSTIFICATIVA

Conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil, realizado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), em 2022 foram geradas 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Os resíduos orgânicos, constituídos basicamente por restos de alimentos e resíduos de podas e jardim, representam metade dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil (Embrapa, 2021). O grande volume da fração orgânica reforça a importância de se adotar formas de aproveitar estes resíduos evitando seu descarte indevido.

Segundo Lima *et al.* (2012), uma possível destinação para os resíduos de poda urbana é a produção de carvão ativado. Por apresentarem propriedades adsorptivas, os carvões ativados podem ser utilizados em diversas finalidades, como: para purificar, desintoxicar, desodorizar, filtrar, descolorir, entre outros (Rocha, 2006). Com base nisso, a pesquisa busca dar uma utilização para os resíduos de poda de *Mangifera indica* L., transformando-os em um produto de maior valor agregado que é o carvão ativado.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo geral

Aplicar o processo de degradação térmica de podas de mangueira (*Mangifera indica* L.) visando a obtenção de material adsorvente.

4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar as podas de mangueira (*Mangifera indica* L.) in natura;
- Efetuar a pirólise da biomassa em reator de leito fixo para a produção de carvão ativado
- Realizar a remoção de corante químico em carvão ativado produzido nessa pesquisa.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. *Mangifera indica* L., histórico e morfologia

A mangueira (*Mangifera indica* L.) é uma árvore frutífera pertencente à família Anacardiaceae, nativa do Sudeste Asiático, mais precisamente na Índia, sendo cultivada há mais de quatro mil anos nesta região. Foi introduzida no Brasil no século XVI pelos portugueses e atualmente é uma das espécies frutíferas mais cultivadas nas regiões tropicais do país, em virtude do clima favorável para seu desenvolvimento (Lorenzi *et al.*, 2006).

Historicamente, no Brasil, a produção de mangas era conduzida de maneira extensiva, comumente envolvendo o plantio disperso em locais como quintais e áreas de vales em pequenas propriedades. Isso resultava na formação de bosques de mangueiras de crescimento espontâneo, que eram tradicionalmente cultivados em várias regiões (Silva; Correia, 2021).

A *Mangifera indica* L. (Figura 1) é uma árvore de tamanho médio a alto, com a capacidade de atingir até 30 metros de altura. Apresenta copa arredondada e simétrica, variando de baixa e densa a ereta e aberta, ocasionalmente assumindo uma forma piramidal. Suas folhas são predominantemente lanceoladas, com uma textura coriácea, e medem normalmente de 15 a 40 centímetros de comprimento e 1,5 a 4,0 centímetros de largura (Neto, 2021).

Figura 1 - *Mangifera indica* L.



Fonte: Autor (2024)

A mangueira produz tanto flores masculinas quanto flores hermafroditas, que geralmente têm cerca de 6 milímetros de tamanho e são pentâmeras. O fruto da *Mangifera indica* L. é uma drupa, que pode assumir formatos que vão desde arredondados até alongados, e o seu peso pode variar de algumas gramas a até 2 quilogramas, dependendo da variedade. A casca do fruto pode exibir colorações que vão do verde ao amarelo ou vermelho. A polpa, em geral, é amarelada e oferece uma ampla gama de sabores, bem como uma quantidade considerável de fibras, cuja quantidade pode variar dependendo da variedade. No centro da polpa encontra-se o caroço, o qual é a semente, e o seu tamanho e forma variam conforme a variedade (Neto, 2021).

As exportações de manga brasileira atingiram níveis recordes em 2023, gerando uma receita aproximada de US\$ 315 milhões. Esse valor ultrapassou os US\$ 249 milhões de 2021, o ano mais lucrativo até então. Os volumes exportados aumentaram 15% em relação ao ano anterior, totalizando cerca de 266 mil toneladas. Aproximadamente 93% da manga exportada pelo país foi proveniente do Vale do São Francisco, na região Nordeste, com destaque para os estados da Bahia e Pernambuco, que responderam por 47,36% e 45,42% das exportações,

respectivamente. O restante veio dos estados de São Paulo (3,25%), Rio Grande do Norte (2,54%) e Ceará (0,79%) (Embrapa, 2024).

5.2. Resíduos sólidos urbanos

Conforme a Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduo sólido é caracterizado como qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante de ações humanas em sociedade, o qual o destino se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, no estado sólido ou semissólido.

A norma ABNT NBR 10004:2004, por sua vez, define os resíduos sólidos como todo resíduo sólido e semissólido originário de atividades industriais, comerciais, domésticas, agrícolas, hospitalares, de serviços e varrição. Sendo incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) podem ser classificados quanto à sua origem e quanto a sua periculosidade, como consta no Art. 13 da PNRS (BRASIL, 2010). Em relação à origem, os resíduos podem ser divididos em domiciliares, de limpeza urbana, resíduos da construção civil, de estabelecimentos comerciais, da saúde, serviços de transporte, mineração, de atividades agrossilvopastoris e de serviços de saneamento básico. Quanto à periculosidade são enquadrados em não perigosos; e perigosos, que representam risco à saúde pública ou à qualidade ambiental por conta de características como inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade (Brasil, 2010).

A norma ABNT NBR 10004:2004, em contrapartida, classifica os resíduos perigosos, que são aqueles que apresentam características inflamatórias, corrosivas, reativas, tóxicas e patogênicas como resíduos classe I e os resíduos não perigosos são classificados como classe II, esses são subdivididos em classe II A, que são os resíduos não inertes, caracterizados por não apresentarem propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, e classe II B, sendo os resíduos inertes.

Assim, segundo os critérios de riscos estabelecidos pelo PNRS, os resíduos de poda de árvores quanto à periculosidade são classificados como não perigosos e do tipo resíduo de limpeza urbana. Pela ABNT, os resíduos de poda urbana classificados como Classe II não inertes.

5.3. Resíduos de poda urbana

A origem da palavra "poda" vem do latim "putare", cujo sentido significa limpar, cortar, derramar e desbastar. A poda, realizada de forma manual ou mecânica, consiste em procedimentos simples que se resumem na supressão e corte de várias partes das plantas, incluindo caules, ramos, folhas, raízes, flores e frutos. Porém, no conceito fitotécnico, ou seja, na arte de cultivar plantas, a poda é considerada uma técnica cultural usada para modificar o crescimento natural da planta (Filho; Medina; Silva, 2013).

Na arborização, a poda pode assumir três tipos de finalidades: a poda de formação, cujo objetivo é criar uma copa simétrica e bem-ventilada, facilitando a manutenção e aumentando a resistência da planta; a poda de frutificação, que envolve a remoção de ramos produtivos em excesso para equilibrar o crescimento e a produção de frutas; e a poda de limpeza, que consiste na retirada de ramos mal posicionados, fracos, excessivamente vigorosos ou contaminados (Filho; Medina; Silva, 2013).

Contudo, na maioria das cidades brasileiras, as podas das árvores urbanas acontecem com uma frequência acima do necessário, com o objetivo de livrar a árvore da fiação elétrica e outras possíveis interferências, sendo alto o volume de resíduos de poda gerados por ano nas cidades (IPT, 2021).

De acordo com a Prefeitura de Palmas (2022), em 2021 foram recolhidas cerca de 10.500 toneladas de resíduos de podas na cidade. Somente no primeiro semestre de 2022, 5.772 toneladas foram recolhidas na capital. Esses resíduos coletados na capital, foram reaproveitados em indústrias locais ou para a produção de compostagem.

Entretanto, essa prática não acontece na maioria das cidades do Brasil. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2020), em 2020 foi levantada a existência de apenas 44 unidades de manejo de galhadas e podas e 73 usinas de compostagem em todo o Brasil. Essas unidades receberam, respectivamente, 142.625,1 toneladas e 304.637,3 toneladas de resíduos orgânicos no referido ano, em comparação com um total de 57.010.162,1 toneladas destinadas a aterros sanitários, aterros controlados e lixões.

Os resíduos sólidos derivados das podas de árvores são descartados em sua maioria diretamente em aterros sanitários e lixões a céu aberto, contribuindo para a produção de metano, contaminação do solo e dos lençóis freáticos, além de atração de pragas e vetores (Cortez, 2011).

Tais resíduos, não aceitam compactação, apresentando grande volume, reduzindo a capacidades dos aterros e necessitando maiores custos de operação (Silva *et al.*, 2009). Também há a possibilidade de ocorrer incêndios ocasionados pela má distribuição desses materiais (Fernandes *et al.*, 2001).

Assim, quando esses resíduos se acumulam de forma inadequada, não contribuem apenas para questões de poluição, mas também representam um desperdício de matéria orgânica que poderia ser reaproveitada (Baratta; Júnior; Magalhães, 2010). Dentre os resíduos sólidos urbanos produzidos, os resíduos de poda e manutenção das áreas vegetadas de espaços públicos urbanos, tem se apresentado particularmente de difícil gestão (Passaglia; Coelho; Anater, 2022).

Segundo Neves (2019), os resíduos de podas de arborização urbana apresentam um grande potencial de aproveitamento ou reaproveitamento. Para tanto o desenvolvimento do estudo e da investigação de processos do material renovável é imprescindível.

5.4. Carvão ativado a partir de biomassa

As fontes de energia renovável têm despertado um interesse crescente entre pesquisadores devido aos desafios ambientais atuais, como as mudanças climáticas, a poluição e a diminuição acentuada na disponibilidade de recursos energéticos fósseis. Nesse contexto, a biomassa surge como uma alternativa renovável para diversificar a matriz energética do país (Yanik *et al.*, 2007).

Definida como toda matéria orgânica, seja de origem animal, vegetal ou microrganismos, que pode ser convertida em energia ou bioenergia, a biomassa se apresenta como uma boa opção energética, pois é renovável e gera baixas quantidades de poluentes (Pedroza *et al.*, 2017).

É reconhecido que a biomassa apresenta um grande potencial para se resolver alguns problemas energéticos e ambientais no mundo, em comparação a outras fontes de energia limpa. Essa energia contida na biomassa pode ser utilizada por meio

de uma degradação termoquímica para se produzir produtos com um maior valor agregado, como o carvão ativado (Basu, 2013).

Carvão ativado é o nome de um extenso grupo de materiais que possuem alto grau de porosidade e, conseqüentemente, extensa área superficial interna, com propriedades adsorptivas de caráter físico e químico. Muitos materiais podem ser utilizados como precursores, especialmente biomassa (Rimoli *et al.*, 2019).

Por apresentarem propriedades adsorptivas, os carvões ativados são utilizados para purificar, desintoxicar, desodorizar, filtrar, descolorir ou modificar a concentração de uma infinidade de materiais líquidos e gasosos, sendo essas aplicações de grande interesse em vários setores econômicos em diversas áreas, como: alimentícia, farmacêutica, química, petrolífera, mineração, e principalmente, no tratamento de água potável, industrial e do ar atmosférico (Rocha, 2006).

Carvões ativados podem ser preparados de diversos materiais orgânicos que apresentam alto teor de carbono e baixo teor de cinzas, como a madeira e o carvão (Muller, 2008).

Nesse sentido, a decomposição termoquímica de biomassa residual emerge como um processo altamente vantajoso tanto do ponto de vista financeiro quanto ambiental. Além disso, ela se revela uma alternativa notável para a utilização de recursos naturais, com grande potencial para a criação de valor e a obtenção de produtos químicos renováveis, podendo, inclusive, substituir os petroquímicos tradicionalmente empregados na indústria química (Pedroza *et al.*, 2017).

5.5. Degradação térmica

A conversão de biomassa em energia é realizada utilizando-se duas principais tecnologias de processo: termoquímica e bioquímica. Um dos principais métodos na abordagem termoquímica é a pirólise, que transforma a biomassa em bioprodutos de maior valor agregado em comparação ao estado inicial, tais como bio-óleo, carvão ativado, extrato ácido e bio-gás (Machado, 2019).

A pirólise pode ser caracterizada como a decomposição térmica de matéria orgânica ocorrendo em ambientes com ausência parcial ou completa de um agente oxidante, ou em um ambiente com uma concentração de oxigênio baixa capaz de evitar a gaseificação do material orgânico. A pirólise geralmente ocorre em uma faixa

de temperatura que varia de aproximadamente 400 °C até o ponto de transição para o regime de gaseificação (Pedroza *et al.*, 2010).

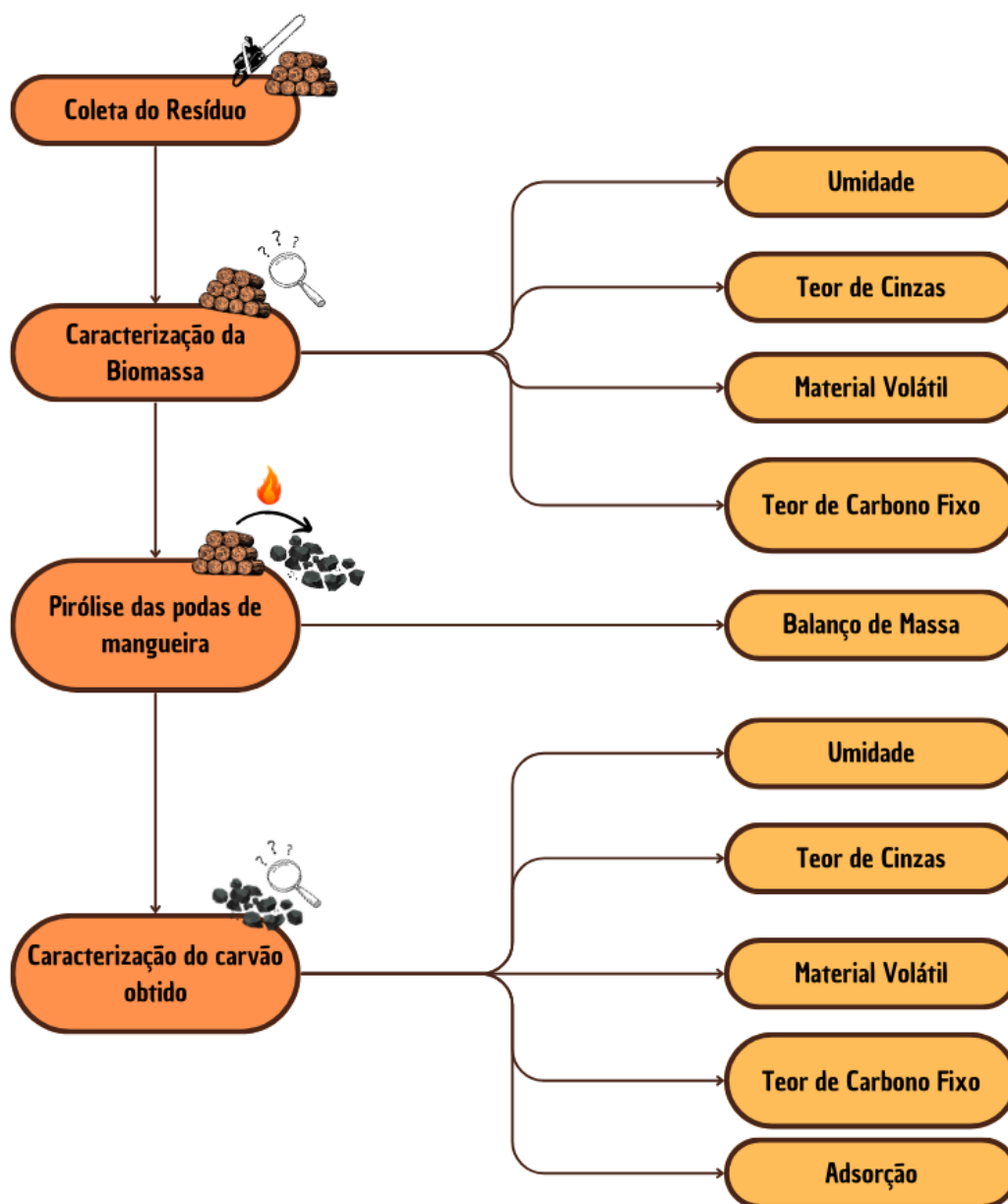
Há dois tipos de pirólise, a convencional e a pirólise rápida, que se distinguem em variáveis como a taxa de aquecimento, temperatura, tempo de permanência das fases sólida e gasosa, bem como os produtos desejados. Para a produção de carvão, o qual é o objetivo desse estudo, a ênfase é especialmente direcionada para a pirólise convencional (Pedroza, 2011).

Dentre as tecnologias com capacidade de conversão térmica de biomassa, a pirólise se destaca em virtude da sua grande flexibilidade, permitindo que o processo seja guiado na direção que mais favorecer a obtenção de um ou outro subproduto (sólido, líquido ou gasoso). A capacidade de produzir itens de maior valor agregado e especialidades químicas torna a pirólise uma escolha particularmente atrativa no cenário das atuais iniciativas em busca de fontes renováveis de energia (Gomez, 2002).

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os ensaios do presente estudo foram efetuados no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) localizado no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus Palmas. Nesta seção será apresentado os procedimentos de caracterização da amostra de biomassa, os processos empregados para a produção do carvão ativado a partir dos resíduos de poda da *Mangifera indica* L., além da caracterização do carvão ativado obtido. Os procedimentos que serão realizados estão ilustrados no fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos que foram realizados ao longo da pesquisa



Fonte: Autor (2024)

6.1. Coleta e preparação da amostra.

As amostras coletadas foram transportadas em caixas identificadas para o Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), no IFTO, *Campus* Palmas. Inicialmente, os resíduos de podas coletados foram cortados em peças de aproximadamente 2,5 cm (Figura 3), de modo a permitir a inserção no reator, e secos em estufa (Figura 4) a uma temperatura de 60°C.

Figura 3 - Amostra cortada.



Fonte: Autor (2024)

Figura 4 - Estufa que foi realizada a secagem da biomassa.



Fonte: Autor (2023)

6.2. Caracterização da biomassa.

Nessa etapa foram realizados procedimentos para se caracterizar a amostra in natura, foram determinados a umidade, o teor de cinzas, o material volátil, além do ter de carbono fixo da amostra de biomassa.

6.2.1. Umidade.

A obtenção do teor de umidade foi realizada de acordo com a norma ASTM D 3173-87. Nesse processo, foi pesado uma massa 1 g de poda de resíduo adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante previamente determinado. Em seguida, a amostra foi submetida a um aquecimento em uma estufa à uma temperatura de 105 °C durante 1 hora. Após esse período, o cadinho foi inserido em um dessecador (Figura 5) por 15 minutos e realizado a pesagem. Esse procedimento foi executado em triplicata, com isso, o teor de umidade foi obtido de acordo com a Equação 1, que está indicada a seguir:

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

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

B = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

Figura 5- Dessecador.



Fonte: Autor (2023)

6.2.2. Teor de cinzas.

Para a determinação do teor de cinzas foi empregado o procedimento descrito por Sanchez *et al.*, (2009). No procedimento, uma massa de aproximadamente 1 g de biomassa foi adicionada a um cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado. Após isso, sob uma temperatura de aproximadamente 710 °C, a amostra foi calcinada por 1 hora em um forno mufla da marca EDG Equipamentos, modelo WOne. Em seguida, o cadinho foi inserido em um dessecador por 60 minutos para o seu resfriamento e em seguida sua pesagem. O procedimento também foi realizado em triplicata, sendo o teor de cinzas definido de acordo com a norma ASTM D 2415:2020 e seus resultados determinados através da Equação 2, a seguir:

$$\text{Teor de Cinzas(\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

B = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.3. Material volátil.

Para a obtenção do teor de material volátil, foi utilizado o processo sugerido por Sanchez *et al.*, (2009), em que foi pesado cerca de 1 g de biomassa em um cadinho de porcelana com peso constante previamente determinado. A amostra foi submetida a um aquecimento em um forno mufla a uma temperatura de 850°C, na ausência de oxigênio por um período de 7 minutos. Como nos experimentos descritos acima, o processo também foi realizado em triplicata. Após isso, o teor de material volátil foi obtido utilizando a Equação 3:

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

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra (em gramas);

B = peso do cadinho + peso amostra pós-aquecimento na estufa (em gramas);

C = peso da amostra (em gramas).

6.2.4. Teor de carbono fixo.

Posteriormente, o teor de carbono fixo presente na biomassa, foi determinado a partir da Equação 4, descrita abaixo:

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade (\%)} - \text{Cinzas(\%)} - \text{Material Volátil (\%)}]$$

(Equação 4)

6.3. Pirólise da poda de mangueira (*Mangifera indica* L.).

A pirólise dos resíduos de poda de *Mangifera indica* L. foi realizada em um reator de leito fixo tubular de aço (Figura 6), de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. Para que a biomassa coletada possa ser introduzida no reator, ela foi cortada em peças de aproximadamente 2,5 cm e secas em uma estufa a uma temperatura de 60°C. O reator foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), o gás de arraste empregado na reação foi o vapor de água aquecido a uma faixa de temperatura de 127°C a 133°C em autoclave (Figura 7). O tubo, onde foi inserida a amostra de biomassa, foi percorrido por vapor de água por todo o seu comprimento do tubo, que conduziu os produtos gasosos gerados na pirólise para fora do leito. Na extremidade de saída, foi instalado um sistema de condensação para que parte dos vapores gerados na reação sejam convertidos em líquido. Nesse estudo, os valores adotados seguiram recomendações de Vieira (2000), Lenza (2021) e Filho (2023). Foram realizados dois testes de pirólise, nas temperaturas 650 e 550 °C. O tempo de reação e a taxa de aquecimento foram de 30 minutos e 30°C min⁻¹ respectivamente. Como resultado da pirólise, foi obtido o carvão ativado e o bio-óleo.

Figura 6- Reator de leito fixo que foi utilizado no ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2023)

Figura 7- Sistema de produção de vapor que foi utilizado no ensaio de pirólise.



Fonte: Autor (2023)

6.3.1. Balanço de massa.

O balanço de massa foi calculado segundo a massa que entrou e que saiu do reator. Desse modo, a equação que foi utilizada para a obtenção do balanço massa é expressa pela Equação 5:

$$M = M1 - M2 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

M = massa do carvão, em gramas;

M1 = massa final, em gramas;

M2 = massa do recipiente tarado, em gramas.

6.4. Caracterização do carvão obtido.

A caracterização do carvão ativado obtido no processo de pirólise foi efetuada de acordo com os processos descritos abaixo.

6.4.1. Umidade.

O teor de umidade do carvão foi determinado conforme o procedimento descrito no item 6.2.1, seguindo a norma ASTM D 3173-87.

6.4.2. Teor de cinzas.

O teor de cinzas do carvão foi obtido segundo o método de Sanchez *et al.*, (2009), descrito anteriormente no item 6.2.2, para a obtenção do teor de cinzas das podas de mangueira.

6.4.3. Material volátil.

O teor de material volátil do carvão foi determinado utilizando o método de Sanchez *et al.* (2009), descrito anteriormente no item 6.2.4.

6.4.4. Teor de carbono fixo.

O teor de carbono fixo foi calculado utilizando a equação apresentada no item 6.2.5 para a caracterização da biomassa.

6.4.5. Adsorção.

O ensaio de adsorção foi realizado em uma mesa agitadora orbital TE141, da marca Tecnal (Figura 8), com o carvão ativado, na forma de pó, obtido na temperatura de 650°C e taxa de aquecimento de 30°C min⁻¹.

Figura 8 - Mesa de agitação (Shaker TE 141) utilizada.



Fonte: Autor (2024)

A solução empregada no teste foi o corante Azul de Metileno, sendo utilizado um volume de 30 mL de solução em todos os testes. Posteriormente ao ensaio de adsorção, as amostras foram devidamente filtradas em papel analítico (Figura 9) e a concentração de azul de metileno resultante foi determinada em espectrofotômetro (Figura 10), utilizando um comprimento de onda de 660 nanômetros, escolhido por ser o valor característico que resulta na maior absorbância para o azul de metileno (Rosa; Rodrigues; Fátima, 2019). A Figura 11 ilustra o corante Azul de Metileno antes e após o processo de filtração em um dos ensaios.

Figura 9 - Filtração das amostras.



Fonte: Autor (2024)

Figura 10 - Espectrofotômetro utilizado.



Fonte: Autor (2023)

Figura 11 - Solução pré e pós-filtração.

Fonte: Autor (2024)

Para melhor interpretação dos resultados obtidos e correlacionar as diferentes variáveis envolvidas, foi usado um planejamento experimental do tipo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para avaliar os impactos de duas variáveis independentes, massa de carvão ativado e concentração do corante azul de metileno, no teste de adsorção. A Tabela 1 mostra os níveis dos fatores que foram empregados.

Tabela 1 - Variáveis e níveis que foram empregados no ensaio de adsorção.

Variável	Unidade	Código	Nível		
			-1	0	1
Massa de carvão ativado	g	X1	0,30	0,55	0,80
Concentração do corante Azul de Metileno	mg/L	X2	20	60	100

Fonte: Autor (2023)

Para a realização do experimento foi definida uma única resposta: a razão de adsorção (Q), foram realizados 11 ensaios, conforme indicado na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Quantidade de carvão e concentração do corante para o ensaio de adsorção

Ensaio	Variáveis	
	Massa de carvão ativado X1(g)	Concentração do corante X2 (mg/L)
1	0,30	20
2	0,80	20
3	0,30	100
4	0,80	100
5	0,30	60
6	0,80	60
7	0,55	20
8	0,55	100
9	0,55	60
10	0,55	60
11	0,55	60

Fonte: Autor (2023)

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da biomassa da poda da *Mangifera indica* L., dos ensaios de pirólise a 550°C e 650°C, além dos resultados da caracterização dos carvões ativados obtidos.

7.1. Caracterização da biomassa da poda da *Mangifera indica* L.

De modo a caracterizar a biomassa, foi realizado a análise imediata dos resíduos de podas de *Mangifera Indica* L. Os resultados desses ensaios estão dispostos na Tabela 3, que também traz um comparativo dos resultados deste estudo com outros trabalhos da literatura inseridos em contextos semelhantes, de modo a validar a consistência dos dados, identificando padrões, tendências ou até discrepâncias.

Tabela 3 - Resultados e comparativo da análise imediata da biomassa.

Variável analítica	Poda de <i>Mangifera Indica</i> L.		Poda de <i>Hymenaea courbaril</i>
	Autor (2024)	Ponte et al. (2019)	Vasconcelos (2023)
Umidade (%)	5,70	10,60	8,87
Material volátil (%)	83,00	74,30	69,47
Cinzas (%)	3,50	13,50	7,61
Carbono fixo (%)	7,80	12,20	14,05

Fonte: Autor (2024)

Conforme Almeida (2008), a biomassa é considerada adequada para processos termoquímicos quando apresenta teores de umidade inferiores a 10%. Desse modo, com um teor médio de umidade de 5,70%, a poda da *Mangifera indica* L. demonstra ser uma biomassa de excelente qualidade para a execução da pirólise.

Segundo McKendry (2002), a presença de cinzas reduz o poder calorífico superior e prejudica o processo de geração de energia; portanto, quanto menor o teor de cinzas, maior será o rendimento energético. Após a determinação do teor de cinzas da biomassa, obteve-se um valor médio de 3,50%, inferior ao registrado por PONTE (2019), que foi de 13,50%, e por Vasconcelos (2023), que apresentou 7,61%. Assim, o resultado do teor de cinzas indica que a biomassa possui um alto rendimento energético.

Conforme Hansted et al. (2016). Quanto maior o valor de Material volátil, maior o potencial para produção de energia. No ensaio realizado a biomassa da poda de *Mangifera indica* L apresentou um teor de material volátil de 83%, tal valor se encontra dentro do intervalo proposto por, Nakashima et al. (2014), que descreve que o teor de materiais voláteis é alto nos combustíveis de biomassa, podendo variar entre 76 - 86%.

De acordo com Costa et al. (2015), o teor de carbono fixo é uma medida que representa a quantidade de carbono presente em uma amostra de material que permanece após a remoção de substâncias voláteis e materiais inorgânicos durante um processo de aquecimento controlado. Ao comparar o teor de carbono fixo da

biomassa de 7,8% com os valores obtidos por Ponte (2019) e Vasconcelos (2023), de 12,2% e 14,05%, respectivamente, é possível perceber a proximidade dos resultados, constatando que os valores obtidos neste estudo estão em coerência com a literatura.

7.2. Balanço de massa

A Tabela 4 abaixo, apresenta o balanço de massa e o rendimento do carvão, após o processo de pirólise.

Tabela 4 - Dados dos balanços de massa e rendimento do carvão.

Temperatura de Pirólise (°C)	Massa do recipiente (g)	Massa recipiente + biomassa (g)	Massa da biomassa (g)	Massa recipiente + carvão (g)	Massa do carvão (g)	Rendimento do carvão (%)
550	189	266	77	210	21	27,27
650	189	253	64	204	15	23,44

Fonte: Autor (2024)

Após os ensaios de pirólise a 550°C e 650°C, foram obtidos rendimentos de aproximadamente 27,27% e 23,44%, respectivamente. Barros (2023), realizou a pirólise de podas de flamboyant (*Delonix regia*) sob as mesmas condições deste estudo a 550°C, obtendo um rendimento de 25,99%. Silveira (2023), por sua vez, executou a pirólise de podas de pequi (*Caryocar brasiliense*), também sob as mesmas condições deste estudo a 650°C e alcançou um rendimento de 24,50%.

Com isso, foi possível perceber que a eficiência produtiva encontrada neste trabalho é compatível com a literatura analisada e que o rendimento do carvão é inversamente proporcional à temperatura utilizada no processo de pirólise. Esse comportamento pode ser explicado com base nas afirmações de Pedroza *et al.* (2014), que indicam que à medida que a temperatura aumenta, maior é o grau de decomposição térmica da biomassa, resultando em um aumento das frações líquida e gasosa e, conseqüentemente, em um menor rendimento de carvão.

Dessa forma, com o rendimento médio constatado, uma tonelada de resíduos de poda de *Mangifera Indica* L, seria capaz de gerar cerca de 257,15 kg de carvão ativado produzido a 550 °C ou 221,04 kg de carvão processado a 650 °C.

Segundo Machado (2019), a empresa TOBASA, líder no Brasil na produção de carvão ativado a partir do endocarpo do coco de babaçu, atinge uma produção de 300 toneladas por mês, com preços variando de 5,00 a 12,00 R\$/kg dependendo da granulometria. Aplicando os rendimentos obtidos à realidade econômica, se vendida ao preço mínimo de 5,00 R\$/kg, a produção de 257,15 kg de carvão ativado produzido a partir de resíduos de poda de *Mangifera Indica* L resultaria em aproximadamente 1.285,75 R\$, enquanto a produção de 221,04 kg a 650 °C resultaria em cerca de 1.105,20 R\$. Por outro lado, se vendida ao preço máximo de 12,00 R\$/kg, os valores poderiam alcançar 3.085,80 R\$ e 2.652,48 R\$, respectivamente.

Esses números destacam o potencial econômico significativo do carvão ativado proveniente de resíduos de poda de *Mangifera Indica* L., especialmente quando comparado à produção e aos preços praticados pela TOBASA. Esse cenário sugere uma oportunidade promissora para a diversificação e expansão da produção de carvão ativado a partir de diferentes fontes vegetais, considerando a crescente demanda do mercado, tanto nacional quanto internacional.

7.3. Caracterização do carvão ativado

De modo análogo ao procedimento realizado com a biomassa, os carvões ativados produzidos nas temperaturas de 550°C e 650°C foram submetidos a testes de análise imediata, cujos resultados são apresentados na Tabela 5. Para fins de comparação e análise, a Tabela 5 inclui tanto os resultados deste estudo quanto os de outras pesquisas da literatura acadêmica.

Tabela 5 - Resultados e comparativo da análise imediata dos carvões ativados.

Variável analítica	Poda de <i>Mangifera Indica</i> L.		Poda de <i>Hymenaea courbaril</i>	
	Autor (2024)	Pereira (2022)	Vasconcelos (2023)	
Umidade (%)	5,30	4,90	3,43	3,54
Material volátil (%)	24,10	19,50	23,59	20,59
Cinzas (%)	15,20	15,90	16,53	19,13
Carbono fixo (%)	55,40	59,70	56,45	56,74

Fonte: Autor (2024)

Segundo Silva (2009), a capacidade de adsorção dos carvões é prejudicada pela presença de umidade, já que parte dos poros potencialmente disponíveis para o processo de adsorção é ocupada por moléculas de água. Segundo Marton (2002), o teor de umidade máximo de carvões ativados comerciais é de 10%, assim, os valores médios de teor de umidade dos carvões obtidos (5,30% e 4,90%) são considerados satisfatórios.

Conforme Scroder (2007), a presença de um teor excessivo de cinzas pode prejudicar o carvão, pois pode levar à obstrução dos poros do carvão ativado, reduzindo sua área superficial. Realizando uma breve comparação com os valores obtidos por Pereira (2022) e Vasconcelos (2023), de 16,53% e 19,13% respectivamente, pode-se perceber que os carvões provenientes da pirólise da poda de Mangifera indica L. a 550°C e 650°C apresentaram bons resultados de teor de cinza, 15,20% e 15,90%, respectivamente.

Segundo Firdaus *et al.* (2021), é esperado que o teor de material volátil do carvão ativado seja menor em comparação ao material precursor, pois durante a carbonização parte dos compostos voláteis e impurezas são eliminados. Redução que de fato ocorreu, já que a biomassa *in natura* apresentou um teor de material volátil de 83%, enquanto os carvões obtidos após o processo de pirólise apresentaram valores inferiores a 25%. Esses resultados são próximos aos obtidos por Pereira (2022) e Vasconcelos (2023), que encontraram teores de 23,59% e 20,59%, respectivamente.

O teor de carbono fixo no carvão, por sua vez, aumentou significativamente após a pirólise a 550°C, com um incremento de 710,26% em comparação com a biomassa *in natura*. Quando a pirólise foi realizada a 650°C, o aumento foi ainda maior, atingindo 765,38%. Isso demonstra que durante a pirólise, compostos termicamente degradáveis são liberados, enquanto os materiais mais resistentes ao calor se acumulam. Comparando os teores de carbono fixo dos carvões produzidos a 550°C e 650°C, que foram de 55,40% e 59,70%, respectivamente, com os valores encontrados por Pereira (2022) e Vasconcelos (2023), que registraram 56,45% e 56,74%, é possível perceber uma coerência com a literatura existente.

7.4. Adsorção

Os resultados do teste de adsorção do carvão ativado produzido a 650 °C estão dispostos na Tabela 6, que apresentam as razões de adsorção (Q) registradas.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de adsorção.

Ensaio	Variáveis		Razão de adsorção (mg/g)
	Massa de carvão ativado X1(g)	Concentração do corante X2 (mg/L)	
1	0,30	20	1,94
2	0,80	20	0,63
3	0,30	100	9,85
4	0,80	100	3,73
5	0,30	60	5,97
6	0,80	60	2,20
7	0,55	20	1,01
8	0,55	100	5,43
9	0,55	60	3,23
10	0,55	60	3,23
11	0,55	60	3,22

Fonte: Autor (2024)

7.4.1. Resposta do planejamento experimental: Razão de adsorção (Q)

Na Tabela 7, estão apresentados os coeficientes de regressão do modelo para a razão de adsorção (Q). Essa medida está relacionada à quantidade de corante retida em cada fração de carvão ativado, que foi separado durante o processo de filtração. Alcançar razões elevadas é o ideal, pois indicam uma eficácia maior de adsorção.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão para definição da capacidade máxima de adsorção.

Fatores	Coeficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	3,23	0,14	22,48	0,0000
x1	-1,87	0,11	-16,31	0,0000
x1 ²	0,84	0,18	4,74	0,0051
x2	2,57	0,11	22,46	0,0000
x2 ²	-0,03	0,18	-0,15	0,8851
x1.x2	-1,20	0,14	-8,59	0,0004

Fonte: Autor (2024)

Com isso, através do software, “Protimiza Experimental Design”, foi obtida a Equação 6:

$$\text{Capacidade de adsorção}(Q)=3,23 - 1,87 x_1 + 0,84 x_1^2 + 2,57 x_2 - 0,03 x_2^2 - 1,20 x_1.x_2$$

(Equação 6)

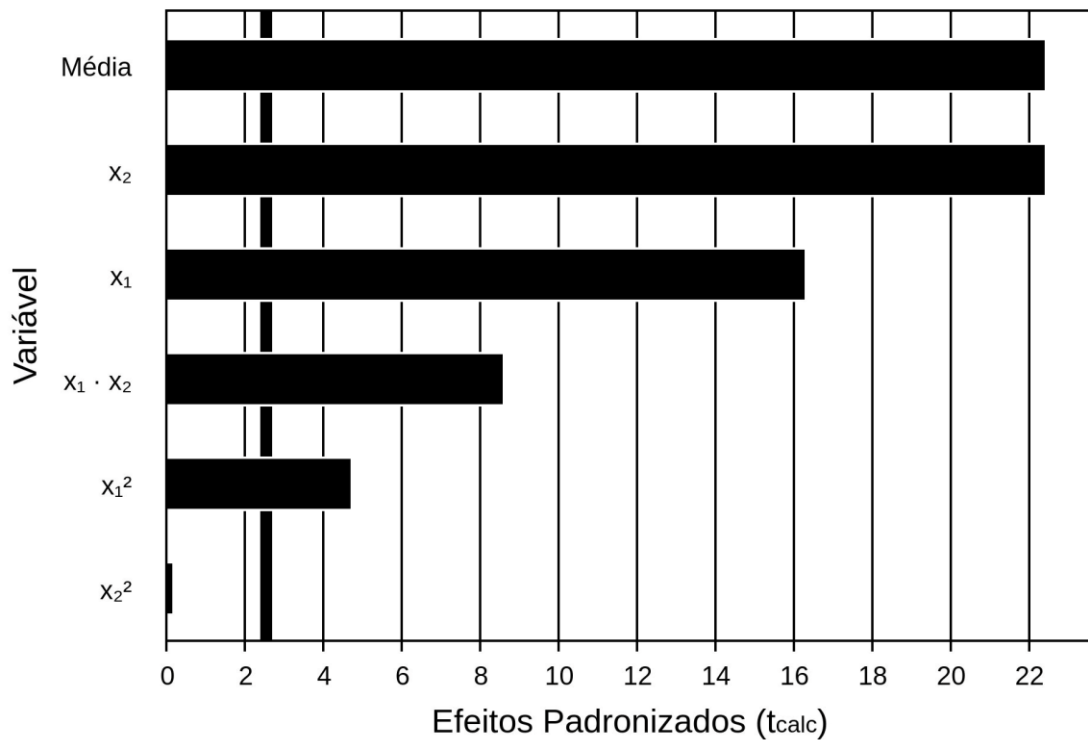
Onde:

x_1 = massa de carvão, em gramas;

x_2 = concentração do corante azul de metileno (mg/L).

Somado a isso, obteve-se também o gráfico de Pareto (Gráfico 1), que demonstra o grau de influência de cada variável na capacidade de adsorção. Com isso, percebe-se que as variáveis X_1 e X_2 , massa do carvão (g) e concentração do corante azul de metileno (mg/L), respectivamente, apresentam grande influência no resultado.

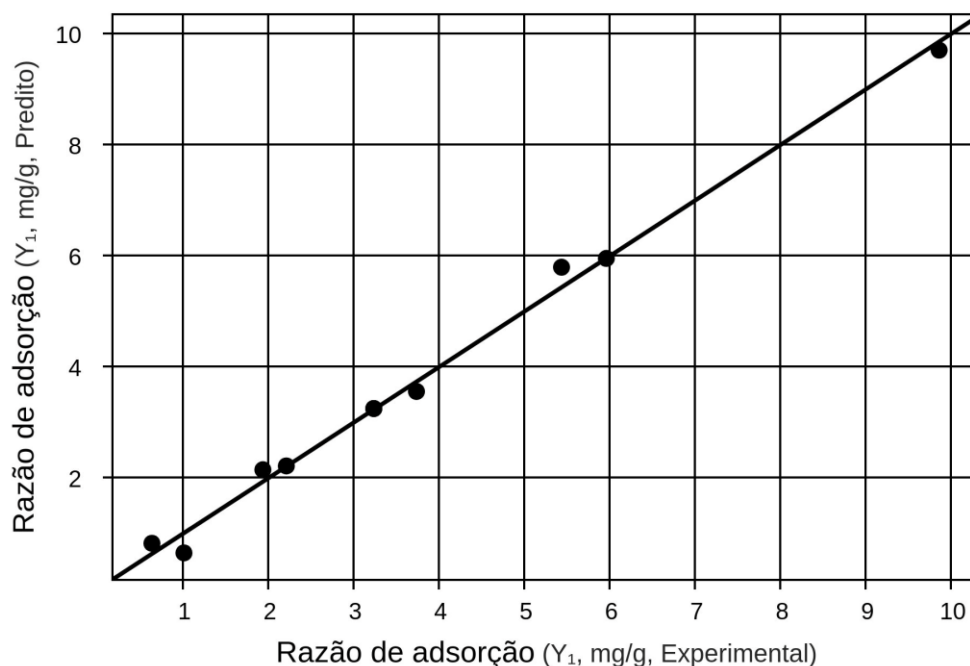
Gráfico 1 - Diagrama de Pareto da capacidade máxima de adsorção do carvão.



Fonte: Autor (2024)

O gráfico de predição (Gráfico 2) ilustra a relação entre os resultados encontrados no experimento e os valores previstos pelo modelo de regressão, sendo possível observar que o modelo desenvolvido apresenta uma aderência estatística satisfatória, pois os dados observados não exibem uma dispersão significativa, permanecendo próximos à linha diagonal.

Gráfico 2 - Gráfico de predição do modelo da razão de adsorção.



Fonte: Autor (2024)

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para a absorvância das amostras de carvão ativado na adsorção de azul de metileno estão resumidos na Tabela 8 abaixo.

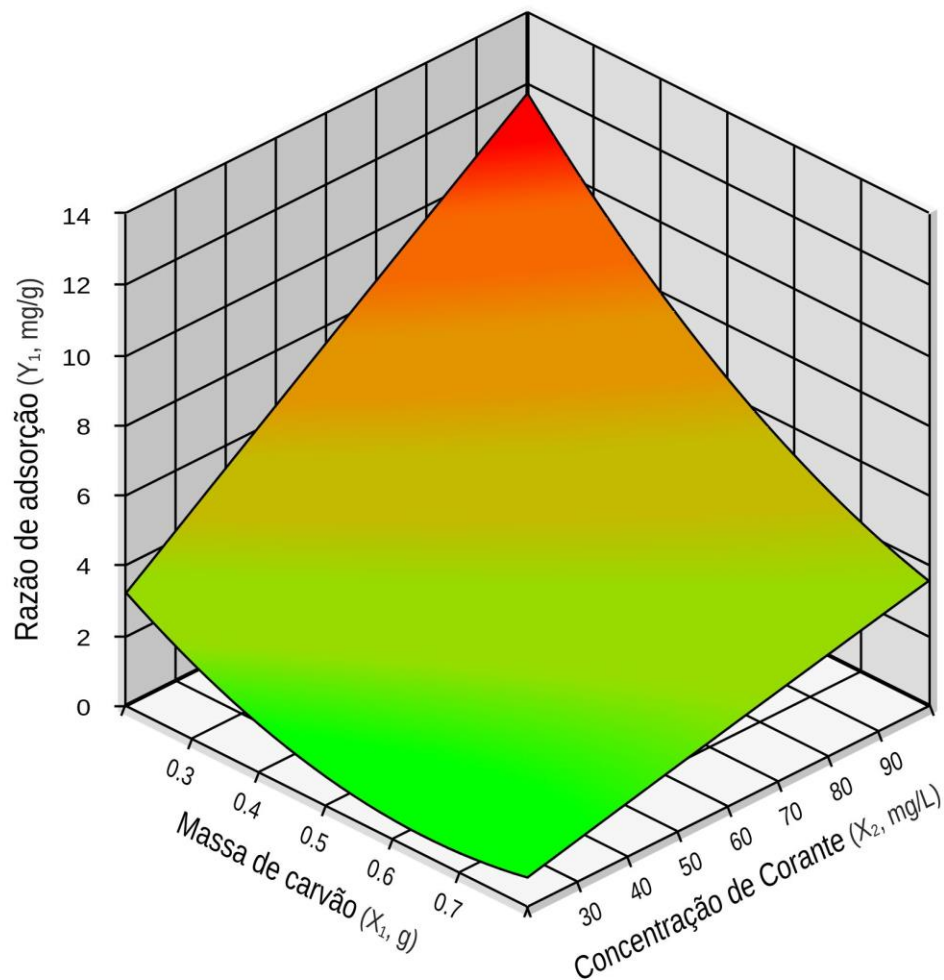
Tabela 8 - Análise de variância para a razão de adsorção.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calc}	p-valor
Regressão	68,3	5	13,7	173,6	0,00001
Resíduos	0,4	5	0,1		
Falta de Ajuste	0,4	3	0,1	13833,4	0,00007
Erro Puro	0	2	0		
Total	68,7	10			

Fonte: Autor (2024)

Por meio do teste de análise de variância (ANOVA), obteve-se um coeficiente de determinação (R^2) de 99,43%, indicando que o modelo teve um bom ajuste aos dados. No Gráfico 3 abaixo, é apresentada a superfície gerada por meio do planejamento experimental. É possível notar que a capacidade máxima de adsorção foi atingida em condições de baixa quantidade de massa de carvão e alta concentração de corante, como indicado pelas áreas destacadas em vermelho.

Gráfico 3 - Superfície tridimensional para a razão de adsorção e as variáveis.



Fonte: Autor (2024)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliando os valores obtidos nos ensaios de caracterização da amostra in natura da poda de *Mangifera indica* L., foi possível perceber que os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo estão próximos dos encontrados pela literatura. A biomassa apresentou um baixo teor de umidade (5,70%) e um alto teor de materiais voláteis (83,00%), características essenciais para uma pirólise mais eficaz, gerando um menor consumo de energia.

Os processos de degradação térmica realizados nas temperaturas de 550°C e 650°C apresentaram rendimentos de 27,27% e 23,44%, respectivamente. Estes resultados são considerados satisfatórios e compatíveis com a literatura. No entanto, pode-se observar que temperaturas mais elevadas acarretam uma maior degradação térmica da biomassa, reduzindo a produção de carvão ativado. Visto que, ao aumentar a temperatura em 100°C em relação ao primeiro ensaio, houve uma queda de rendimento de 3,83%.

Os carvões ativados resultantes dos processos de pirólise das podas de *Mangifera Indica* L. apresentaram baixos teores de umidade e cinzas, que são considerados satisfatórios e compatíveis com a literatura analisada. Em comparação com a biomassa, houve redução no teor de material volátil de 83% para 24,10% e 19,50% nos carvões produzidos a 550°C e 650°C, respectivamente. Já o teor de carbono fixo no carvão aumentou significativamente após a pirólise a 550°C, com um aumento de 710,26%. A 650°C, esse aumento foi ainda maior, alcançando 765,38%.

Ademais, conforme os resultados do teste de adsorção do corante azul de metileno utilizando o carvão ativado derivado da pirólise da poda de *Mangifera Indica* L., o experimento indicou que a eficiência de adsorção desse carvão é maior com uma menor quantidade de massa e uma maior concentração de corante azul de metileno.

Com isso, os resultados adquiridos nesse estudo comprovam a viabilidade e a eficiência da utilização de resíduos de poda de *Mangifera Indica* L. para a produção de carvão. Além de obter um carvão ativado com características satisfatórias, a utilização dessa biomassa pode mitigar os impactos ambientais, que o descarte indevido dessa biomassa tem gerado.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a realização de pesquisas a respeito das aplicações desse carvão obtido pela biomassa da poda de *Mangifera*

Indica L., como por exemplo no tratamento de águas residuais. Além da realização do estudo acerca do bio-óleo gerado nesse processo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. B. B. 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**. Dissertação (Mestrado em Ciências em tecnologia de processos químicos e bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 167, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro/RJ, 2004.
- ASTMD3173. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 1987.
- ASTMD2415. **Standard Test Method for Ash in Coal Tar and Pitch**. American Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2020.
- BACCAR, R. *et al.* **Preparation of activated carbon from Tunisian olive-waste cakes and its application for adsorption of heavy metal ions**. Journal of Hazardous Materials, v. 162, p. 1522–1529, 2009.
- BARATTA JUNIOR, A.P.; MAGALHÃES, L.M.S. Aproveitamento de resíduos da poda de árvores da cidade do rio de janeiro para compostagem. **Revista de Ciências AgroAmbientais**, Alta Floresta, v.8, n.1, p.113- 125, 2010.
- BARROS, P. A. P. C. **Preparação de carvão ativado a partir da pirólise de podas de flamboyant (Delonix regia)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2023.
- BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design and Theory**. 2 ed. London: Elsevier, 2013.
- BRASIL. Lei Federal nº 12.305/2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento-SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos** - 2020. Brasília, SNS/MDR, 2021. 62p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: MMA, 2022. 209p.
- CHALUPPE, M. A. C. **Análise da Implantação do Projeto “Valorização dos Resíduos Sólidos Orgânicos no Município de Florianópolis Através do Beneficiamento dos Resíduos de Podas”**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2013.

CORREIA, G. R. *et al.* Produção científica sobre resíduos de poda urbana: uma análise cienciométrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Goiânia, v. 15, n. 4, p. 1701-1714, 2022.

CORTEZ, C. L., **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: estudo de caso: AES Eletropaulo**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COSTA, P. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1272-1285, 2015.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Brasil bate recorde de receita e exportação com manga produzida no Nordeste**, São Paulo, 2024. Disponível em: < [https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/87702249/brasil-bate-recorde-de-receita-e-exportacao-com-manga-produzidanonordeste#:~:text=Em%202023%2C%20a%20manga%20brasileira,Pernambuco%20\(45%2C42%25\).](https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/87702249/brasil-bate-recorde-de-receita-e-exportacao-com-manga-produzidanonordeste#:~:text=Em%202023%2C%20a%20manga%20brasileira,Pernambuco%20(45%2C42%25).>) >. Acesso em 25 de maio de 2024.

FARAONI, A. S.; RAMOS, A. M.; STRINGHETA P. C. Caracterização da manga orgânica cultivar ubá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.11, n.1, p. 9-14, 2009.

FILHO, J. A. S.; MEDINA, B. R.; SILVA, S. R. da. **Poda de árvores frutíferas**. Piracicaba: USP/ESALQ/Casa do Produtor Rural, 2011. 54 p.

FILHO, R. J. O. **Aproveitamento de borra de café para a produção de carvão ativado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2023.

FIRDAUS, M. *et al.* Adsorption of Cationic Methylene Blue Dye Using Microwave Assisted Activated Carbon Derived from Acacia Wood: Optimization and Batch Studies. **Arabian Journal of Chemistry**, 2021.

FERNANDES, F. *et al.* Aproveitamento dos resíduos de podas de árvores e capinas do meio urbano não para produção de composto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 21. **Anais**. João Pessoa: ABES, 2001.

GOMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 103 f. 2002

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAJI, F. M. Caracterização físico-química da biomassa de *Leucaena leucocephala* para produção de combustível sólido. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1449-1460, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20160102>.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Resíduo de poda de árvores urbanas: como reaproveitar?** São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://conteudo.ipt.br/como-reaproveitar-residuo-de-poda>>. Acesso em 08 de outubro de 2023.

LENZA, C. G. S. **Utilização do óleo de fritura para a produção de bio-óleo através do processo de pirólise catalítica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2021.

LIMA, H. H. de. S. *et al.* **Aproveitamento poda de arborização urbana para produção de carvões ativados.** Anais I ENECT / UEPB... Campina Grande: Realize Editora, 2012. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/1648>. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

LORENZI, H. *et al.* **Frutas brasileiras e exóticas cultivadas (de consumo in natura).** São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora. 2006.

MACHADO, P. R. S. **Prospecção de bioprodutos a partir da degradação termoquímica do sabugo de milho visando a aplicação industrial.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 92 p. 2019.

MARTON, J. M. **Avaliação de diferentes carvões ativos e das condições de adsorção no tratamento do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana para obtenção biotecnológica de xilitol.** Tese de Mestrado (Departamento de Biotecnologia - Pós-graduação em Biotecnologia Industrial) – FEQL. Lorena, p. 143, 2002.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 3): gasification technologies.** Bioresource Technology Vol. 83, p. 55-63, 2002.

MULLER, C.C. **Avaliação da utilização de carvão ativado em pó na remoção de Microcistina em água para abastecimento público.** Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 121 p. 2008.

NAKASHIMA, G. T., MARTINS, M. P., SILVA, D. A., CHRISOSTOMO, W., YAMAJI, F. M. (2014) Tami *et al.* Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [s.l.], p.22-29.

NEVES, L. H. D. **Degradação térmica de resíduo sólido urbano visando a obtenção de bio-óleo e carvão ativado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 82 p. 2019.

NETO, F. P. L. **Planta: Manga.** 2021. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/manga/pre-producao/caracteristicas/planta#:~:text=A%20mangueira%20%C3%A9%20uma%20%C3%A1rvore,podendo%20atingir%20at%C3%A9%2030%20metros>>. Acesso em 06 de outubro de 2023.

PEDROZA, M. M. *et al.* Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos em Processo de Pirólise. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, 2017.

PEDROZA, M. M. *et al.* Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147-157, 2010.

PEDROZA, M. M. ; De Sousa, J. F. ; vieira . Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (Print)** , v. 105, p. 108-115, 2014.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. Tese de Doutorado (Programa de Pós graduação em Engenharia Química) – UFRN. Natal, p. 236, 2011.

PEREIRA, A.I.C. **Co-digestão anaeróbia de resíduos verdes e lamas de ETAR para produção de biogás**. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal. p. 98, 2013.

PEREIRA, J. R. C. *et al.* Caracterização de biocarvões regionais e efeitos sobre a produção de biomassa do milho BRS Caatingueiro. **Revista da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia**, v. 30, n. 2, 2022.

PEREIRA, M. V. F. **Aproveitamento da casca de banana para a produção de carvão ativado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2022.

PONTE, M.R. *et al.* Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

PREFEITURA DE PALMAS. **Prefeitura recebe pedidos de coleta de galhadas por telefone ou mensagem de texto**. Disponível em:<<https://www.palmas.to.gov.br/portal/noticias/prefeitura-recebe-pedidos-de-coleta-de-galhadas-por-telefone-ou-mensagem-de-texto/32268/>> Acesso em 19 de outubro de. 2022.

PREFEITURA DE PALMAS. **Ecopontos da Capital deram destinação final a mais de 10.5 mil toneladas de galhadas em 2021**. Disponível em:<<https://www.palmas.to.gov.br/portal/noticias/ecopontos-da-capital-deram-destinacao-final-a-mais-de-105-mil-toneladas-de-galhadas-em-2021/30473/>> Acesso em 19 de outubro de. 2022.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Manual Técnico de Poda de Árvores**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/MPODA.pdf>. Acesso em 7 de setembro de 2023.

RIMOLI, M.F.S. *et al.* Preparação e caracterização do carvão do fruto da castanheira-do-brasil ativado por processos físicos. **Revista Árvore**, v. 43, n. 2, 2019.

ROCHA, W. D. da. **Carvão ativado a partir de resíduos agrícolas e suas aplicações na adsorção de íons metálicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 126 p. 2006.

ROSA, I. A.; RODRIGUES, M. C. de M.; DE FÁTIMA, S. P. Remoção de azul de metileno em biocarvões de casca de arroz e de bagaço de cana-de-açúcar.

Sustentare, v. 3, n. 1, p. 64-74, 2019. Disponível em:

<http://periodicos.unincor.br/index.php/sustentare/article/view/5742>. Acesso em: 22 de março de 2024.

SANCHEZ, M. E. *et al.* **Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge**. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 933-940, 2009.

SCRODER, E. *et al.* Experiment on the Generation of activated carbon from Biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Vol. 79, 2007.

SILVA, J. 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**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – UFRS. Porto Alegre, p. 204, 2009.

SILVA, M. J. D.; RENOFIO, T. C. Z.; MARGUTT, M. C. A. Reutilização dos Resíduos das Podas de Árvores e o Levantamento Regional dos tipos de Árvores. In: Simpósio Internacional de Ciências Integradas. 4. **Anais**. Guarujá: Universidade de Ribeirão Preto, 2009.

SILVA, P. C. G. da.; CORREIA, R. C. **Manga: Importância econômica**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/manga/pre-producao/socioeconomia/importancia-economica>. Acesso em: 02 de outubro de 2023.

SILVEIRA, E. C. B. G. **Aproveitamento de poda de pequizeiro para a produção de carvão ativado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2023.

VALE, V. H. D. do.; MARINHO, A. de. M.; VALE, M. B. do. **Potencialidade da utilização dos resíduos verdes e da construção civil provenientes do município de Natal/RN**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. 4., 2016, Natal-RN. Disponível em: <https://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2016/trabalhos/pdf/congestas2016-et-02-007.pdf>. Acesso em: 18 de setembro de 2023.

VASCONCELOS, R. J. O. Destinação e **aproveitamento de podas de árvore (*Hymenaea courbaril*) para produção de carvão ativado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal do Tocantins, Palmas, 2023.

VIEIRA, G. E. G. **Resíduos da produção industrial de borracha (ETRI) e bebida (ETE) – Uma avaliação pela tecnologia**. 2000. 322p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2000.

YANIK J. *et al.*, (2007) Fast pyrolysis of agricultural wastes: characterization of pyrolysis products. **Fuel Processing Technology**, 88, p. 942–947, 2007.