



**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

Curso de Licenciatura em Engenharia Florestal

Projecto Final

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DA  
ESPÉCIE INVASORA (*Prosopis juliflora*)**



**Autora:**

Lúcia Salvador Comé

**Supervisor:**

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

Maputo, Maio de 2024

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA E  
DO CARVÃO VEGETAL DA ESPÉCIE INVASORA *Prosopis juliflora***

**Autora:**

Lúcia Salvador Comé

**Supervisor:**

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

Projecto Final submetido à ao  
Departamento de Engenharia Florestal  
da Faculdade de Agronomia e  
Engenharia Florestal, Universidade  
Eduardo Mondlane, em cumprimento  
parcial dos requisitos para obtenção do  
grau de Licenciatura em Engenharia  
Florestal nesta Instituição

Maputo, Maio de 2024

---

## **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Declaro por minha honra que este trabalho de culminação do curso de Licenciatura em Engenharia Florestal é da minha autoria e resulta da minha investigação. Esta é a primeira vez que submeto para obter um grau académico numa Instituição Educacional. Assim sendo, toda a informação que não é da minha autoria encontram-se citados os respectivos autores. A autenticidade dos resultados desta dissertação tem como testemunha o Supervisor.

### **A Declarante:**

---

(Lúcia Salvador Comé)

Maputo, Maio de 2024

Confirmo que o trabalho reportado nesta dissertação foi realizado pelo candidato sob minha supervisão, pertencendo ao Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal na Universidade Eduardo Mondlane.

### **O Supervisor:**

---

(Prof. Doutor Andrade Fernando Egas)

Maputo, Maio de 2024

---

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus progenitores: Salvador Elias Comé e Berta Leonardo Vilanculo, por terem me trazido ao mundo, pelo amor, educação, suporte e conselhos.

Aos meus irmãos: João Bernardo Mambo, Reginaldo Leonardo Vilanculo, Elias Salvador Comé, Sofia Salvador Comé e Elsa Salvador Comé.

A minha tia Constância Elias Comé pelo apoio e conselhos.

Ao meu parceiro Manuel Jofrice por tornar a caminhada mais leve.

Aos meus primos, amigos e tios que me ajudaram a tornar este sonho uma realidade.

---

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo fôlego de vida, pelo amor incondicional e pela sabedoria divina.

A Universidade Eduardo Mondlane, em especial a Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal pelos ensinamentos e oportunidade de fazer parte dos estudantes desta Instituição.

A todos docentes da FAEF pelos ensinamentos transmitidos e em especial ao meu supervisor, Prof. Doutor Andrade Fernando Egas, pela oportunidade cedida para realização do presente trabalho, que sempre mostrou-se disponível, incansável na transmissão dos seus valiosos ensinamentos, conhecimentos, sugestões, críticas e comentários que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao Mestre Pedro Venâncio Wate pelo suporte e paciência na colecta de dados.

Ao senhor Eduardo Marquel (carpinteiro) pela ajuda no processamento das amostra.

Ao Prof. Doutor. Adolfo Condo, pela criação de condições laboratoriais, na Faculdade de Engenharia.

Ao Mestre Alberto Manhiça e Licenciado Paulo Timóteo pelo apoio e paciência durante o trabalho no laboratório.

Aos meus amigos: Josué Victor, Laura Pontavida, Joana Govene, Leocádia Matsinhe, Alberto Chambela, Nascir Morreira, Idelson Chirinda, Jaime chirassicua e Amina Suisan.

Aos colegas: Salima Tembe, Dânia Nhantumbo, Leila Muianga, Admiro Macuacua, Álvaro Chipanela, Raima Zolinho, Odete Manguete, Elton Muchiua, Albino Kimbine, Paula De Almeida, Márcia Zaqueu, Evidelton Mudumela, Ódio Macamo, Ângela Muthemba, Géssica Da Maurida, Francisco Coimbra, e especialmente ao pessoal da turma do ano 2018 e 2019 que aqui não pude citar, e a todos que de forma directa ou indirecta ajudaram-me na minha formação de diversas formas, seja económica, moral, material, ensinamentos e encorajamento.

---

## Resumo

*Prosopis juliflora* é uma espécie invasora introduzida, de fácil adaptação em regiões semi-áridas que apresenta uma densidade muito elevada de regeneração em relação às espécies nativas, o que a torna de fácil propagação. Este estudo pretende avaliar as propriedades energéticas de madeira e do carvão vegetal da espécie *P. juliflora*, proveniente de distrito de Chókwè na província de Gaza com vista a promover o uso da espécie para fins energéticos e desta maneira controlar a sua propagação. Discos de 6 cm de espessura foram retirados a 0,30 e 1,30 m da altura em 5 árvores da espécie e transformadas em cunhas, onde duas delas foram usadas para a determinação da densidade básica e teor de cinza da madeira e as restantes duas convertidas em cubos de 2x2x2 cm para carbonização e análise química imediata do carvão vegetal. Os resultados indicam que a densidade básica da *P. juliflora* para as posições do diâmetro da base e diâmetro a altura do peito foram de 0,7368 e 0,6929 g/cm<sup>3</sup> respectivamente e o teor de cinza de 0,66 e 0,57% para as mesmas posições respectivamente. O rendimento do carvão vegetal foi de 43,32% para o diâmetro da base e de 42,73% para o diâmetro a altura do peito. Na análise química imediata do carvão vegetal o teor de matéria volátil foi de 23,70 e 24,43%, o teor de cinza de 2,18 e 2,20%, e o carbono fixo de 74,12 e 73,37% para as posições do diâmetro da base e diâmetro a altura do peito respectivamente. Para todos os parâmetros avaliados não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre posições avaliadas. O estudo concluiu que *Prosopis juliflora* procedente de Chókwè apresenta qualidade aceitável para fins energéticos.

**Palavras-chaves:** Espécie invasora, densidade básica, rendimento gravimétrico, análise química imediata.

---

## Summary

*Prosopis juliflora* is an introduced invasive species, easy to adapt in semi-arid regions and has a very high regeneration density in relation to native species, which makes it easy to propagate. This study aims to evaluate the energetic properties of wood and charcoal of the species *P. juliflora*, from the Chókwè district in Gaza province in order to promote the use of the species for energy purposes and thus controlling its propagation. Six thick discs with 6 cm thickness were removed at 0,30 and 1,30 m from 5 trees of the species and transformed into wedges, two of which were used to determine the basic density and ash content of the wood and the remaining two converted into 2x2x2 cm cubes for carbonization and proximate analysis of charcoal. The results indicate that the basic density of *P. juliflora* at bottom and at the diameter at breast height were 0,7368 and 0,6929 g/cm<sup>3</sup> respectively and the ash content was 0,66 and 0,57 % for the same positions respectively. The charcoal yield was 43,32% at bottom diameter and 42,73 at the diameter at breast height. In the proximate analysis of charcoal, the volatile matter content was 23,70 and 24,43%, the ash content was 2,18 and 2,20%, and the fixed carbon was 74,12 and 73,37%. For the positions bottom and diameter at breast height position. For all evaluated parameters, no statistically significant differences were found between the evaluated positions. The study concluded that *Prosopis juliflora* from Chókwè has a good quality for energy.

**Keywords:** Invasive species, basic density, gravimetric yield, proximate analysis.

---

## Índice

DECLARAÇÃO DE HONRA.....	i
DEDICATÓRIA .....	ii
AGRADECIMENTOS .....	iii
Resumo .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS .....	x
I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Problema de Estudo.....	2
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Objectivo Geral.....	4
1.3.2. Objectivos específicos .....	4
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Processos de geração de energia a partir da biomassa florestal .....	5
2.2. A madeira como fonte de energia .....	7
2.3. Principais produtos da madeira para energia e seus usos.....	9
2.3.1. Lenha .....	9
2.3.2. Briquetes .....	10
2.3.3. Astilhas .....	10
2.4. Produção e consumo de combustíveis lenhosos em Moçambique.....	11
2.4.1. Lenha .....	11
2.4.2. Carvão Vegetal .....	11

---

2.4.3. Quantidades de consumo de lenha e carvão .....	12
2.5. Factores determinantes da qualidade energética de madeira .....	13
2.5.1. Propriedades físicas da madeira .....	13
2.5.2. Propriedades energéticas da madeira.....	14
2.6. Caracterização de <i>Prosopis juliflora</i> .....	17
III. MATERIAIS E MÉTODOS .....	19
3.1. Descrição da área de amostragem .....	19
3.2. Colheita e preparação inicial das amostras .....	20
3.3. Determinação das propriedades energéticas da madeira.....	21
3.3.1. Densidade básica .....	21
3.3.2. Determinação do teor de cinza na madeira.....	22
3.4. Carbonização e rendimento gravimétrico do carvão vegetal .....	23
3.5. Análise química imediata do carvão vegetal.....	24
3.5.1. Determinação do teor de materiais voláteis.....	24
3.5.2. Teor de cinza .....	25
3.5.3. Teor de carbono fixo.....	26
3.6. Análise estatística dos dados .....	26
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1. Propriedades energéticas da madeira de <i>P. juliflora</i> .....	27
4.2. Efeito da posição da amostra na qualidade energética da madeira .....	30
4.3. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal.....	31
4.4. Propriedades energéticas do carvão vegetal.....	32
4.5. Efeito da posição da amostra nas propriedades energéticas do carvão vegetal .....	35
V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	37

---

5.1. Conclusões .....	37
5.2. Recomendações .....	37
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
VII. ANEXOS.....	50

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Diâmetros das árvores seleccionadas.....	20
<b>Tabela 2:</b> Densidade básica e teor de cinza madeira de <i>P. juliflora</i> .....	27
<b>Tabela 3:</b> Comparação da densidade básica e do teor e cinza de madeira com valores da literatura para a posição DAP.....	28
<b>Tabela 4:</b> Efeito da posição da amostra na densidade básica e teor de cinza.....	30
<b>Tabela 5:</b> Valores médios da análise química imediata do carvão vegetal de <i>P. juliflora</i> .....	32
<b>Tabela 6:</b> Comparação dos parâmetros da análise química imediata do carvão vegetal com valores da literatura para a posição DAP.....	33
<b>Tabela 7:</b> Efeito da posição da amostra nos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.....	35

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Localização da área de colheita da amostra.....	19
<b>Figura 2:</b> Amostras dos discos do DB e DAP.....	20
<b>Figura 3:</b> Esquema do disco com representação das cunhas .....	21
<b>Figura 4:</b> Fases de preparação das amostras.....	23
<b>Figura 5:</b> Rendimento gravimétrico do carvão vegetal nas posições do diâmetro da base (DB) e diâmetro à altura do peito (DAP).....	31

---

## LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

%	Porcentagem
g	Gramma
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
DB	Diâmetro da base
DAP	Diâmetro altura do peito
°C	Graus celsius
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
kg	Quilograma
mm	Milímetro
PCS	Poder calorífico superior
PCI	Poder calorífico inferior
cm	Centímetro
MAE	Ministério de Admnistração Estatal
LTM	Laboratório de Tecnologia de Madeira
IIAM	Instituto de Investigação Agraria de Moçambique
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)
MTA	Ministério de Terra e Ambiente
TCF	Teor de carbono fixo
TCZ	Teor de cinza
TMV	Teor de material volátil
ANOVA	Análise de variância
CV	Coefficiente de variação

---

# I. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Moçambique é um país que dispõe de área considerável de florestas e de outras formações lenhosas estimadas em cerca de 34 171 686 hectares que correspondem a 43% do território nacional (Magalhães, 2018). Os recursos provenientes destas formações lenhosas como a madeira, são usados na indústria madeireira e para fins energéticos, principalmente para a produção de lenha e carvão vegetal.

Segundo Falcão (2013), a biomassa está entre as principais fontes de recursos renováveis para produção de energia que pode contribuir para o desenvolvimento económico nacional. O uso da biomassa lenhosa para geração de energia está a ganhar a nível global, cada vez mais importância, pois têm uma grande contribuição para a mitigação da poluição atmosférica quando comparado com os combustíveis fósseis.

A biomassa florestal é a principal fonte de energia para a cozinha em Moçambique, sendo usada para a produção dos combustíveis lenhosos como a lenha e o carvão vegetal. Segundo Siteo *et al.* (2007) a população residente em zonas rurais estimada em cerca de 70% do número total de habitantes, têm os combustíveis lenhosos praticamente como fonte única de energia para preparar os seus alimentos. Nas zonas urbanas e peri-urbanas, cerca de 70-80% da população também utiliza os combustíveis lenhosos para a satisfação das suas necessidades doméstica de confeição de alimentos (Siteo *et al.*, 2007).

A alta densidade populacional em zonas urbanas e peri-urbanas e conseqüentemente a elevada demanda por combustíveis lenhosos têm contribuído para alta pressão sobre as florestas, provocando desta forma o abate em excesso de espécies nativas para esse fim. De acordo com Steierer (2011) citado por Afonso (2012), as espécies nativas protegidas são também foco de pressão pelos produtores de lenha e carvão vegetal, o que pode levar a um colapso ecossistémico.

Segundo Chavana (2014), os elevados níveis de exploração de produtos florestais energéticos têm contribuído significativamente para o aumento da taxa de desmatamento. No país o nível de desmatamento é bastante alto onde anualmente em média 267 000 hectares de áreas florestais são convertidas em outros usos de terra, o que contribui na redução da disponibilidade de bens e serviços ecossistémicos florestais para as comunidades rurais, além de ameaçar a biodiversidade

---

e aumentar a emissão de gases de efeito estufa (MTA, 2021). O desmatamento é um dos factores que causam diversos problemas ambientais com implicações negativas tanto para o ambiente a nível local como global.

Para Siteo *et al.* (2007) a redução da cobertura florestal reduz também a capacidade existente de sequestro do carbono pelas árvores e libera o carbono já fixado pelas plantas contribuindo assim para acentuar os problemas provocados pelas mudanças climáticas. Assim, há necessidade de se reflorestar grandes áreas para garantir não só o abastecimento futuro da madeira para o uso energético, mas também para o equilíbrio ecológico do ecossistema (Barros *et al.*, 2009).

Com a crescente preocupação de reduzir a taxa de desmatamento e as emissões de gases de efeito estufa, têm sido buscadas várias alternativas para garantir a minimização dos impactos ambientais e que possibilitem vantagens económicas ao país (Muniz *et al.*, 2017). Uma das alternativas é o uso de lenha e carvão como fonte de energia natural e renovável que pode ser usada de forma sustentável e sem poluição significativa (Moreira, 2011). De toda a lenha e carvão utilizados para a geração de energia, a maior parte dela é proveniente da vegetação arbórea da floresta nativa, que sempre foi considerada como uma fonte inesgotável de madeira (Cardoso, 2012). Assim, há necessidade de buscar alternativas que reduzam a pressão sobre esses recursos florestais nativos (Goida, 2019). Uma delas é o uso de espécies invasoras, para fins energéticos em substituição dos combustíveis de espécies florestais nativas.

## **1.2. Problema de Estudo**

Moçambique é um país com grande diversidade de florestas naturais constituídas principalmente por formações de Miombo, Mecrusse e Mopane (Magalhães 2018). Segundo o mesmo autor estas florestas estão sujeitas a uma elevada taxa de desmatamento e degradação florestal, por causa da elevada demanda dos seus produtos.

A utilização da biomassa de espécies invasoras para a produção de energia, é uma das alternativas para a redução da excessiva dependência dos combustíveis fósseis e para a redução do desmatamento provocado pela utilização insustentável das florestas nativas para a produção de lenha e carvão vegetal (Toste, 2011).

Para que uma espécie seja recomendada para produção comercial de combustíveis lenhosos deve-se conhecer o seu potencial energético, através da determinação de parâmetros como poder

---

calorífico, parâmetros da análise química imediata, densidade básica, rendimento gravimétrico no caso da produção de carvão vegetal (Vale *et al.*, 2003).

*Prosopis juliflora* é uma espécie introduzida, de fácil adaptação em regiões semi-áridas e apresenta uma densidade muito elevada de regeneração em relação às espécies nativas, o que a torna de fácil propagação (Nascimento, 2008). Segundo Andrade *et al.* (2010), *P. juliflora* afecta de forma intensiva a composição, a estrutura e a densidade das espécies nativas tanto dos indivíduos adultos quanto dos regenerantes. A presença desta espécie em áreas agrícolas provoca um crescimento lento dos indivíduos nativos, tornando assim a comunidade empobrecida (Pasicznik *et al.*, 2001). Na província de Gaza a *P. juliflora*, conhecido localmente como Mutaxo, é usada no pasto o que facilita a sua rápida propagação propiciando a sua abundância e dominância no distrito de Chókwé. Esta espécie não favorece o crescimento de outras espécies vegetais no local pelo seu comportamento dominador e invasivo (Nascimento, 2008), tornando insustentável o seu manejo. Estes factos tornam a espécie candidata para o seu aproveitamento para fins energéticos.

Entretanto há falta de estudos que abordam o potencial energético da espécie *P. Juliflora*, em certas condições ecológicas, com os do distrito de Chókwé. Esta informação é crucial para o estabelecimento de recomendações para a sua adequada utilização como fonte de energia. Neste contexto, a pesquisa apresentada neste trabalho pretende contribuir para um cenário futuro onde uma parte da produção de lenha e carvão vegetal seja efectuado por meio desta espécie invasora, para minimizar a pressão sobre as espécies nativas mais usadas actualmente.

---

### 1.3. Objectivos

#### 1.3.1. Objectivo Geral

- Avaliar as propriedades energéticas de madeira e do carvão vegetal da espécie invasora *Prosopis juliflora* nas condições ecológicas do distrito do Chókwé.

#### 1.3.2. Objectivos específicos

- Determinar a densidade básica e o teor de cinza de madeira de *Prosopis juliflora*;
- Determinar o rendimento gravimétrico do carvão vegetal de *Prosopis juliflora*;
- Avaliar os parâmetros da análise química imediata do carvão vegetal de *Prosopis juliflora*;
- Analisar o efeito da posição longitudinal da amostra na qualidade da madeira para lenha e carvão vegetal de *Prosopis juliflora*.

---

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Processos de geração de energia a partir da biomassa florestal

A biomassa florestal é definida como produto e subproduto dos recursos florestais, produzidos a partir de florestas nativas ou plantadas. A qualidade de biomassa florestal para energia está associada ao conteúdo de celulose, lignina e teor de humidade no material. A biomassa florestal é classificada como fonte energética limpa e renovável por isso tem sido uma boa alternativa para diversificação da matriz energética (Cardoso, 2012).

Segundo Marafon *et al.* (2016), o uso de biomassa para a geração de energia pode ser por meio de cogeração, processo bioquímico, e processo termoquímico.

A cogeração consiste na produção combinada de energia térmica e eléctrica a partir de uma mesma fonte primária de energia (Afonso, 2012). Segundo Afonso *et al.* (2014), o uso de mesma fonte de energia para a geração de energia eléctrica e calor resulta em maiores níveis de economia, e por consequência redução significativa da factura de energia no consumidor, sem alteração na produtividade. As fontes primárias usadas no sistema de cogeração são várias, dos quais se destacam, o carvão, a biomassa, os resíduos industriais, gás natural, gás propano, fuelóleo (derivados de petróleo).

Segundo Marafon *et al.* (2016) e Afonso *et al.* (2014), o calor produzido pela cogeração pode ser manuseado em diversas formas directamente no processo industrial, também pode ser reaproveitado para o aquecimento de águas e transformado para o sistema de refrigeração como o chillers (trata-se de um sistema de trigerção), permitindo assim, ambientes mais favoráveis e o aumento da capacidade e o uso de energia nos sistemas de conversão.

Num sistema de cogeração podem ser utilizados diferentes tipos de combustíveis, sendo, os combustíveis fósseis de origem sólida, líquida e gasosa os mais utilizados (Afonso *et al.*, 2014). Nos últimos anos a utilização de combustíveis provenientes da biomassa tem vindo a crescer (Afonso, 2012).

O processo bioquímico para a cogeração de energia compreende a produção do bioetanol a partir da hidrólise dos carboidratos presentes na biomassa celulósica e lignocelulósica. À biomassa lignocelulósica ao princípio deve-se fazer um pré-tratamento mediante acções mecânicas e físicas para preparar e dimensionar a biomassa, e destruir sua estrutura celular para que seja mais

---

acessível em um tratamento químico ou biológico posterior (Hamelinck *et al.* 2005). A biomassa lignocelulósica é constituída por carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina e uma pequena parte constituída por extractivos, ácidos, sais e minerais. A celulose e hemicelulose são polissacarídeos que podem ser hidrolisados em açúcares e eventualmente ser fermentados para obtenção do bioetanol que por sua vez é usado como fonte de energia (Hamelinck *et al.*, 2005).

O processo termoquímico é uma das formas mais eficientes de converter a biomassa em biocombustível. É um processo mais vantajoso em comparação com a conversão bioquímica devido a sua facilidade de manipulação de vários tipos de biomassa e também apresenta uma das vias mais directas, rápidas e simples de conversão de energia (Silva, 2021). Neste processo, a decomposição térmica da matéria orgânica ocorre a temperaturas muito elevadas, onde a biomassa se decompõe e forma bio óleos e gases (Chen *et al.*, 2015). Dentre os processos termoquímicos mais utilizados, pode se destacar a combustão, torrefacção, a pirólise, carbonização e a gaseificação.

De acordo com Cardoso (2012), a combustão directa é a principal forma de conversão termoquímica usada para a biomassa e compreende a modificação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reacções dos elementos constituintes com o oxigénio fornecido. Para fins energéticos, a combustão directa ocorre essencialmente em fogões para a confeição de alimentos, fornos e caldeiras.

A combustão directa é um dos processos termoquímicos frequentemente usado, é geralmente ineficiente embora seja bastante prático e por vezes conveniente. A elevada humidade que pode ser de 20% ou mais no caso da lenha e a baixa densidade energética do combustível como a lenha, a palha, os resíduos entre outros, representam um problema de combustão directa, o que torna difícil o seu armazenamento e transporte (Cardoso, 2012).

O processo termoquímico engloba também a carbonização com temperaturas que variam de 400-450 °C, também chamada de pirólise lenta, que é a transformação térmica da madeira na ausência ou presença controlada de oxigénio e com calor sendo fornecido por uma fonte externa, tem como objectivo principal a produção de carvão vegetal (Zanoni, 2013).

Segundo Medeiros e Rezende (1983), o processo de carbonização da madeira, divide-se nas seguintes fases, de acordo com a temperatura:

- 
1. **Abaixo de 200 °C** – Secagem e início da decomposição térmica da madeira;
  2. **De 200 a 280 °C** – Fase predominantemente endotérmica, com liberação de ácido acético, metanol, água, CO<sub>2</sub>, etc;
  3. **De 280 a 380 °C** – Início da fase dos hidrocarbonetos, emissão do primeiro grupo de substâncias voláteis;
  4. **De 380 a 500 °C** – Fase dos hidrocarbonetos, fase predominantemente exotérmica, em que é formada a maior parte dos alcatrões e gases combustíveis (CO, CH<sub>4</sub>, etc.). Acima de 500 °C, o carvão já é bem estável, e apenas uma pequena quantidade de voláteis, principalmente a H<sub>2</sub> é liberada.

## **2.2. A madeira como fonte de energia**

A madeira é considerada como sendo um combustível essencial principalmente em processos de secagem, cozimento, fermentações e produção de energia em diversas regiões a nível mundial. A escolha correcta de espécies para seu aproveitamento como uma fonte de geração de energia é de extrema importância (Eloy, 2013), e é necessário o conhecimento das suas características principalmente as relacionadas com o seu potencial energético (Moreira, 2011). O potencial energético da madeira é influenciado pelas suas características químicas.

De acordo com Araújo (2010), do ponto de vista químico a madeira é constituída por três principais componentes macromoleculares da parede celular que são a celulose, a hemicelulose, e a lignina. A madeira é composta adicionalmente por pequenas quantidades de componentes de baixo peso molecular, extractivos e substâncias minerais, que são geralmente mais relacionados com madeira de diversas espécies.

### **Celulose**

Segundo Klock & Andrade (2013), celulose é o componente que existe em grande quantidade na madeira, perfazendo aproximadamente 40-45% nas madeiras. Pode ser brevemente caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente por β- D-glucose, devido a suas propriedades químicas e físicas.

---

## **Hemicelulose**

São conjuntos complexos de polissacarídeos hexoses e pentoses presentes na madeira. Predominam na composição das paredes celulares das fibras das folhosas, correspondendo até 20-35% da massa seca do lenho e nas coníferas de 18-25% do lenho, formadas pela combinação, em cadeia linear de unidades de glicose e manose (Pedrazzi *et al.*, 2019). As hemiceluloses podem ser classificadas em cinco grupos: glucouranoxilanas, galactoglucomananas, glucomananas, arabinoglucouranoxilanas e arabinogalactanas.

## **Lignina**

São formados por fracções não polissacarídeas, constituídas por um sistema aromático composto de unidades de fenil-propano. É a terceira componente fundamental e importante da madeira (Klock & Andrade, 2013).

Segundo Trugilho (2016) a conversão da madeira em outro tipo de combustível também é afectada pela sua estrutura anatómica, composição química e física, além do processo de transformação utilizado. No geral, factores como o teor de lignina da madeira e a sua qualidade desempenham um papel fundamental dependendo do produto desejado, enquanto a temperatura e as taxas de aquecimento são importantes efeitos associados aos processos de conversão (Trugilho e Silva, 2001).

## **Extractivos e substâncias minerais**

Os extractivos são considerados como compostos que não fazem parte da estrutura da parede celular vegetal, sendo solúveis em água, solventes orgânicos e volatilizados com vapor. Podem apresentar elevado poder calorífico, podendo chegar a 8.300 cal/g, dependendo da classe do extractivo. O teor de minerais afecta negativamente o valor calórico do combustível, sendo, portanto, indesejável em qualquer tipo de combustível (Browning, 1963 e Pettersen, 1984).

Todos estes compostos acima descritos que constituem a madeira influenciam de forma positiva no seu valor calorífico, excepto as substâncias minerais, que apresentam relação inversa com o poder calorífico da madeira. Do ponto de vista energético o teor de lignina é o mais importante, não somente pelo valor calorífico, mas principalmente pela sua elevada estabilidade térmica que

---

está relacionada com os tipos de ligações químicas existentes dentro da macromolécula (Trugilho, 2016).

### **2.3. Principais produtos da madeira para energia e seus usos**

A utilização da madeira como fonte de energia vem aumentando nas últimas décadas em virtude da crescente demanda mundial de energia, por ser de baixo custo de obtenção e por atender a maioria dos aspectos sociais, económicos e ambientais (Rosillo-Calle, 2016). Segundo Shinya e Matsumura (2008), a taxa de crescimento primário da floresta é estimada em mais de 5,1 bilhões de m<sup>3</sup>/ano, a produção anual de madeira é tão pequena de 1,6 bilhão m<sup>3</sup>/ano para uso industrial e 1,8 bilhão de m<sup>3</sup>/ano para uso de combustível, o que sugere que existe um remanescente de 1,7 bilhão de m<sup>3</sup>/ano de biomassa florestal que podem ser usados para produção adicional de bioenergia. A madeira pode ser aproveitada no seu estado bruto ou em diversos produtos como lenha, carvão vegetal, astilhas, briquetes e peletes para a geração de energia (Fonsêca *et al.*, 2020).

#### **2.3.1. Lenha**

A lenha é definida como ramos, troncos, cavaco de madeira ou quaisquer pedaços de madeira que podem ser utilizados como combustível. Em relação à sua composição, a lenha possui entre 41-49% de celulose, 15-27% de hemicelulose e 18-24% de lignina. Seu poder calorífico inferior médio é de 3100 Kcal/Kg (Cardoso, 2012).

A lenha é uma fonte de energia clássica e muito importante como fonte de energia doméstica em muitos países em desenvolvimento. A produção da lenha ocupa mais da metade da madeira colhida. Entretanto, o consumo da energia da lenha a nível mundial é de 14% e nos países em desenvolvimento é de 36% (Shinya e Matsumura, 2008). Segundo os mesmos autores a lenha é usada como energia doméstica para cozinha, queima directa em fornos, produção de carvão, assim como para fins industriais usando tecnologias avançadas (pirólise rápida para produção de bio óleo, gaseificação para produção de gás pobre e gás de síntese, entre outros fins).

No processo de combustão da lenha, podemos encontrar 4 etapas diferentes, duas em que a madeira consome energia e duas em produz energia. As etapas são: secagem e emissão de

---

voláteis, que consomem calor, seguidas das etapas de ignição dos gases e extinção de chamas (Morales e Nogueira, 2021).

O teor de água da lenha é superior a 50% após o abate e entre 39 e 15% para lenha seca ao ar. Geralmente, quando o teor de água excede 30%, o fogo se extingue porque o calor restante não é suficiente para atingir a temperatura da chama, pois a lenha consome energia para a secagem durante o processo de combustão (Shinya e Matsumura, 2008). O teor de cinzas da lenha é inferior ao do carvão; a cinza da madeira possui alto teor de potássio que é um importante fertilizante, e o retorno das cinzas para a floresta é essencial para a sustentabilidade do sistema (Trugilho, 2016).

### **2.3.2. Briquetes**

Briquetes são produtos de madeira ou de outros materiais lignocelulósicos usados como combustível e que resultam do processo designado de briquetagem (Zorzan *et al.*, 2011). Segundo Quirino (2002), todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado pela briquetagem, bastando atender às necessidades de granulometria e teor de humidade exigido pelo processo. Esse processo possui a vantagem de transformar um resíduo de baixa densidade em um substituto de alta qualidade da lenha.

Como principal vantagem, o briquete possui um poder calorífico mais alto, humidade mais baixa e baixo volume de cinzas e fumaça quando comparado com a lenha (Costa e Moraes, 2011). Os briquetes podem ser utilizados em pizzarias, padarias, hotéis, olarias, laticínios, indústria de gesso, entre outras instalações comerciais e industriais que usam fornos.

### **2.3.3. Astilhas**

A astilha é originária do processo de picagem da madeira e tem tamanhos que variam de acordo com o ajuste do picador, o processo, e ainda com as características da madeira picada. A granulometria das astilhas pode influenciar na produtividade das caldeiras, tendo em conta que cada caldeira tem suas exigências específicas de tamanho (Soares, 2016).

Segundo Lippel (2021), os cavacos podem ter diferentes classes granumétricas: cavaco fina - 3 mm; cavaco pequeno - 8 mm; cavaco médio - 16 mm; cavaco comum - 25 mm; cavaco grande - 63 mm e cavaco extra grande > 130 mm. Esta relacionada ao tipo de picador, ao ângulo de corte

---

das facas, a espécie e sua densidade da madeira, a humidade. As astilhas são usadas em indústrias centrais térmicas e centrais de combustão (Soares, 2016).

## **2.4. Produção e consumo de combustíveis lenhosos em Moçambique**

### **2.4.1. Lenha**

A biomassa lenhosa é um recurso renovável que tem sido utilizado durante séculos como fonte de energia para fins domésticos. A utilização da lenha tornou-se parte integrante da cultura das comunidades, e com o crescimento das cidades foi aumentando a necessidade de energia e as florestas começaram a ser exploradas (Falcão, 2013). Geralmente a lenha usada pelas comunidades é originária de florestas naturais, que estão sendo desmatadas a um nível insustentável à medida que os produtores de carvão procuram madeira mais densa e mais calorífica (Greenlight, 2021).

Segundo Miras *et al.* (2018), nas zonas rurais, a lenha é o combustível predominante e geralmente única fonte de energia doméstica disponível. Os consumidores procedem a colheita de lenha nas florestas, nas próprias machambas e ao redor das suas casas tirando proveito dos galhos secos e do material resultante da abertura da machamba (Greenlight, 2021). Entretanto, 71% recolhem a lenha em florestas, enquanto os restantes 29% recolhem lenha em campos agrícolas ou pousios (Miras *et al.*, 2018). Anualmente, este consumo é representativo, no entanto, o impacto visível na floresta é menor uma vez que o material colhido provém de galhos secos, e árvores mortas. A lenha pode também ser utilizada por consumidores industriais nas áreas rurais, dando destaque às indústrias de chá, tabaco, cerâmicas artesanais e industriais, e nas áreas urbanas com destaque para as padarias, restaurantes e barracas (Greenlight, 2021).

### **2.4.2. Carvão Vegetal**

O carvão vegetal é um produto sólido resultante da carbonização da madeira que apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral é renovável e menos poluente (Neves *et al.*, 2011). A utilização de carvão vegetal como fonte de energia é predominante nas zonas urbanas. Para a produção são geralmente usados fornos tradicionais, em particular no interior de Moçambique para o fornecimentos do mercado urbano (Falcão, 2013).

---

De acordo com o trabalho realizado por Atanassov *et al.* (2012) a implementação de tecnologias de fornos mais avançados aumentam o rendimento até 32% em relação aos fornos tradicionais. Entretanto as comunidades não têm assumido tecnologias melhoradas nas suas actividades de produção de carvão vegetal que permitam maiores rendimentos gravimétricos (Malate, 2017).

A produção de carvão é uma actividade que não é muito exigente, é usada como meio de subsistência principalmente para as comunidades rurais, contribuindo na renda familiar para os que não têm emprego, servindo também como alternativa de arrecadação de receitas para complementar as outras actividades tais como a agricultura, pecuária e exploração intensiva de madeira (Chavana, 2014).

#### **2.4.3. Quantidades de consumo de lenha e carvão**

Segundo Siteo *et al.* (2007), o consumo total nacional é estimado em cerca de 14,8 milhões de ton (peso seco na estufa) por ano, correspondente a cerca de 23,68 milhões de m<sup>3</sup> /ano, o equivalente a 1,16 m<sup>3</sup>/ano per capita.

Alguns estudos apresentam estatísticas e consumo de combustíveis lenhosos por província. De acordo com Egas *et al.* (2016) o consumo anual de lenha nas cidades de Pemba e Montepuéz é estimado em 3 056 e 2 113 toneladas respectivamente. E cerca de 23 000 e 13 852 toneladas para o carvão nas cidades de Pemba e Montepuéz. Com um rendimento médio dos fornos de 16,7%, o volume de madeira equivalente usada para o fabrico de carvão está em torno de 137 727 e 82 782 toneladas nas cidades de Pemba e Montepuéz respectivamente (Egas *et al.*, 2016).

De acordo com Atanassov *et al.* (2012), a produção nacional de biomassa (árvores vivas) foi estimada em cerca de 22 milhões de toneladas por ano. Este valor, estimado depois de retirar as áreas de conservação, concessões florestais e ecossistemas frágeis, está acima das necessidades actuais de lenha e carvão doméstico e industrial. Segundo os mesmos autores o desmatamento para a produção de lenha e carvão em Moçambique não é um problema nacional, mas sim um problema localizado. A escala nacional, a produção de biomassa é superior à procura, mas as distâncias dos lugares de produção de combustíveis lenhosos para os centros de consumo, apenas as áreas próximas aos centros de consumo recebem uma pressão elevada (Siteo *et al.*, 2007).

---

## **2.5. Factores determinantes da qualidade energética de madeira como fonte de energia**

A qualidade da madeira é a combinação de diversas características de uma árvore ou de suas partes (físicas, químicas e anatômicas), que podem definir a melhor forma de utilização (Vital, 2013). Essas características podem ser agrupadas em propriedades físicas e energéticas da madeira.

### **2.5.1. Propriedades físicas da madeira**

As propriedades físicas da madeira exercem influência directa na qualidade da madeira para energia. Dentre as principais características físicas da madeira a ser avaliada estão o teor de humidade e a densidade básica da madeira (Costa, 2011).

#### **2.5.1.1. Teor de humidade da madeira**

O teor de humidade da madeira é o conteúdo de água presente na madeira. Em algumas espécies a capacidade de retenção de água é muito maior, em árvores vivas, onde os valores podem variar de aproximadamente 35 a 200% dependendo da espécie, massa específica da madeira e condições climáticas da região onde a árvore se desenvolve (Klitzke, 2013).

Segundo Bersh (2016) o teor de humidade da madeira está relacionado com as propriedades de resistência da madeira (propriedades mecânicas), com a maior ou menor facilidade em trabalhar com este material, com seu poder calorífico, sua susceptibilidade a fungos. Para Bersh (2016) o teor de humidade é inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água menor é a quantidade dos outros elementos químicos da madeira como a celulose, hemicelulose e lignina.

O teor de humidade relaciona-se negativamente com o poder calorífico, pois a combustão da madeira húmida disponibiliza menos energia devido ao gasto da mesma para o aquecimento e vaporização da água. Segundo Cunha *et al.* (1989) citado por Bersh (2016) é bastante importante que a madeira a ser utilizada para a geração de energia apresente teores de humidade inferiores a 30%, com a finalidade de aumentar a eficiência do combustível e reduzir custos com o manuseio e transporte.

---

### **2.5.1.2. Densidade básica**

A densidade básica é a relação entre o peso seco e o volume da madeira com humidade acima do ponto de saturação das fibras (Zaque *et al.*, 2018). É considerada um parâmetro importante na classificação da qualidade da madeira porque influencia directamente na resistência do produto e na transformação industrial (Bonduelle *et al.*, 2015). A produção da massa seca para a geração de energia de biomassa florestal está directamente relacionada com esta característica (Palermo *et al.*, 2012).

A madeira é considerada interessante quando esta apresenta uma densidade moderadamente pesada entre 0,50 a 0,80g/cm<sup>3</sup> (Ferraz *et al.*, 2004). A densidade básica está relacionada directamente com a geração de energia, em que valores maiores propiciam uma maior quantidade de energia estocada por m<sup>3</sup> da madeira (Cirilo *et al.*, 2020). Por esta razão alguns autores consideram a densidade básica como uma propriedade energética da madeira.

A densidade básica pode variar entre as espécies e ainda no mesmo indivíduo, apresentando valores e comportamentos diferentes nas diversas posições da árvore (Zaque *et al.*, 2018). Por isso, é fundamental quando se estuda a densidade básica das espécies fazer-se a avaliação radial e longitudinal na madeira.

Segundo Pereira *et al.* (2000) madeira com maior densidade básica têm maior poder calorífico por unidade de volume. Para fins energéticos, a alta massa específica possui as vantagens de necessitar de menos área de armazenamento, maior rendimento no transporte e nas caldeiras.

Geralmente em algumas espécies, a densidade tende a ser decrescente da base para o topo, noutras tende a ser crescente a partir do DAP (diâmetro a altura do peito) (Barrichelo *et al.*, 1983). As variações da densidade devem-se às diferenças na estrutura anatómica da madeira e na quantidade de extractivos presentes por unidade de volume, principalmente em função da idade da árvore, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica e tratamentos silviculturais (Barrichelo *et al.*, 1983 e Santos *et al.*, 2009).

### **2.5.2. Propriedades energéticas da madeira**

A madeira é considerada um combustível essencial principalmente em processos de secagem, cozimento, fermentação e produção de energia em diversas regiões do planeta (Brito *et al.*, 2008), onde a escolha de espécies para o seu aproveitamento é de extrema importância (Eloy, 2013). No

---

entanto, é necessário o conhecimento das suas características fundamentais como aquelas que informam acerca do seu potencial energético (Moreira, 2011).

As propriedades energéticas da madeira compreendem principalmente o poder calorífico (quantidade de energia libertada durante a combustão), a percentagem de material volátil (material que se queima em estado gasoso), carbono fixo (material que se queima no estado sólido) e cinzas (material residual).

### **2.5.2.1. Poder calorífico**

O Poder Calorífico é a quantidade de calor liberada pela combustão completa de uma unidade de massa (ou volume) do combustível (Schurhaus, 2007). Quando ocorre combustão completa de uma unidade de combustível este libera energia térmica e é geralmente medido em termos da energia por unidade de massa ou volume (Vieira, 2012). Segundo Quirino (2002), a unidade mais usual para combustíveis sólidos é a kcal/kg ou cal/g e para combustíveis gasosos ou líquidos é kcal/m<sup>3</sup>.

O poder calorífico pode ser classificado como poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS) (Klautau, 2008). Considera-se o PCS quando a combustão é feita a um volume constante e a água formada na combustão é condensada (Santos, 2012). O PCI é resultante da combustão sob pressão constante, ao ar livre, sem a condensação da água formada e desse modo, seu valor é menor que a PCS. Tanto o PCS como o PCI de uma determinada biomassa é a propriedade físico-química mais importante a considerar para a escolha de um processo termoquímico (Vieira, 2012).

O PCS pode ser obtido experimentalmente em laboratórios utilizando o calorímetro. Este aparelho determina a variação da temperatura da água provocada pela combustão completa da amostra do combustível (Klautau, 2008).

De acordo com Campos (2009), a diferença entre o poder calorífico superior e o inferior é a energia necessária para evaporar a humidade presente no combustível e a água formada a partir da oxidação de hidrogénio do combustível.

Segundo Trugilho (2016), a madeira apresenta poder calorífico variável, dependendo da espécie florestal, sendo a composição química responsável por essa variação. O poder calorífico está directamente relacionado com os teores de lignina, cinzas e extractivos.

---

O poder calorífico da madeira é inteiramente influenciado pelo teor de humidade e pela massa específica básica, onde quanto maior o teor de humidade maior é o gasto energético para evaporar a água presente na madeira, e quanto menor a massa específica básica menor será o seu poder calorífico (Couto, 2014).

#### **2.5.2.2. Teor de material volátil**

Segundo McKendry (2002), o teor de material volátil é a parte da biomassa que evapora por aquecimento, incluindo a humidade. O teor de material volátil expressa a facilidade de se queimar um material e é obtido medindo a fracção de massa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte.

Os materiais voláteis durante a queima da biomassa volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão, podendo contribuir para uma baixa eficiência energética (Chaves *et al.* 2013).

#### **2.5.2.3. Teor de cinza**

A cinza é um resíduo mineral proveniente da combustão da biomassa a altas temperaturas (Vital *et al.*, 1984) citado por Godim (2018), e é um dos parâmetros importantes que afecta a qualidade da madeira para fins energéticos. As cinzas são consideradas materiais inertes, portanto, a presença de grandes quantidades de teor de cinza, pode contribuir para reduzir o valor de poder calorífico, causar perda de energia e sua presença pode afectar a transferência de calor (Viera, 2012).

A quantidade de cinzas é inversamente proporcional ao poder calorífico. O teor de cinzas na madeira pode variar entre 0,5% - 5%, dependendo das condições ecológicas do local (Souza *et al.* 2007). Segundo Pereira *et al.* (2000) um carvão vegetal de boa qualidade deve ter um teor de cinzas inferior a 3%.

#### **2.5.2.4. Carbono fixo**

Segundo Costa *et al.* (2017), o teor de carbono fixo é a quantidade de carbono que fica retido na forma sólida após o processo de pirólise, estando este relacionado com o valor energético e a estabilidade térmica do material combustível.

---

Quanto maior for o teor de carbono fixo em um material, maior o tempo de residência do material de queima dentro do aparelho de combustão, e maior será a liberação de energia, resultando na necessidade de menos combustível ou menores intervenções para abastecimento do equipamento de conversão energética (Costa *et al.*, 2017). O teor de carbono fixo tem relação positiva com o poder calorífico do material (Soares *et al.*, 2014).

## **2.6. Caracterização de *Prosopis juliflora***

### **2.6.1. Acerca do gênero**

O gênero *Prosopis* pertence à família *Leguminosae*, subfamília *Mimosoideae* e tem cerca de 44 espécies (Walter 2011). O gênero originou-se no continente africano (África Tropical), onde é encontrada a *Prosopis africana* que posteriormente migrou para outras regiões do Mundo especificamente o continente Americano e Europeu através de pássaros e mamíferos (Burkart, 1976).

### **2.6.2. Distribuição e características botânicas da espécie**

Embora cresçam nas proximidades de água, diferentes espécies de *Prosopis* desenvolvem-se em lugares secos, onde dificilmente outras plantas poderiam sobreviver, toleram e crescem com rapidez em solos salinos e em solos ácidos de baixa fertilidade (Nascimento, 1993).

A maioria das plantas do gênero *Prosopis* pode sobreviver em áreas com baixa precipitação e períodos prolongados de seca, o que facilita seu estabelecimento em locais com condições críticas (Pasicznic *et al.*, 2001). Encontra-se presente em solos rochosos e arenosos, mas podem frequentemente estabelecer-se em locais de até 1500 m de elevação (Maydell, 1978), em regiões com precipitação anual variando de 150 a 750 mm (Goor e Barney, 1976).

A *Prosopis juliflora* (Sw) é uma planta arbórea, xerófita, espinhosa, que pode atingir 6 a 15m de altura, com um DAP variando de 40 a 80 cm e com copa de 8 a 12 m de diâmetro, apresenta um sistema radicular axial ou pivotante, capaz de alcançar grandes profundidades em busca de água e nutrientes (Ribaski *et al.*, 2009). Os espinhos variam de 1,2 a 5 cm de comprimento e 3 a 6 mm de largura e podem ser encontrados aos pares nas axilas das folhas ou solitário. O alborno de madeira de *P. juliflora* é estreito, amarelo claro a castanho claro, claramente distinguido do cerne

---

marrom-avermelhado escuro que, assume uma cor vermelho-vinho escura após a secagem (Orwa et al., 2009).

Segundo Nascimento (2008), a *Prosopis juliflora* é uma planta que frutifica na época mais seca do ano, quando os estoques de forragens naturais atingem um estágio crítico de escassez, propiciando desta forma uma alternativa alimentar de grande valor nutricional.

### **2.6.3. Importância e uso da *Prosopis juliflora***

Devido as suas características morfológicas são consideradas de uso múltiplo. As árvores têm potencial para produzir lenha, frutos e folhas para forragens, mesmo sob as condições climáticas mais extremas circunstâncias (Azevedo, 1982).

Segundo Mendes (1987), a madeira de *P. juliflora* é dura e de fácil manuseio, e é usada na carpintaria. Possui elevada resistência ao ataque de pragas como térmitas e doença como a podridão, podendo ser utilizada na fabricação de móveis, postes, estacas para vedação, e para a produção de carvão vegetal com fonte energética vegetal. Segundo Nobre (1984), descreve *P. juliflora* como sendo uma espécie altamente propícia para fins energéticos por apresentar a produção da lenha que varia de 100 a 120 m<sup>3</sup> /ha, após o 5º ano. Tem um alto poder calorífico que pode atingir até 1720 joules/kg (Orwa et al., 2009).

A *P. juliflora* também representa o principal papel no reflorestamento das terras áridas. Sua capacidade de crescimento em solo degradado, sob condições áridas, tem promovido adequada sustentabilidade, adaptando-se muito bem em sistemas agro-florestais de terras secas (Pasiiecznik et al., 2001). *Prosopis juliflora* é considerada uma espécie extremamente agressiva, sendo sugerida sua introdução somente em locais de intensa aridez, para evitar danos à natureza (National Academy of Science, 1980).



---

## 3.2. Colheita e preparação inicial das amostras

### 3.2.1. Colheita das amostras

Foram seleccionadas 5 árvores da espécie numa mancha de *Prosopis juliflora*, baseando-se na qualidade do fuste (recto) e fitossanidade das árvores (sã). As árvores seleccionadas tinham valores de diâmetro da base, a 0,3m da altura do fuste (DB) variando de 8,9 a 12 cm e diâmetro à altura do peito (DAP) entre 7 e 9,5cm (Tabela 1).

**Tabela 1:** Diâmetros das árvores seleccionadas

Espécie	Árvore	DB (cm)	DAP (cm)
<i>Prosopis juliflora</i>	1	8,9	8
	2	12	9,5
	3	11	9,3
	4	9,4	7
	5	9,6	7,5

Em seguida abateu-se as 5 árvores usando uma motosserra e retirou-se dois pares de discos de 6 cm de espessura de cada árvore (Figura 2), sendo um na base e outro na posição do DAP. Os discos obtidos foram devidamente identificados e colocados em sacos plásticos para minimizar a perda de humidade durante o transporte para o Laboratório de Tecnologia de Madeira (LTM) da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, em Maputo, onde foram conservados num congelador para os processos subsequentes.

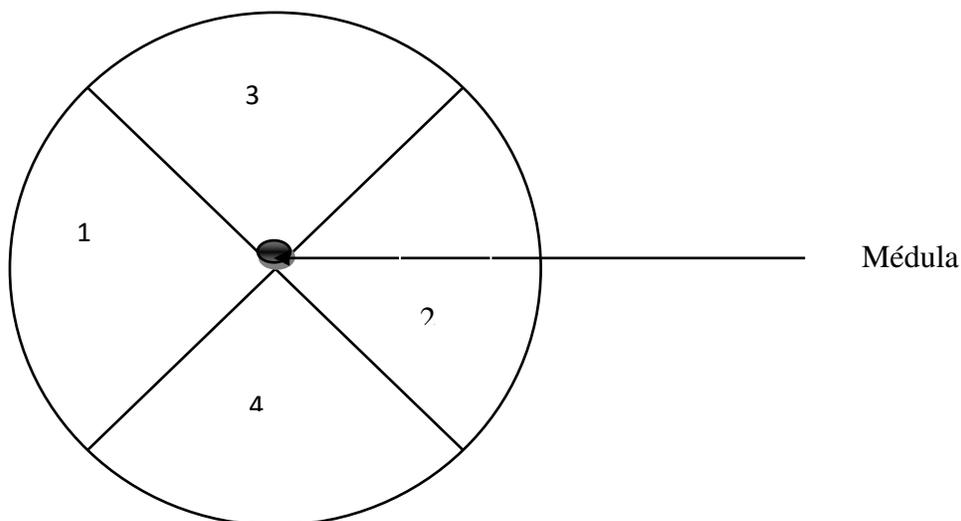


**Figura 2:** Amostras dos discos do DB e DAP

---

### 3.2.2. Preparação inicial das amostras

Cinco discos de cada posição foram encaminhadas para a carpintaria do Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), onde foram processados. Cada disco foi dividido em quatro cunhas passando pela médula (Figura 3) usando uma serra do tipo circular e foram usadas duas cunhas opostas para a determinação das propriedades energéticas da lenha (densidade básica e teor de cinza da madeira). As restantes duas cunhas opostas, foram usadas para a produção de carvão vegetal e determinação das respectivas propriedades energéticas.



**Figura 3:** Esquema do disco com representação das cunhas.

**Legenda:** 1 e 2- cunhas opostas usadas para análise química imediata da lenha; 3 e 4 – cunhas opostas usadas para produção e análise do carvão vegetal.

### 3.3. Determinação das propriedades energéticas da madeira

#### 3.3.1. Densidade básica

As cunhas opostas de cada árvore foram primeiramente submersas em água por vários dias, com o objectivo de atingir o estado saturado, e de seguida foi determinado o seu volume de acordo com o método de Arquimedes (deslocamento por imersão em água), conforme sugerido por Vital (1984) citado por Fonsêca (2011).

De seguida colocou-se as amostras em uma estufa a uma temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por 3 dias, e depois foram removidas e colocadas em dessecador por 30 min, e pesadas. Em seguida as amostras foram submetidas à nova secagem em estufa por 2 horas, resfriadas por 30 minutos e

---

pesadas novamente. Este procedimento foi seguido até que as amostras tivessem peso constante, onde a diferença de massa entre as duas últimas pesagens consecutivas fosse inferior ou igual a 0,2%. Para a obtenção dos valores de densidade básica ( $\rho_{Bás}$ ), expressa em  $g/cm^3$ , usou-se a equação:

$$\rho_{Bás} = \frac{P_o}{V_u} \quad (1)$$

Onde:

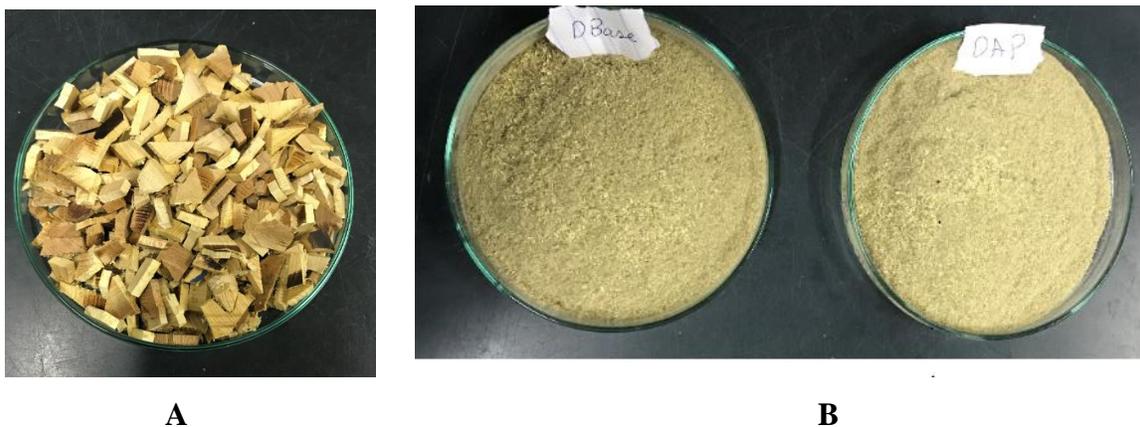
Po- peso seco (g)

Vu- volume húmido ( $cm^3$ )

### 3.3.2. Determinação do teor de cinza na madeira

As cunhas opostas usadas para a determinação da densidade foram transformadas em astilhas de 0,5 cm de espessura e, em seguida, foram reduzidas a tamanhos menores com um formão no LTM (Figura 4A). Uma parte das astilhas das 5 árvores foram misturadas em função da posição de árvore de onde foram retiradas as amostras, obtendo-se assim duas amostras compostas. A parte restante das astilhas de cada árvore foi usada para análise individualizada por árvore. Para ambos casos, a análise química imediata foi realizada em duplicatas.

De seguida, as amostras foram processadas em moinho de facas tipo Wiley (Figura 4B), e a posterior crivadas usando a peneira nº 40 de Retsch, de 0,5 mm de granulometria, como descrito na norma ASTM D1102 – 84 (2013).



**Figura 4:** Fases de preparação das amostras para determinação do teor de cinza em madeira.

**Legenda:** A – astilhas produzida a partir das cunhas; B – amostras após o processamento em moinho de facas tipo Wiley.

---

Cadinhos vazios foram colocados na mufla previamente aquecida a uma temperatura regulada a 600 °C por 10 minutos, de seguida resfriado em um dessecador por 30 minutos, e posteriormente pesados em uma balança de 0,1mg de precisão. Em seguida adicionou-se nos cadinhos 2g da amostra de serradura que passou pelo crivo de 0,5 mm e os cadinhos foram encaminhados para a estufa para a secagem a uma temperatura de 103 ± 2°C com a tampa do cadinho removida por um período de 1h, seguido o esfriamento num dessecador por 30 minutos e pesadas. O ciclo do processo foi repetido até que as amostras observassem peso anidro constante, em que a diferença entre as pesagens consecutivas fosse de 0,1 mg.

Em seguida, as amostras secas na estufa em cadinhos sem tampas foram colocadas na mufla onde foram aquecidas lentamente a partir de uma temperatura inicial de 24 °C, a uma velocidade de 4°C/min até atingirem a temperatura final de 600 °C sob a qual permaneceram até a queima total dos compostos orgânicos da madeira para a obtenção de cinza, como descrito na norma D1102 – 84, da ASTM (2013). Depois, os cadinhos foram retirados da mufla e colocados num dessecador por 1h para o resfriamento, e em seguida pesadas numa balança analítica de alta precisão. Foram realizados vários ciclos do processo, nomeadamente colocação na mufla por 30 minuto, seguido de resfriamento no dessecador por 1 hora, até que as amostras atingissem peso constante (onde as pesagens consecutivas tivessem no máximo uma diferença de 0,2 mg).

Para determinação do teor de cinza foi usada a seguinte fórmula:

$$Cz = (W_1/W_2) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Cz- Teor de cinza (%)

W<sub>1</sub>- Peso das cinzas (g)

W<sub>2</sub>- Peso da amostra seca em estufa (g).

### **3.4. Carbonização e rendimento gravimétrico do carvão vegetal**

A partir das restantes duas cunhas opostas por árvore, foram produzidas amostras com as dimensões 2x2x2 cm aproximadamente. Das amostras produzidas foram seleccionadas 3 amostras por posição por árvore para a carbonização. As amostras foram de seguida colocadas na estufa para a secagem a temperatura a 103 ± 2°C até peso constante.

---

Depois estas foram cuidadosamente envolvidos em um papel alumínio e carbonizados na mufla até uma temperatura máxima de 450°C, tendo como a temperatura inicial de carbonização de 100°C e, uma taxa de aquecimento de 2°C/min. A temperatura máxima foi atingida em 3 horas, o período após o qual a mufla permaneceu com a temperatura de 450°C estabilizada por 30 minutos. De seguida desligou-se a mufla para o arrefecimento das amostras e após 1 hora estas foram retiradas e colocadas no dessecador por 1h para o resfriamento, e pesadas em seguida.

Para a determinação do rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi usada a equação proposta por Brito e Barrichelo (1977).

$$RG (\%) = Pc/Pm \times 100 \quad (3)$$

Onde:

RG = Rendimento gravimétrico (%)

Pc = Peso do carvão (g)

Pm = Peso das amostras no estado anidro (g)

### **3.5. Análise química imediata do carvão vegetal**

As amostras de carvão produzido foram moídas de acordo com a posição por árvore através do moinho de facas do tipo Wiley. De seguida foram usadas peneiras de Retsch com granulometria de 0,85; 0,45 e 0,25 mm, para peneirar as amostras e para cada granulometria foi efectuado os cálculos para se obter as percentagens por proporção que foram de 0; 14,5 e 18,7%, respectivamente para cada peneira. Em seguida estas foram misturadas, conforme a norma D-1762-84 da ASTM (2013).

Cada posição por árvore produziu uma amostra que foi colocada em sacos plásticos herméticos fechados e devidamente identificados. A determinação da análise química imediata do carvão vegetal foi realizada em duplicata, de acordo com a norma D-1762-84 da ASTM (2013).

#### **3.5.1. Determinação do teor de materiais voláteis**

Foram colocados na mufla previamente aquecida a 750°C e por período de 10 min para aquecimento, os cadinhos e as tampas para a esta análise, e depois foram deixados em dessecador por 1h para o arrefecimento. De seguida foram pesados e adicionados em cada

---

cadinho aproximadamente 1g da amostra do carvão vegetal moído. Os cadinhos foram colocados em uma estufa regulada a  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 2h e resfriados em dessecador por 1 hora para a determinação do peso seco das amostras. As mesmas foram pesadas em uma balança analítica de 0,1mg de precisão. Repetiu-se o processo até o peso constante das amostras, em que a diferença entre as duas pesagens consecutivas fosse igual ou inferior a 0,0005g.

Para a determinação do teor de materiais voláteis das amostras do DB e DAP, aqueceu-se a mufla até  $950^{\circ}\text{C}$  e, em seguida, procedeu-se da seguinte forma com os cadinhos com amostra: colocou-se os cadinhos com tampa sobre a porta da mufla aberta por 2 min (temperatura aproximada de  $300^{\circ}\text{C}$ ); em seguida moveu-se os cadinhos para aborda externa por 3 min na borda da mufla (a uma temperatura aproximada de  $500^{\circ}\text{C}$ ); finalmente colocou-se os cadinhos no interior da mufla por 6 min com a porta da mufla fechada. Após esse período, as amostras foram retiradas da mufla e deixadas num dessecador por 1h para o resfriamento e depois, pesadas sem tampa numa balança analítica e de alta precisão. Com a seguinte equação foi determinado o teor de materiais voláteis:

$$\text{TMV (\%)} = (B-C) / B \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TMV – Teor de materiais voláteis (%)

C – Massa da amostra (g) após a secagem na mufla à  $950^{\circ}\text{C}$

### **3.5.2. Teor de cinza**

Os mesmos cadinhos usados na determinação do teor de materiais voláteis, previamente tarados foram utilizados na determinação de teor de cinza. Com a mufla regulada previamente e aquecida a  $750^{\circ}\text{C}$ , os cadinhos sem tampa foram conduzidos para o interior da mufla por aproximadamente por 6h e com a porta fechada. Posteriormente, os cadinhos foram retirados da mufla e encaminhados para o dessecador onde permaneceram durante 1h para o resfriamento, e depois pesados. Repetiu-se o processo com queima na mufla por intervalos de 1 hora até que as amostras atingissem peso constante, em que a diferença entre as duas pesagens consecutivas fosse igual ou inferior a 0,0005g. Para a determinação do teor de cinza foi usada a seguinte equação:

---

$$TCZ (\%) = (D/B) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

TCZ – Teor de cinza (%)

D- Massa da amostra (g) após a secagem na mufla à 750 °C.

### 3.5.3. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indirecta, que apresenta a quantidade de carbono residual retido no carvão vegetal após a carbonização da madeira e foi obtido por meio da equação (6), de acordo com a norma E870 – 82 da ASTM (2013):

$$TCF (\%) = 100 - (TMV + TCZ) \quad (6)$$

Onde:

TCF - Teor de carbono fixo (%)

TCZ – Teor de cinza (%)

TMV – Teor de materiais voláteis (%).

### 3.6. Análise estatística dos dados

Para a análise estatística dos dados, foi usado o *Microsoft Excell* para a organização dos dados, construção de gráficos, tabelas e cálculos dos valores mínimos, máximos, média e coeficiente de variação. Em seguida, as médias dos parâmetros determinados foram submetidas a análise de variância (ANOVA) usando o *Software Stata 14* para o cálculo do teste *t-Student*. O *Software IBM SPSS statistics* foi usado para a comparação de médias. As amostras extraídas nas posições da base e DAP foram consideradas como tratamentos e as amostras por árvore como repetições.

---

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Propriedades energéticas da madeira de *P. juliflora*

A tabela 2 ilustra os valores médios da densidade básica e teor de cinza da madeira da espécie *Prosopis juliflora* nas posições do diâmetro da base (DB) e diâmetro à altura do peito (DAP). Na posição do DB a densidade variou de 0,6867 a 0,7862 g/cm<sup>3</sup> e de 0,6470 a 0,7228 g/cm<sup>3</sup> aproximadamente na posição do DAP. O teor de cinza variou de 0,56 a 0,85% para o DB e de 0,43 a 0,74 % para o DAP.

**Tabela 2:** Densidade básica e teor de cinza da madeira de *P. juliflora*.

Características da amostra	Parâmetro	Diâmetro da base		Diâmetro altura do peito	
		Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	TCZ (%)	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	TCZ (%)
Amostras individualizadas	Média	0,7368	0,66	0,6929	0,57
	Mínimo	0,6867	0,56	0,6470	0,43
	Máximo	0,7862	0,85	0,7228	0,74
	CV (%)	5,42	16,91	4,36	22,38
Amostras compostas		-	1,84	-	1,76

**Legenda:** TCZ- teor de cinza; CV- coeficiente de variação.

Segundo Medri (2011), o coeficiente de variação (CV) é considerado de alta precisão quando o seu valor é abaixo de 20%, precisão média quando varia de 20 a 30%, e baixa precisão valor acima de 30%. Segundo o mesmo autor, o grau de homogeneidade dos dados diminui a medida em que o coeficiente aumenta.

Pode-se verificar que os resultados da densidade básica apresentam menor dispersão relativa nas amostras do DB e DAP com CV abaixo de 20%, e são considerados de alta precisão. O teor de cinza para o DB apresentou um coeficiente de variação considerado de alta precisão e de precisão média para o DAP de acordo com os intervalos estabelecidos pelo autor acima citado.

Na tabela 3, para efeitos de comparação, são apresentados os resultados da densidade básica e do teor de cinza da espécie do presente estudo (*P. juliflora*) e da espécie *B. spiciformis*, uma espécie frequente na produção de carvão vegetal, segundo Atanassov *et al.* (2012). Os detalhes da análise estatística são apresentados no Anexo 3.

**Tabela 3:** Comparação da densidade básica e do teor de cinza de madeira com valores da literatura para a posição DAP.

Espécie	Autor	Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	TCZ (%)
<i>Prosopis Juliflora</i> (Algabora)	<b>Resultados deste estudo</b>	<b>0,69a</b>	<b>0,57a</b>
	Pereira e Lima (2002)	0,84a	-
	Sirmah <i>et al.</i> (2008)	0,83a	2,84b
	Cunha (2012)	0,88a	0,58a
	Oduor e Githiomi (2013)	0,89a	1,13c
<i>Brachystegia spiciformis</i> (Messassa comum)	Massuque (2017)	0,57a	1,85d
	Fernandes (2014)	0,60a	-

**Observação:** Médias com letras iguais na mesma coluna indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre o resultado deste estudo e o da bibliografia, a 5% de nível de significância.

### Densidade básica

A densidade básica recomendada para o uso energético de um combustível lenhoso está no intervalo de 0,65 a 0,80 g/cm<sup>3</sup> (Vale *et al.*, 2002).

A densidade básica determinada no estudo para a posição do DAP apresentou uma média de 0,69 g/cm<sup>3</sup>. Pereira e Lima (2002) no estudo da qualidade da madeira de seis espécies de *Prosopis* encontraram uma densidade básica média de 0,84 g/cm<sup>3</sup>. Cunha (2012), no seu estudo sobre análise da parte aérea e tronco de algaroba (*P. juliflora*) o valor médio da densidade básica da espécie foi de 0,88 g/cm<sup>3</sup>. Sirmah *et al.* (2008), na sua pesquisa sobre propriedades da madeira de *P. juliflora* encontrou uma densidade de 0,83 g/cm<sup>3</sup> e Oduor e Githiomi (2013) pesquisando sobre propriedades energéticas da madeira de *P. juliflora* encontrou densidade de 0,89 g/cm<sup>3</sup>. O

---

valor da densidade básica encontrado no presente estudo para a mesma espécie, é próximo do valor encontrado na literatura, o que é confirmado pelo teste t, que indica que não há diferenças estatísticas entre eles (tabela 3).

*Brachystegia spiciformis* é uma espécie nativa considerada de boa qualidade energética. Massuque (2017), trabalhando com espécies nativas encontrou para a *Brachystegia spiciformis* uma densidade básica média de 0,57 g/cm<sup>3</sup> e Fernandes (2014) uma densidade básica de 0,60 g/cm<sup>3</sup>. Não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre a média de densidade básica deste estudo e os valores da bibliografia indicados acima.

Segundo Vale *et al.* (2002), ao utilizar madeiras com baixa densidade para a produção de energia, haverá uma queima rápida e menor geração de calor por unidade de volume, em relação a madeiras com maiores densidades. Madeiras mais densas produzem carvão mais denso e madeiras mais leves produzem carvão mais leve (Oliveira, 2018). De acordo com Vale *et al.* (2002), a densidade básica recomendada para o uso energético de um combustível lenhoso está no intervalo de 0,65 a 0,80 g/cm<sup>3</sup>, o que habilita a madeira da espécie estudada para fins energéticos.

### **Teor de cinza**

Uma característica comum entre espécies de boa qualidade energética é de apresentar baixos teores de cinzas na madeira, em geral abaixo de 1% (Chaves *et al.*, 2013). O teor de cinza influencia negativamente o poder calorífico, diminui a eficiência da transferência de calor, além de provocar problemas de corrosão e desgastes dos equipamentos (Barros *et al.*, 2012).

O teor de cinza da lenha para a espécie *P. juliflora* no estudo foi de 0,57 %, para amostras do DAP. Cunha (2012) encontrou um teor de cinza de 0,58%, analisando as propriedades energéticas da parte aérea e tronco de *P. juliflora* e o valor médio do estudo com do autor atrás referido não mostraram diferença estatisticamente significativa.

A comparação do teor de cinza deste estudo com os valores indicados por Sirmah *et al.* (2008) e Oduor e Githiomi (2013) mostraram diferenças estatisticamente significativas, apesar de tratar-se da mesma espécie. Vários estudos mostram que as proveniências da madeira têm influência significativa no teor de cinzas, isto pode ser explicado pelas causas externas, como a natureza do terreno e factores climáticos que influenciam o metabolismo da planta (Seabra e Oliveira, 1976).

---

A quantidade de cinza existente na madeira é fortemente relacionada com o tipo de solo e sua composição química (Mogeia, 2019; Trompowsky *et al.*, 2005)

Por outro lado, ao comparar o teor de cinza deste estudo com o de Massuque (2017) para a espécie nativa *Brachystegia spiciformis* a diferença também foi estatisticamente significativa. Segundo Pereira *et al.* (2013) o teor de cinzas pode variar em função da espécie, idade e é influenciado pelo local de crescimento, e também está ligado com a actividade fisiológica da árvore.

#### 4.2. Efeito da posição da amostra na qualidade energética da madeira

Foi analisado o efeito da posição da amostra (DB e DAP) nos parâmetros de qualidade de madeira para lenha, especificamente densidade básica e teor de cinza. A tabela abaixo mostra os resultados encontrados.

**Tabela 4:** Efeito da posição da amostra na densidade básica e teor de cinza.

<b>Posição da amostra</b>	<b>Densidade básica</b>	<b>Teor de cinza</b>
<b>DB</b>	0,74	0,66
<b>DAP</b>	0,69	0,57
<b>Valor de p</b>	0,09	0,25

**Legenda:** DB- diâmetro da base; DAP- diâmetro à altura do peito;

**Observação:**  $p \geq 0,05$  – as médias das posições do DB e DAP não apresentam diferença estatisticamente significativa entre si, a 5% de nível de significância.

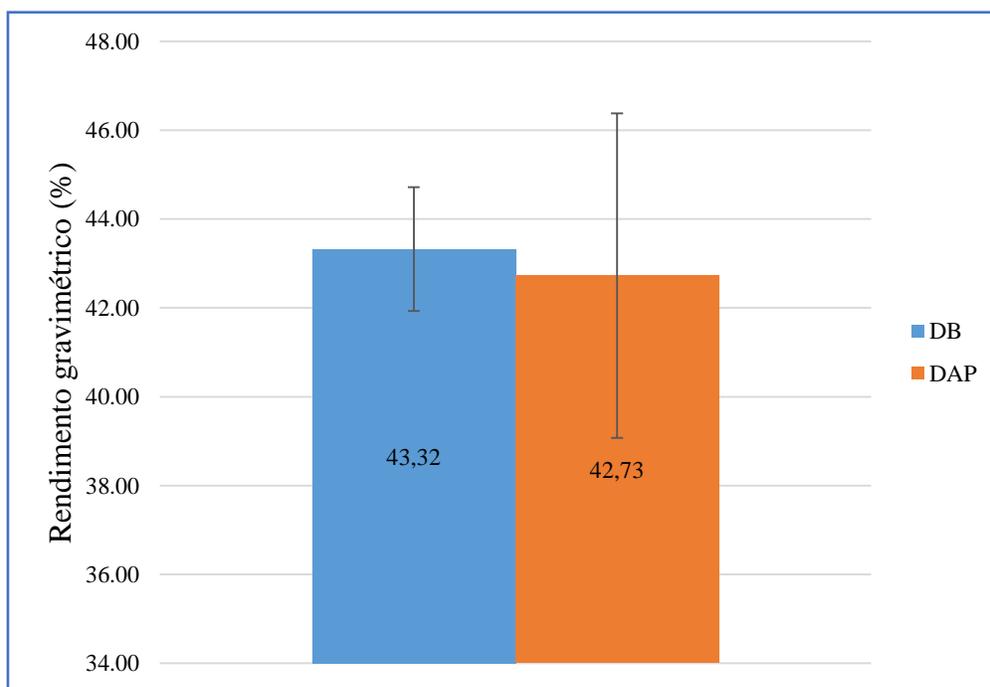
Nos resultados obtidos do teste *t-Student* para os parâmetros da densidade básica e do teor cinza da espécie *Prosopis juliflora* em função da posição das amostras, não se verificou diferenças estatísticas a 5% de nível de significância entre amostras da DB e DAP para o parâmetro da densidade básica, assim como para o teor cinza (Tabela 4 e Anexo 1), o que significa que não há interferência da posição da amostra nos parâmetros avaliados. Cunha (2012) no seu estudo sobre as propriedades energéticas da mesma espécie, estas posições também não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

---

Coelho *et al.* (2018) observou tendência similar de diminuição do teor de cinza de amostras da base (0,71%) para o DAP (0,50%), no entanto sem encontrar diferenças estatísticas do teor de cinza nas posições das árvores observadas.

### 4.3. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal

O rendimento gravimétrico expressa a quantidade de carvão produzido por unidade de peso da madeira após a sua carbonização. Os valores do rendimento observado foram de 42,73% e 43,32% para as posições do DAP e DB respectivamente (Figura 5). Entre as posições DB e DAP não se verificou diferenças estatísticas entre as médias do rendimento gravimétrico ( $p = 0,74$ ), conforme o Anexo 2.



**Figura 5:** Rendimento gravimétrico do carvão vegetal nas posições do DB e DAP.

**Legenda:** DB - diâmetro da base; DAP - diâmetro à altura do peito.

**Observação:** As linhas verticais indicam o desvio padrão.

Fonsêca *et al.* (2020) encontraram um rendimento gravimétrico de 45,05 % no seu estudo para a espécie *P. juliflora* e Pereira e Lima (2002) trabalhando com a mesma espécie encontraram um rendimento de 43,6%, resultados aproximados ao encontrado no presente estudo. O rendimento gravimétrico do carvão vegetal de *P. juliflora* apresentou-se mais alto do que das espécies usadas

---

com frequência na produção deste combustível lenhoso. Fernandes (2014) no seu estudo encontrou rendimentos médios de 38,36 e 39,72% para espécies nativas *B. spiciformis* e *B. boehmii* respectivamente. Massuque (2017) encontrou 34,95% para a *B. spiciformis* e 34,85% para a *B. boehmii*.

A maior densidade básica de *P. juliflora* em relação as espécies indicadas acima pode ser uma das causas do alto rendimento gravimétrico em carvão de *P. juliflora*. A diferença observada no rendimento gravimétrico também pode ser explicada pela diferença do tempo e taxa de aquecimento, durante o processo de carbonização.

Segundo Loureiro *et al.* (2021), para a finalidade energética, são desejados valores de rendimento gravimétrico superiores a 30%, o que qualifica *P. juliflora* para esse fim. De acordo com o mesmo autor, quanto maior o rendimento, maior será aproveitamento da madeira na carbonização, e conseqüentemente, maior produção de energia.

#### 4.4. Propriedades energéticas do carvão vegetal

Na tabela 5, encontram-se os valores médios, mínimos, máximos e respectivos coeficientes de variação da análise química imediata do carvão vegetal obtidas para as posições DB e DAP da espécie *P. juliflora*.

**Tabela 5:** Valores médios da análise química imediata do carvão vegetal de *P. juliflora*.

Parâmetro	Diâmetro da base			Diâmetro à altura do peito		
	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)
Média	23,70	2,18	74,12	24,43	2,20	73,37
Mínimo	22,04	1,73	72,99	21,93	1,69	70,64
Máximo	25,05	2,72	75,94	27,67	2,83	75,24
CV (%)	5,29	18,35	1,53	8,67	19,66	2,38

**Legenda:** TMV- Teor de Material Volátil; TCZ- Teor de Cinza; TCF- Teor de Carbono Fixo; CV-Coeficiente de Variação.

Os coeficientes de variação são classificados como sendo de alta precisão para todos os parâmetros da análise química imediata e para as duas posições das amostras, sendo que variaram de 1,53 a 19,66%. No seu trabalho, Massuque (2017) encontrou um intervalo do coeficiente de variação de 2,11 a 19,57% para diferentes espécies nativas.

Segundo Trugilho *et al.* (2005) e Botrel *et al.* (2007), para que o carvão vegetal seja considerado de boa qualidade para o uso energético deve apresentar algumas características como: alto teor de carbono fixo, baixo teor de materiais voláteis e baixo teor de cinza. Na tabela 6, são apresentados os resultados da análise química imediata do carvão vegetal do presente estudo e da literatura para o efeito de comparação.

**Tabela 6:** Comparação dos parâmetros da análise química imediata do carvão vegetal com valores da literatura para a posição DAP.

<b>Espécie</b>	<b>Autor</b>	<b>TMV (%)</b>	<b>TCZ (%)</b>	<b>TCF (%)</b>
<i>Prosopis Juliflora</i> (Algabora)	<b>Resultados deste estudo</b>	<b>24,43a</b>	<b>2,20a</b>	<b>73,37a</b>
	Pereira e Lima (2002)	22,10a	1,20b	76,70b
	Oduor e Githiomi (2013)	15,92b	2,34a	77,10a
	Fonsêca <i>et al.</i> (2020)	31,71c	1,55a	66,34c
<i>Brachystegia spiciformis</i> (Messassa)	Massuque (2017)	21,69a	4,41a	73,90a
	Fernandes (2014)	19,57d	10,60c	69,83a

**Observação:** Médias com letras iguais na mesma coluna indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre o resultado deste estudo e o da bibliografia, a 5% de nível de significância.

### **Teor de material volátil**

O teor de material volátil do carvão vegetal para a Algaroba foi de 24,43%, como ilustra a tabela 6. Estudo realizado por Pereira e Lima (2002), trabalhando com a mesma espécie, encontram teor de 22,1%, um valor próximo ao presente trabalho que é secundado por não achar-se diferença estatisticamente significativa entre ambos valores. Fonsêca *et al.* (2020)

---

encontrou uma média de 31,706% para o material volátil do carvão de *P. juliflora* e Oduor e Githiomi (2013) teve 15,92%, estas estatisticamente foram encontradas diferenças significativas com o valor do presente estudo. Estas diferenças provavelmente, podem ser explicadas pelas condições de desenvolvimento da árvore e condições de carbonização (como a temperatura, taxa de aquecimento), onde a temperatura é o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis do carvão vegetal (Oliveira *et al.*, 2010).

No presente estudo foi encontrado teor de material volátil similar ao do trabalho realizado por Massuque (2017) para a espécie nativa *Brachystegia spiciformis* (21,69%), mesmo não sendo a mesma espécie. Entretanto o valor encontrado por Fernandes (2014) para o mesmo parâmetro (19,57%) apresentou diferença estatisticamente significativa com a espécie deste estudo. Dessa forma, provavelmente, o processo de carbonização e composição química da madeira podem explicar as diferenças nos materiais voláteis no carvão vegetal (Azevedo, 2021). Segundo Oliveira (2015), quanto maior for a temperatura de carbonização, maior é o teor de carbono fixo e menor o teor de materiais voláteis. O carvão vegetal é classificado de melhor qualidade quando este parâmetro apresentar menor percentual.

### **Teor de cinza**

O teor de cinza do carvão vegetal da espécie *P. juliflora* foi de 2,20% e em alguns casos mostrou-se similar a resultados de outros estudos (Oduor e Githiomi, 2013 e Fonsêca *et al.*, 2020) e noutros casos apresentou resultados diferentes (Pereira e Lima, 2002). Para Pereira *et al.* (2013) as características do clima, solo e relevo do local de crescimento da planta podem influenciar na mudança do metabolismo da planta e é um dos factores que determina variações no teor de cinza da madeira.

Ao comparar o resultado deste estudo com o teor de cinza de *B. spiciformis*, num caso os resultados foram similares (Massuque, 2017), enquanto noutro caso foram diferentes (Fernandes, 2014).

Elevado teor de cinzas é indesejável para a utilização energética, pois os minerais reduzem o valor calórico, além de poderem provocar problemas de corrosão e desgaste nos equipamentos de queima (Massuque, 2017).

---

## Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo está associado aos resultados de cinzas e de materiais voláteis, sendo inversamente proporcional. Este valor infere a respeito da quantidade de calor gerada e o seu comportamento durante a combustão (Cavalcanti *et al.*, 2020). Teor de carbono fixo elevado e interessante, pois o processo de combustão é mais lento, o que leva a mais eficiência do processo (Vassilev *et al.*, 2010).

O teor de carbono fixo do carvão vegetal deste estudo (73,37%) foi superado pelos valores obtidos em dois estudos com a mesma espécie (Pereira e Lima, 2002 e Oduor e Githiomi, 2013), mas apresentou valor maior que o de *B. spiciformis* no estudo de Fernandes (2014), apesar de não se observar diferença estatisticamente significativa. Segundo Brito e Barrichelo (1977), maiores teores de carbono fixo nos carvões produzidos a partir das madeiras mais lignificadas, são decorrência do facto de a lignina possuir cerca de 65% de carbono elementar (C) em sua composição, contra 35% de C, que ocorre normalmente nos polissacarídeos, celulose e hemicelulose.

### 4.5. Efeito da posição da amostra nas propriedades energéticas do carvão vegetal

O efeito da posição da amostra foi analisado para os teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo do carvão vegetal da espécie *P. juliflora* (Tabela 7).

**Tabela 7:** Efeito da posição da amostra nos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Posição da amostra	T. voláteis (%)	T. cinza (%)	T. carbono fixo (%)
DB	23,70	2,18	74,12
DAP	24,43	2,20	73,37
Valor de p	0,53	0,94	0,44

**Legenda:** DB- diâmetro da base; DAP- diâmetro à altura do peito;

**Observação:**  $p \geq 0,05$  – as médias na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si a um nível de confiança de 95%.

Os resultados do teste *t-Student* (Tabela 7 e Anexo 2), não detectaram efeito estatisticamente significativo entre as posições DB e DAP para todos os parâmetros da análise química imediata.

---

O resultado encontrado quanto ao teor de carbono fixo pode ser explicado pelo facto da variável densidade básica também não ter mostrado efeito significativo nas duas posições analisadas. Madeira com maior densidade tende a ter um alto percentual do teor de lignina, portanto tende a produzir carvão vegetal com maior teor de carbono fixo e mais resistente em termos de propriedades físico-mecânicas (Gava, 2005).

Segundo Vassilev *et al.* (2010), o elevado teor de lignina na madeira tem uma correlação positiva com o rendimento e com o teor de carbono fixo do carvão e consequentemente negativa com os teores de cinzas e voláteis, o que pode se explicar pelo facto do teor de lignina que é uma componente fundamental da madeira ser mais resistente a decomposição térmica quando comparado com as outras componentes da madeira, devido a sua estrutura complexa (Rocha *et al.*, 2017).

---

## V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

Conforme os objectivos traçados e os resultados obtidos, conclui-se que:

- Os valores de densidade básica da madeira *Prosopis juliflora* estão de acordo com o apresentado por outros autores e a posição da amostra não influenciou de forma significativa nos valores desses parâmetros.
- Os valores do rendimento gravimétrico do carvão vegetal da espécie estudada encontram-se dentro do intervalo referido pela literatura, tanto para o DB como para o DAP;
- Os parâmetros da análise química imediata do carvão vegetal de *Prosopis juliflora* não diferiram entre as posições da árvore e encontram-se dentro do intervalo referido pela literatura;
- De forma geral, o rendimento gravimétrico, o teor de materiais voláteis, cinza e carbono fixo provaram que a espécie *P. juliflora*, apresenta um grande potencial para geração de energia em termo de produção do carvão vegetal de qualidade, tanto para o material proveniente da posição da base assim como do diâmetro à altura do peito.

### 5.2. Recomendações

De acordo com os resultados das análises deste estudo, recomenda-se:

- Que se faça mais pesquisas similares, e se inclua os parâmetros de teores de materiais voláteis, cinza, carbono fixo da madeira nas posições da árvore a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial;
- Nos estudos subsequentes se determine o poder calorífico da madeira e do carvão vegetal da espécie *P. juliflora*;
- Uso de amostras na forma de cunha para todas as análises para que se tenham maior representatividade das características da árvore nas regiões estudadas;
- Desenvolvimento de pesquisa incluindo a análise química imediata nas posições do cerne e borne da espécie *P. juliflora*.

---

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, C. (2012). Termodinâmica para Engenharia. FEUP edições ISBN. 978-972-752-143- 2.
- AFONSO, C. M. I. (2012). Uso da Antracologia Como Instrumento de Fiscalização do Carvão Vegetal em Moçambique; Universidade Federal do Paraná; Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal; Curitiba. p. 5-58.
- AFONSO, C., MOUTINHO, T., GUIMARÃES, C., MOUTINHO, T. (2014). Cogeração: benefícios em que condições?, Porto, Portugal, n° 32, p. 12.
- ANDRADE, L. A., FABRICANTE, J. R., OLIVEIRA, F. X. (2010). Impactos da invasão de *Prosopis juliflora* (sw) DC. (Fabaceae) sobre o estrato arbusivo-arbóreo em áreas de Caatinga no Estado da Paraíba, Brasil, Maringá, v.32, n. 3, p. 249-225.
- ARAÚJO, S. O. (2010). Propriedades de madeiras termoretificadas, Viçosa, Minas Gerais. p. 93.
- ASTM International. (2013). Standard Test Method for analysis of particulate Wood fuels. E870 - 82 (Reapproved 2013).
- ASTM International. (2013). Standard Test Method for Ash in Wood. D1102 - 84 (Reapproved 2013).
- ASTM International. (2013). Standard Test Method for Chemical Analysis of Charcoal. D1762 - 84 (Reapproved 2013).
- ATANASSOV, B., EGAS, A., FALCÃO, M., *et al.* (2012). Mozambique urban biomass energy analysis 2012. Mozambique Ministry of energy. p. 55. Disponível em: [https://www.lerenovaveis.org/contents/lerpublication/MEMOZ\\_2012\\_DEC\\_Mozambique\\_Urban\\_Bio mass\\_Energy\\_Analysis\\_2012.pdf](https://www.lerenovaveis.org/contents/lerpublication/MEMOZ_2012_DEC_Mozambique_Urban_Bio mass_Energy_Analysis_2012.pdf).
- AZEVEDO, C. F. (1982). Como e porquê a algarobeira foi introduzida no nordeste. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE ALGAROBA 1, Natal. Natal: EMPARN; p. 300-302.
- AZEVEDO, S. R. (2021). Caracterização da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes espaçamentos no Sertão Pernambucano; Universidade Federal Rural de Pernambuco; Departamento de ciência Florestal; Brasil; Recife, p. 80.

- 
- BARRICHELO, L. E. G., BRITO, J. O., MIGLIORINI, A. J. (1983). Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus spp.*In: Silvicultura. IV Congresso Florestal Brasileiro. São Paulo/SP, p. 726-731.
  - BARROS, S. V. S., NASCIMENTO, C. C., AZEVEDO, C. P. (2012). Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no Amazonas: alternativa para produção de lenha, FLORESTA, Curitiba, PR, v. 42, n. 4, p. 725 – 732.
  - BARROS, S. V., NASCIMENTO, C. C., AZEVEDO, C. P., PIO, N. S., COSTA, S. S. (2009). Avaliação do potencial energético das espécies florestais *Acácia auriculiformis* e *Ormosia paraensis* cultivadas no município de Iranduba/Amazonas, Brasil, vol. 15.
  - BERSCH, A., P., (2016). Caracterização energética da madeira de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus sp.*; Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná; p.11-20.
  - BONDUELLE, G. M., IWAKIRI, S., TRIANOSKI, R., PRATA, J. G., ROCHA, V. Y. (2015). Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de *Tectona grandis* nos sentidos axial e radial do tronco. Revista Floresta, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 971-680. Disponível: doi:10.5380/rf.v45i4.3191.
  - BOTREL, M. C. G., TRUGILHO, P. F., ROSADO, S. C. Da S., SILVA, J. R. M. Da. (2007). Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398.
  - BRITO, J. M., WITTMANN, F., SCHÖNGART, J., PIEDADE, M. T. F., SILVA, R. P. (2008). Guia de 42 Espécies Madeireiras da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Tefé: IDSM – OS, p.149.
  - BRITO, J. O. & BARRICHELO, L. E. G. (1977). Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal. 1. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. IPEF, Piracicaba, (14): 9-20.
  - BROWNING, B.L. (1963). The chemistry of wood. New York, John Wiley & Sons; p. 689.
  - BURKART, A. (1976). A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). Journal of the Arnold Arboretum, Cambridge, v. 57, p. 219.

- 
- CAMPOS, A. (2009). Estudo potencial energético de combustíveis derivados da biomassa: construção de um calorímetro isoperibólico. 17º Congresso de iniciação científica, UNIMEP, Piracicaba, p. 13.
  - CARDOSO, B. M. (2012). Uso da Biomassa como Alternativa Energética. Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, Brasil, p. 112.
  - CAVALCANTI, I. L., MOURA, I. A., CRUZ, A.D., SILVA, M. C., LOPES, R. M., (2020). Chemical characterization of algaroba biomass waste for energy studies. DOI:10.34117/bjdv6n1-061, v. 6., n.1., p. 872-881.
  - CHAVANA, R., (2014). Estudo da cadeia de valor de carvão vegetal no sul de Moçambique, Relatório Preliminar de Pesquisa No. 10P, p. 45. Disponível: <https://ageconsearch.umn.edu/record/186602>.
  - CHAVES, A. M. B., VALE, A. T., MELIDO, R. C. N., ZOCH, V. P. (2013). Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp*; ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p. 534.
  - CHEN W. H., LIN B. J., HUANG M. Y., CHANG J. S. (2015). Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review. *Bioresource Technology*, p. 184, 314-327. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.050>.
  - CIRILO, N. R., NETO, P. N., RIBEIRO, L. S., *et al.*, (2020). Characterization of *Prosopis juliflora* wood used in the ceramic industry in the brazilian semiarid., v. 16., n. 4., p.178.
  - COELHO, S., SAMPAIO, J., & ANDRADE, F. (2018). Características químicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* no sentido base-topo. XVI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas da Madeira e III Congresso Latino-Americano de Estruturas da Madeira. São Carlos: EESC-USP. p. 1-10.
  - COSTA, A.C.S., OLIVEIRA, A.C., FREITAS, A., LEAL, C.S., PEREIRA, B.L.C. (2017). Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializado em Cuiabá –MT. *Nativa, Sinop*, v. 5, n. 6, p. 456-461.
  - COSTA, G, P; MORAES, J, T. (2011). A Fabricação de Briquetes como Alternativa para Destinação Adequada dos Resíduos de Madeira na Indústria Moveleira no ES.5 p. Vitória, p. 56.

- 
- COSTA, T. G. (2011). Propriedades da madeira de espécies do cerrado mineiro e sua potencialidade para geração de energia; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Lavras-MG, p. 77.
  - COUTO, C. M. (2014). Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas – RS; Trabalho de Conclusão de Curso; Universidade Federal de Pelotas; Brasil, p. 16-30.
  - CUAMBA, B. C., CHENENE, M. L., EGAS, A. F., VAZ, K. (2016). The environmental, social and economic cobenefits of charcoal substitution in Mozambique. p. 81.
  - CUNHA, A. B. (2012). Análise das propriedades físicas, mecânicas e energéticas da parte aérea e tronco de algaroba (*Prosopis juliflora*); Dissertação de Mestrado; Universidade de Brasília; Departamento de Engenharia Florestal; Brasília; p. 40.
  - CUNHA, M. P. S. C., PONTES, C. L. F., CRUZ, I. A., *et al.* (1989). Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. 3º Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: São Carlos. Anais, v. 2, p. 93-120.
  - DIBDIAKOVA, J., WANG, L., LI, H. (2017). Heating value and ash content of downy birch forest biomass. Energy Procedia, 105, 13021308.  
Disponível: <https://www.fnds.gov.mz/index.php/pt/documentos/relatorios/anexo-3-cadeia-de-combusti-veis-lenhosos-nos-distritos-da-paisagem-de-cabo-delgado-2016>.
  - EGAS, A. F., FERNANDES, A. M., BILA, N. F., WILISSONE, A. (2016). Cadeia de fornecimento e consumo de combustíveis lenhosos nas cidades de Pemba e Montepuéz, FNDS; Relatório sobre cadeia de combustíveis lenhosos; Maputo; p. 36.
  - ELOY, E. (2013). Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios de curta rotação. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, p. 89.
  - FALCÃO, D. M. S. C de S. (2013). Produção e Consumo Doméstico de Combustíveis Lenhosos em Moçambique. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa. Portugal. p. 3 – 18.
  - FERNANDES, A. M. (2014). Análise da produção de madeira para o fornecimento sustentável de energia doméstica aos centros urbanos de Moçambique; Tese de

---

Doutoramento; Centro de Ciências Florestais e da Madeira; Universidade Federal do Paraná; Curitiba, p. 137.

- FERRAZ, I. D. K., LEAL FILHO, N., IMAKAWA, A. M., VARELA, V. P., PINARODRIGUES, F. C. M. (2004). Características básicas para um agrupamento ecológico preliminar de espécies madeireiras da floresta de terra firme da Amazônia Central; Brasília; 34(4): 621-633.
- FONSÊCA, C. M. B., OLIVEIRA, E., CALEGARI, L., *et al.* (2020); Energy potential of coal from *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. and *Ziziphus joazeiro* (Martius); Brasil; v. 30., p. 613. <https://doi.org/10.5902/198050985070>.
- FONSÊCA, C. M. B. (2011). Estudo comparativo do potencial energético do juazeiro (*Ziziphus joazeiro* Martius) e da Algarobeira (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) na produção de carvão no semiárido Paraibano; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Saúde e Tecnologia Rural – CSTR; Brasil; p.59.
- GAVA, J. L. (2005). Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus grandis* para produção de celulose, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP; Piracicaba, p. 54.
- GOIDA, A. (2019). Características e procedência da lenha usada na cocção no Brasil, p. 143.
- GONDIM, F. O. R. (2018). Potencial energético das espécies *Mimosa tenuiflora* (Willd) Poir E *Prosopis juliflora*; Trabalho de culminação de curso; Universidade Federal do Ceará; Brasil; p. 26-28.
- GOOR, A. Y., BARNEY, C. W. (1976). Forest tree planting in arid zone. 2 ed. New York: Ronald; p. 504.
- GREENLIGHT. (2021); Cadeia de Valor e Mercado de Combustíveis Lenhosos em Moçambique; Projecto UTFMOZ123MOZ e GCP MOZ124MOZ; Moçambique; p. 96.  
Disponível: [http://www.dinaf.gov.mz/wp-content/uploads/2021/12/PNF\\_Cadeia-de-Valor-e-Mercados-de-Combustiveis-Lenhosos.pdf](http://www.dinaf.gov.mz/wp-content/uploads/2021/12/PNF_Cadeia-de-Valor-e-Mercados-de-Combustiveis-Lenhosos.pdf).

- 
- HAMELINCK C. N., VAN HOOIJDONK G. AND FAAIJ A. P. C. (2005). Ethanol from lingo cellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle- and longterm, Biomass & Bioenergy 28, 384–410.
  - KLAUTAU, J. V. P. (2008). Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Paraná; Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná; Curitiba, p.192.
  - KLITZKE, R.J. (2013). Curso de secagem da madeira – Módulo 01; Trabalho de culminação de curso; Universidade Federal Rural de Pernambuco; Departamento de Ciência Florestal; p. 1 – 119.
  - KLOCK, U. & ANDRADE, A. S. (2013). Química da madeira; Manual de apoio; Universidade Federal do Paraná; Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal – 4 ed; Curitiba, p. 87.
  - LIPPEL. (2021). Cavacos de madeira. Disponível: <https://www.lippel.com.br/artigos-academicos/cavacos-de-madeira/>. Acessado: 21 Novembro 2023.
  - LOUREIRO, B. A., ASSIS, M. R., MELO, I. C., *et al.* (2021). Carbonization gravimetric yield and qualitative characterization of charcoal from hybrid *Corymbia spp* clones for industrial use. Ci. Fl., Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 214-232.
  - MAGALHÃES, T. M. (2018). Inventário florestal nacional. CEAGRE, Moçambique, p. 9 0.
  - MALATE, J. Y. (2017). Importância dos recursos florestais na comunidade de combomun e, distrito de Mabalane, Moçambique, IPB. Bragança, p. 112.
  - MARAFON, A. C., SANTIAGO, A. D., AMARAL, A. F. C., BIERHALS, A. N., Paiva, H. L., GUIMARAES, V. (2016). Uso da biomassa para geração de energia, Aracaju, 1 ed, p. 28.
  - MASSUQUE, J. Z. (2017). Potencial energético de espécies procedentes de plano de manejo florestal sustentado no norte de Moçambique, Dissertação de Mestrado; Universidade de Lavras; Lavras-MG, p.50.
  - MAYDELL, H. F. (1978). Tree and shrub species for agroforestry systems in Sahelian zone of Africa. Hamburg: [s.n.]; Trabalho apresentado no EighthWorld Forestry Congress, Jakarta, p.19.

- 
- MCKENDRY, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. BioresourceTechnology, Vol. 83, N. 1, p. 37-46.
  - MEDEIROS, C. A., REZENDE, M. E. A. (1983). Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. Revista da Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, v. 13, n. 9, p. 42-48.
  - MEDRI, W., (2011). Análise exploratória de dados. Curso de Especialização “Lato Sensu” em Estatística, Universidade Estadual de Londrina; Londrina; p. 82.
  - MENDES, B. V. (1987). Potencialidades de utilização da algaroba (*Prosopis juliflora* (SW) DC) no semi-árido brasileiro. Mossoró:ESAM; p. 448.
  - MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL (2005). Perfil do distrito de Chókwé província de Gaza, p.38.
  - MINISTÉRIO DE TERRA E AMBIENTE (2021). Moçambique celebra o dia internacional das florestas conservando e plantando mais arvore em; Disponível: [https://www.biofund.org.mz/noticia\\_sobre\\_o\\_dia\\_internacional\\_das\\_florestas\\_21de\\_marco/](https://www.biofund.org.mz/noticia_sobre_o_dia_internacional_das_florestas_21de_marco/), consultado no dia 08 de Novembro de 2022.
  - MIRAS, P. Z., MAHAMANE, M., METZGER, M. J., *et al.* (2018). Environmental Conservation and Social Benefits of Charcoal Production in Mozambique, ELSEVIER, p. 12.
  - MOGEIA, S. S. L. S. (2019). Avaliação do teor de cinza da madeira de cinco espécies de *Eucalyptus* de diferentes idades e proveniência, Dissertação de Mestrado, p.73.
  - MORALES, M. M., NOGUEIRA, R. M. (2021). Lenha e carvão: na fonalha, churrasqueira ou no fogão, Vol. 1 – N. 21, ISSN 2763-5228, p.2.
  - MOREIRA, J. M. M. Á. P. (2011). Potencial de Participação das florestas na matriz energética. Pesquisa Florestal Brasileira. Colombo, v. 31, n. 68, p. 363-367.
  - MUNIZ, H. C; CORREIA, J. M. F; LUCATO, W. C; NETO, G. C. O. (2017). Ganho económico e redução de emissão de gases de efeito estufa com a utilização de briquete como fonte de energia calorífica para fornos: estudo de caso em duas pizzarias, UNINOVE; Brasil, p. 9.
  - NASCIMENTO, C. E. (2008). Comportamento invasor da Algarobeira *Prosopis juliflora* (sw) dc. nas planícies aluviais da catinga; Tese de Doutorado; Universidade Federal de Pernambuco; p. 116.

- 
- NASCIMENTO, C. E. de S. (1993). Propagação vegetativa da algarobeira por estaquia em casa de vegetação e em condições de telado. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, p. 10.
  - NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. (1980). Firewood crops: shrub and tree species for energy production. Washington, DC, p. 237.
  - NEVES, T. A., PROTASIO, T. P., TRUGILHO, P. F., *et al* (2011). Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330.
  - NOBRE, F.V. (1984). Substituição do farelo de trigo (*Triticum vulgare*) pelo fruto triturado da algarobeira (*Prosopis juliflora* (SW) DC), na alimentação de vacas em lactação. In: Simpósio Brasileiro sobre Algaroba, 1. Anais. Natal: RN. EMPARN, p. 344-359.
  - OLIVEIRA, A. C., CARNEIRO, A.D., VITAL, B. R., *et al.* (2010). Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muel. Scientia Forestalis, V. 38, p. 431.
  - OLIVEIRA, D. C. B. (2015). Análise física e química da madeira de clone de eucalipto GFMO-27; Trabalho de culminação de curso; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Coordenação de Engenharia Florestal; Brasil; p. 35.
  - OLIVEIRA, H. B. (2018). Análise imediata e avaliação do poder calorífico superior das espécies *Combretum leprosum* mart. (Mofumbo) e *Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan (Angico). Universidade Federal do Ceará; Departamento de Engenharia Mecânica; Fortaleza, p.37.
  - ORWA *et al.* (2009). *Prosopis africana*, Agroforestry Database 4.0, p. 5.
  - OUDOR, N. M., GITHIOMI, J. K. (2013). Propriedades energéticas da madeira combustível de *Prosopis juliflora* e *Prosopis pallida* cultivado no distrito de Baringo, Quênia, Vol. 8(21), Jornal Africano de Agricultura, p. 6, DOI: 10.5897/AJAR08.221.
  - PALERMO, G. P. M. *et al.* (2012) Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. Floresta e Ambiente, v.11, n.1, p.1-6
  - PASIECZNIK, N. M, PJC HARRIS & SJ SMITH. (2004). Identifying Tropical *Prosopis* species - A Field Guide. HDRA, Coventry, UK.

- 
- PASIECZNIK, N. M.; FELKER, P.; HARRIS, P. J. C.; HARSH, L. N.; CRUZ, G.; TEWARI, J. C.; CADORET, K.; MALDONADO, L. J.(2001). The *Prosopis juliflora* – *Prosopis pallida* complex: a monograph. Coventry, UK: HDRA; p. 177.
  - PEDRAZZI, C., DICK, G., COLDEBELLA, R., GENTIL, M., GIESBRECHT, B. R., ROSA, R. C. (2019). Química da madeira, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, ed. 1. ISSN 1984-6118, p. 69.
  - PEREIRA, B. L. C., OLIVEIRA, A. C., CARVALHO, A. M. M. L. *et al.* (2013). Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal Scientia Florestalis, v. 41. n 98. p.217-225.
  - PEREIRA, J. C. D; STURION, J. A; HIGA, A. R., *et al.* (2000). Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Documento 38, Colombo: Embrapa Florestas.
  - PEREIRA, J. C., LIMA, P. C. (2002). Comparação da Qualidade da Madeira de Seis Espécies de Algarobeira para a Produção de Energia. Bol. Pesq. Fl., Colombo, n. 45, p. 99-107.
  - PETTERSEN, R.C. (1984). The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (ed.) The chemistry of solid wood. Washington, American Chemical Society, p. 7.
  - QUIRINO, W. F. (2002). Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, p.35.
  - RIBASKI, J., DRUMOND, M. A., DE OLIVEIRA, V. R., NASCIMENTO, C. E.S. (2009). Algaroba (*Prosopis juliflora*): Árvore de Uso Múltiplo para a Região Semiárida Brasileira; Brasil; p. 2-7.
  - ROCHA, M. F. V., VITAL, B. R., CARNEIRO, A. C. O., CARVALHO, A. M. M. L., ZANUNCIO, A. J. V., HEIN, P. R. G. (2017). Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. Ciência da Madeira, v. 8, n. 2, p. 54-63. Doi: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p54-63>.
  - ROSILLO-CALLE, F. (2016). A review of biomass energy–shortcomings and concerns; Journal of Chemical Technology and Biotechnology; p. 103.
  - SANTOS, H. C. M., OLIVEIRA, E., ALMEIDA, A. M. C. (2009). Determinação da densidade básica das madeiras de *Amburana cearensis* (Allem) A. C. Smith e *Piptadenia*

---

stipulacea (Benth) Ducke. Anais.VI Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, p. 6.

- SANTOS, J. R. S. (2012). Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos; Escola Superior de Agricultura, Dissertação de Mestrado; Piracicaba, p. 85.
- SCHURHAUS, P., (2007). Produtos e propriedades energéticas da madeira, revisão 00, Centro Universitário de União da Vitória (UNIUV), Paraná; p.162.
- SEABRA, L. DE., OLIVEIRA, J. F. S. (1976). Contribuição para o estudo da influência das técnicas de preparação laboratorial sobre a composição mineral de pastas de eucalipto. TLA/3. IAC, p.24.
- SHINYA, Y. e Y. MATSUMURA (Eds). (2008). The Asian Biomass Handbook – A Guide for Biomass Production and Utilization. The Japan Institute of Energy.Shinya Yokoyama. p.326.
- SILVA, V. F. (2021). Processos termoquímicos de conversão de biomassa; Tese de Mestrado; Instituto Politécnico de Bragança; Bragança, p. 109.
- SIRMAH, P., MUISU, F. *et al.* (2008). Evaluation of *Prosopis juliflora* properties as an alternative to wood shortage in Kenya. Universit Faculté des sciences et techniques, Kenya., p. 35.
- SITOIE, A. A., MIRIRA, R; TCHAUQUE, F. (2007). Avaliação dos níveis de consumo da energia de biomassa nas províncias de Tete, Nampula, Zambézia, Sofala, Gaza e Maputo, Ministério de energia- Relatório final, p. 50.
- SOARES, J. M. (2016). Avaliação da qualidade de três diferentes tipos de cavacos de madeira do híbrido *Eucalyptus urophila x grandis*; Trabalho de culminação de curso; Universidade Federal do Paraná; Curitiba, p.47.
- SOARES, V. C., BIANCHI, M. L., TRUGILHO, P. F *et al.* (2014). Correlations between the properties of *Eucalyptus* hybrids wood and charcoal, v.38, n.3, p.543-549.
- SOUZA, S.S., VEREJÃO, M. C., NASCIMENTO, C. C. (2007). Avaliação do teor de cinza e sílica em espécies madeireiras. XVI Jornada de iniciação científica PIBIC CNPq/INPA. Manaus.
- STEIERER, B. F. (2011). Highlights on wood charcoal: 2004-2009. FAOSTAT-Fores STAT, p. 1-3.

- 
- TOSTE, G. E. (2011). A viabilidade do aproveitamento da biomassa de plantas invasoras para a produção de electricidade na ilha Terceira, Dissertação de mestrado; Universidade dos Açores; Departamento de Ciências Agrárias; Angra do Heroísmo; p. 7-38.
  - TROMPOWSKY, P. M., BENITES, V. M., MADARI, B. E. *et al.* (2005). Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of Eucalyptus charcoal. *Organic Geochem*, 36:1480-1489.
  - TRUGILHO, P. F. (2016). Energia da biomassa florestal, p.17.
  - TRUGILHO, P. F., SILVA, J. R. M., MORI, F. A., LIMA, J. T., MENDES, L. M. & MENDES, L. F. B. (2005). Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de Eucalyptus. *Cerne*. Lavras. v. 11. n. 2. p.178-186.
  - TRUGILHO, P. F., SILVA, D. A. (2001). Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril L.*). *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 2, p.45 – 53.
  - VALE, A. T., FIEDLER, N. C., DA SILVA, G. F. (2002). Energetic evaluation of the biomass of “ cerrado” in function of the diameter of the trees, v. 12, n. 2, p. 115-126.
  - VALE, A.T., BRASIL, M.A.M. e LEÃO, A.L. (2003). Caracterização da madeira e da casca de *Sclerolobium paniculata*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético. *Madera y Bosques*, 15 (2): 59-69.
  - VASSILEV, S. V., BAXTER, D. *et al.* (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, v. 89, n. 5, p. 913– 933.
  - VIEIRA, A. C. (2012). Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas; Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR, pag 20-25.
  - VITAL, B. R. (1984). Métodos de determinação da densidade da madeira. In: Boletim técnico SIF - 01. Viçosa: MG, p. 21.
  - VITAL, R. B. (2013). Qualidade da madeira para fins energéticos. In: Santos, F. *et al.* (Ed.). *Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais*. Viçosa, MG; 322-323.

- 
- WALTER, K. (2011). Prosopis, an Alien among the Sacred Trees of South India. Doctoral dissertation (monograph), University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry, Department of Forest Sciences.
  - ZANONI, P. R. S. (2013). Processos termoquímico; Op-CP-49, opiniões, Embrapa Florestas, p. 1.
  - ZAQUE, L. A. M.; FERREIRA, M. D.; MELO, R. R. (2018). Variação radial e longitudinal da massa específica básica da madeira de *Araucaria angustifolia* com diferentes idades. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 38, p. 1-5. Disponível: doi: 10.4336/2018.pfb.38e201601368.
  - ZORZAN, F., PINTO, J. P., PAZ, J. M., PASA, M. E., MANTOVANI, C. A. (2011). Desenvolvimento da concepção de uma máquina compactadora de resíduos vegetais para produção de briquetes. SIEF – Semana Internacional das Engenharias da FAHOR; p. 6.

---

## VII. ANEXOS

### Anexo 1. Análise estatística do efeito da posição da amostra na densidade básica e teor de cinza da madeira

**Anexo 1.1:** Test *t-Student* para efeito da posição do diâmetro da base e diâmetro à altura do peito na densidade básica de *P. juliflora*.

```
. ttest densidadebasica, by(tratamento)
```

Two-sample t test with equal variances

Group	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DAP	5	.6929129	.0135154	.0302213	.6553882	.7304377
Dbase	5	.7367636	.0178548	.0399246	.6871906	.7863366
combined	10	.7148383	.0128394	.0406016	.6857936	.7438829
diff		-.0438507	.0223933		-.0954898	.0077884

diff = mean(DAP) - mean(Dbase) t = -1.9582  
Ho: diff = 0 degrees of freedom = 8

Ha: diff < 0 Ha: diff != 0 Ha: diff > 0  
Pr(T < t) = 0.0429 Pr(|T| > |t|) = 0.0859 Pr(T > t) = 0.9571

**Anexo 1.2:** Test *t-Student* para efeito da posição do diâmetro da base e diâmetro à altura do peito teor de cinza de *P. juliflora*.

```
. ttest cinza, by(tratamento)
```

Two-sample t test with equal variances

Group	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DAP	5	.5691192	.0569701	.1273889	.410945	.7272934
Dbase	5	.6628191	.0501216	.1120753	.5236592	.801979
combined	10	.6159691	.0390305	.1234254	.5276759	.7042623
diff		-.0936999	.0758799		-.2686793	.0812795

diff = mean(DAP) - mean(Dbase) t = -1.2348  
Ho: diff = 0 degrees of freedom = 8

Ha: diff < 0 Ha: diff != 0 Ha: diff > 0  
Pr(T < t) = 0.1260 Pr(|T| > |t|) = 0.2519 Pr(T > t) = 0.8740

---

**Anexo 2. Análise estatística do efeito da posição da amostra no rendimento gravimétrico, teores de materiais voláteis, cinza e carbono fixo de carvão vegetal**

**Anexo 2.1:** Test *t-Student* para efeito da posição do diâmetro da base e diâmetro à altura do peito no rendimento gravimétrico de *P. juliflora*.

```
. ttest rg, by(tratamento)
```

Two-sample t test with equal variances

Group	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DAP	5	42.72708	1.633599	3.652839	38.19148	47.26268
DB	5	43.32458	.6225015	1.391956	41.59624	45.05292
combined	10	43.02583	.8300977	2.625	41.14802	44.90364
diff		-.5975014	1.748186		-4.628825	3.433823

```
diff = mean(DAP) - mean(DB)                                t = -0.3418
Ho: diff = 0                                               degrees of freedom = 8
```

```
Ha: diff < 0                Ha: diff != 0                Ha: diff > 0
Pr(T < t) = 0.3707          Pr(|T| > |t|) = 0.7413          Pr(T > t) = 0.6293
```

**Anexo 2.2:** Test *t-Student* para efeito da posição do diâmetro da base e diâmetro à altura do peito no teor de material volátil de *P. juliflora*.

```
. ttest tmv, by(tratamento)
```

Two-sample t test with equal variances

Group	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DAP	5	24.428	.9466594	2.116795	21.79965	27.05635
DB	5	23.7	.5608474	1.254093	22.14284	25.25716
combined	10	24.064	.5327	1.684545	22.85895	25.26905
diff		.7279999	1.100324		-1.809353	3.265353

```
diff = mean(DAP) - mean(DB)                                t = 0.6616
Ho: diff = 0                                               degrees of freedom = 8
```

```
Ha: diff < 0                Ha: diff != 0                Ha: diff > 0
Pr(T < t) = 0.7366          Pr(|T| > |t|) = 0.5268          Pr(T > t) = 0.2634
```

**Anexo 2.3:** Test *t-Student* para efeito da posição do diâmetro da base e diâmetro à altura do peito no teor de cinza de *P. juliflora*.

```
. ttest teordecinzas, by(tratamento)
```

Two-sample t test with equal variances

Group	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DAP	5	2.200656	.1935051	.4326905	1.6634	2.737912
DB	5	2.179003	.1787795	.3997632	1.682632	2.675375
combined	10	2.189829	.1242443	.392895	1.908769	2.47089
diff		.0216526	.2634508		-.585866	.6291713

```
diff = mean(DAP) - mean(DB)                                t = 0.0822
Ho: diff = 0                                               degrees of freedom = 8
```

```
Ha: diff < 0                Ha: diff != 0                Ha: diff > 0
Pr(T < t) = 0.5317          Pr(|T| > |t|) = 0.9365          Pr(T > t) = 0.4683
```

**Anexo 2.4:** Test *t-Student* para efeito da posição do diâmetro da base e diâmetro à altura do peito no teor de carbono fixo de *P. juliflora*.

```
. ttest tcf, by(tratamento)
```

Two-sample t test with equal variances

Group	Obs	Mean	Std. Err.	Std. Dev.	[95% Conf. Interval]	
DAP	5	73.37134	.7817065	1.747949	71.20098	75.54171
DB	5	74.121	.5056988	1.130777	72.71695	75.52504
combined	10	73.74617	.4563244	1.443024	72.71389	74.77845
diff		-.7496536	.9310189		-2.896587	1.39728

```
diff = mean(DAP) - mean(DB)                                t = -0.8052
Ho: diff = 0                                               degrees of freedom = 8
```

```
Ha: diff < 0                Ha: diff != 0                Ha: diff > 0
Pr(T < t) = 0.2220          Pr(|T| > |t|) = 0.4440          Pr(T > t) = 0.7780
```

---

### Anexo 3. Comparação dos resultados de densidade básica e teor de cinza da lenha do presente estudo com os da bibliografia

**Anexo 3.1:** Comparação dos resultados de densidade básica do presente estudo com o autor Pereira e Lima (2000)

Independent Samples Test					
	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,143	,172	-,829	17,000	,418
Equal variances not assumed	-,143	,162	-,882	7,994	,403

Hartley test for equal variance: F = 1.284, Sig. = 0.4187

**Anexo 3.2:** Comparação dos resultados de densidade básica do presente estudo com o autor Cunha (2012)

Independent Samples Test					
	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,187	,134	-1,394	8,000	,201
Equal variances not assumed	-,187	,134	-1,394	4,002	,236

Hartley test for equal variance: F = 3600.000, Sig. = 0.0000

**Anexo 3.3:** Comparação dos resultados de densidade básica do presente estudo com o autor Sirmah *et al.* (2008)

Independent Samples Test					
	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,143	,622	-,230	21,000	,820
Equal variances not assumed	-,143	,347	-,412	20,769	,685

Hartley test for equal variance: F = 20.551, Sig. = 0.0017

**Anexo 3.4:** Comparação dos resultados de densidade básica do presente estudo com o autor Oduor e Githiomi (2013)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,198	,224	-,882	13,000	,394
Equal variances not assumed	-,198	,196	-1,012	11,560	,332

Hartley test for equal variance: F = 2.250, Sig. = 0.1919

**Anexo 3.5:** Comparação dos resultados de densidade básica do presente estudo com o autor Massuque (2017)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	,124	,172	,722	8,000	,491
Equal variances not assumed	,124	,172	,722	7,632	,492

Hartley test for equal variance: F = 1.562, Sig. = 0.3181

**Anexo 3.6:** Comparação dos resultados de densidade básica do presente estudo com o autor Fernandes (2014)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	,093	,062	1,489	24,000	,149
Equal variances not assumed	,093	,134	,692	4,019	,527

Hartley test for equal variance: F = 100.000, Sig. = 0.0000

**Anexo 3.7:** Comparação dos resultados do teor de cinza do presente estudo com o autor Sirmah *et al.* (2008)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-2,270	,551	-4,120	21,000	,000
Equal variances not assumed	-2,270	,290	-7,822	18,129	,000

Hartley test for equal variance: F = 101.674, Sig. = 0.0000

**Anexo 3.8:** Comparação dos resultados do teor de cinza do presente estudo com o autor Cunha (2012)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,010	,054	-,184	8,000	,859
Equal variances not assumed	-,010	,054	-,184	4,222	,863

Hartley test for equal variance: F = 36.000, Sig. = 0.0006

**Anexo 3.9:** Comparação dos resultados do teor de cinza do presente estudo com o autor Oduor e Githiomi (2013)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,560	,150	-3,725	13,000	,003
Equal variances not assumed	-,560	,115	-4,889	12,542	,000

Hartley test for equal variance: F = 7.111, Sig. = 0.0214

**Anexo 3.10:** Comparação dos resultados do teor de cinza do presente estudo com o autor Massuque (2017)

<b>Independent Samples Test</b>					
	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-1,280	,326	-3,921	8,000	,004
Equal variances not assumed	-1,280	,326	-3,921	4,222	,016

Hartley test for equal variance: F = 36.000, Sig. = 0.0006

**Anexo 4:** Comparação dos resultados da análise química imediata do carvão vegetal do presente estudo com os da bibliografia

**Anexo 4.1:** Comparação dos resultados do teor de cinza do estudo com o autor Pereira e Lima (2002)

<b>Independent Samples Test</b>					
	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	1,000	,277	3,606	17,000	,002
Equal variances not assumed	1,000	,244	4,104	9,267	,003

Hartley test for equal variance: F = 1.696, Sig. = 0.2918

**Anexo 4.2:** Comparação dos resultados do teor de cinza do estudo com o autor Oduor e Githiomi (2013)

<b>Independent Samples Test</b>					
	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,140	,228	-,614	13,000	,550
Equal variances not assumed	-,140	,232	-,604	7,751	,563

Hartley test for equal variance: F = 1.100, Sig. = 0.4180

**Anexo 4.3:** Comparação dos resultados do teor de cinza do estudo com o autor Fonseca *et al.* (2020)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	,650	,330	1,969	8,000	,084
Equal variances not assumed	,650	,330	1,969	7,251	,088

Hartley test for equal variance: F = 1.947, Sig. = 0.2411

**Anexo 4.4:** Comparação dos resultados do teor de cinza do estudo com o autor Massuque (2017)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-2,210	1,444	-1,531	8,000	,164
Equal variances not assumed	-2,210	1,444	-1,531	4,144	,198

Hartley test for equal variance: F = 55.381, Sig. = 0.0002

**Anexo 4.5:** Comparação dos resultados do teor de cinza do estudo com o autor Fernandes (2014)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-8,400	1,547	-5,430	24,000	,000
Equal variances not assumed	-8,400	,766	-10,960	22,275	,000

Hartley test for equal variance: F = 62.520, Sig. = 0.0001

**Anexo 4.6:** Comparação dos resultados do teor de material volátil do estudo com o autor Pereira e Lima (2002)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	2,330	1,639	1,422	17,000	,173
Equal variances not assumed	2,330	1,313	1,774	11,689	,102

Hartley test for equal variance:  $F = 2.572$ , Sig. = 0.1517

**Anexo 4.7:** Comparação dos resultados do teor de material volátil do estudo com o autor Oduor e Githiomi (2013)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	8,510	1,976	4,306	13,000	,001
Equal variances not assumed	8,510	1,606	5,298	12,900	,000

Hartley test for equal variance:  $F = 3.740$ , Sig. = 0.0791

**Anexo 4.8:** Comparação dos resultados do teor de material volátil do estudo com o autor Fonseca *et al.* (2020)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-7,280	2,511	-2,899	8,000	,020
Equal variances not assumed	-7,280	2,511	-2,899	5,294	,032

Hartley test for equal variance:  $F = 6.016$ , Sig. = 0.0355

**Anexo 4.9:** Comparação dos resultados do teor de material volátil do estudo com o autor Massuque (2017)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	2,740	1,694	1,617	8,000	,145
Equal variances not assumed	2,740	1,694	1,617	7,019	,150

Hartley test for equal variance: F = 2.194, Sig. = 0.2044

**Anexo 4.10:** Comparação dos resultados do teor de material volátil do estudo com o autor Fernandes (2014)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	4,860	1,347	3,608	24,000	,001
Equal variances not assumed	4,860	1,129	4,304	7,774	,003

Hartley test for equal variance: F = 1.757, Sig. = 0.2773

**Anexo 4.11:** Comparação dos resultados do teor de carbono fixo do estudo com o autor Pereira e Lima (2002)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-3,330	,600	-5,550	17,000	,000
Equal variances not assumed	-3,330	,818	-4,071	4,761	,011

Hartley test for equal variance: F = 3.866, Sig. = 0.0207

**Anexo 4.12:** Comparação dos resultados do teor de carbono fixo do estudo com o autor Oduor e Githiomi (2013)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-3,730	3,288	-1,134	13,000	,277
Equal variances not assumed	-3,730	2,384	-1,565	10,947	,146

Hartley test for equal variance: F = 16.553, Sig. = 0.0032

**Anexo 4.13:** Comparação dos resultados do teor de carbono fixo do estudo com o autor Fonseca *et al.* (2020)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	7,030	2,163	3,249	8,000	,012
Equal variances not assumed	7,030	2,163	3,249	5,178	,022

Hartley test for equal variance: F = 6.642, Sig. = 0.0291

**Anexo 4.14:** Comparação dos resultados do teor de carbono fixo do estudo com o autor Massuque (2017)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	-,530	1,016	-,521	8,000	,616
Equal variances not assumed	-,530	1,016	-,521	7,733	,617

Hartley test for equal variance: F = 1.457, Sig. = 0.3449

---

**Anexo 4.15:** Comparação dos resultados do teor de carbono fixo do estudo com o autor Fernandes (2014)

**Independent Samples Test**

	Mean Difference	Std. Error Difference	t	df	Sig. (2-tailed)
Equal variances assumed	3,540	2,357	1,502	24,000	,146
Equal variances not assumed	3,540	1,366	2,592	20,200	,017

Hartley test for equal variance: F = 8.593, Sig. = 0.0126