



**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA
FLORESTAL**

Departamento de Engenharia Florestal

Curso de Licenciatura em Engenharia Florestal

PROJECTO FINAL

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AQUECIMENTO E DA TEMPERATURA
FINAL DE CARBONIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DO CARVÃO
VEGETAL DO LENHO E DA CASCA DE *Vernonanthura phosphorica***

Autora:

Mafalda Alberto Mangué

Supervisor:

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

Maputo, Fevereiro de 2025

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AQUECIMENTO E DA TEMPERATURA
FINAL DE CARBONIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DO CARVÃO
VEGETAL DO LENHO E DA CASCA DE *Vernonanthura phosphorica***

Por:

Mafalda Alberto Mangué

Projecto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, como parte das exigências para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Florestal.

Supervisor:

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

Maputo, Fevereiro de 2025

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Mafalda Alberto Mangué, declaro por minha honra e para os devidos fins que este trabalho de licenciatura é da minha autoria e fruto da minha própria investigação. Declaro, ainda, que todas as informações e dados presentes no trabalho são originais, que todas as fontes de pesquisa foram devidamente citadas, e que o trabalho está em conformidade com os princípios éticos exigidos pela instituição de ensino.

Por ser verdade, firmo a presente declaração.

A Declarante:

(Mafalda Alberto Mangué)

O Supervisor

(Prof. Doutor Andrade Fernando Egas)

Maputo, Fevereiro de 2025

DEDICATÓRIA

Aos meus amados sobrinhos:

Dirce da Lúcia, Larson e Audrey Cherinda

Aos meus queridos irmãozinhos:

Hanney, Blenda e Ainstein Tembe

Dedico este trabalho como inspiração para que alcancem voos mais altos, superem minhas conquistas e sejam exemplo de excelência em suas jornadas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela ordem divina na minha vida.

Aos meus pais, Alberto Mangue e Rosália Maposse, pelo amor, cuidado, pela educação, e o apoio incondicional que me ofereceram em toda a minha caminhada.

Aos meus padrinhos, Sidónio Tembe e especialmente a Madrinha Joazy pela dedicação, atenção, pela sabedoria e apoio em cada passo dessa jornada.

Aos meus irmãos, Lúcia, João e Alda Mangue, pelo apoio constante, pela força que encontrei em cada um de vocês, e em especial ao meu primo Benjamin Fumo.

Ao meu supervisor, Prof. Doutor Andrade Fernando Egas, pela disponibilidade imediata, paciência e pelas valiosas contribuições que enriqueceram cada etapa da minha pesquisa.

Aos Professores do curso de licenciatura em Engenharia Florestal, que contribuíram para minha formação, em especial a Prof. Doutora Romana Bandeira, expresso a minha gratidão.

Ao Prof. Doutor Alcides Everildo Siteo, pela confiança inicial e por todo o apoio que me ofereceu no início dessa jornada.

Ao Eng. Manuel Nhagumbo, Chefe do Centro Agro-florestal de Machipanda e o Eng. Taimo. E. Taimo pelo apoio na colheita das amostras para o estudo.

Ao Senhor Paulo Timóteo, pelo apoio e atenção no laboratório de energia da madeira. Ao Senhor António Machava, pelo suporte no laboratório de solos. Ao Senhor Eduardo Mariquel, pela ajuda na produção dos corpos de prova.

A Ranchanda Tulcidás, Maria Antónia por cada palavra de incentivo, pelo apoio e por todas as risadas que tornaram a minha jornada mais leve.

Ao Eng. Rui Tuança, Dércia Jerónimo, Felicidade Hunguana, Elton Tonela e Paulo Chiringo, pelo apoio e companhia em cada desafio, por compartilharem conhecimento e momentos de superação durante a jornada no curso e ao Eng. Evidelto Mudumela pelo apoio no laboratório.

Minha gratidão a todos que não foram mencionados que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada.

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar a influência da velocidade de aquecimento e da temperatura final de carbonização nas propriedades energéticas do carvão vegetal obtido a partir do lenho e da casca de *Vernonanthura phosphorica*, uma espécie invasora. Para alcançar esse objectivo, foi realizada uma pesquisa experimental, na qual em cinco torretes obtidos de igual número de árvores da espécie foram retirados um disco de 3 cm de espessura na região do DAP para a determinação da densidade básica do lenho e da casca. Do material restante do torrete, foi removida a casca e produzidas aproximadamente 260 discos de 0,5 cm de espessura para a carbonização e posterior determinação do rendimento gravimétrico e análise química imediata do carvão vegetal. As amostras do lenho e da casca foram submetidas a diferentes condições de carbonização em um forno mufla, com temperaturas de 400°C, 450°C, 500°C, 550°C e 600°C e para cada temperatura foram realizadas carbonizações com as velocidades de aquecimento de 1°C/min, 2°C/min e 3°C/min. Os resultados indicam que a densidade básica média do lenho *Vernonanthura phosphorica* foi de 0,47 g/cm³ e da casca 0,22 g/cm³. Os valores do rendimento gravimétrico variaram de 28,67% a 38,09% para o carvão vegetal do lenho e de 33,40% a 48,32% para o carvão da casca. Para o teor de materiais voláteis os valores médios do carvão do lenho variaram de 9,25% a 32,01%, e do carvão da casca de 11,27% a 33,77. O teor de cinzas observou os intervalos de 1,69% a 9,38% para o carvão vegetal do lenho e de 8,49% a 15,30% para o carvão da casca, enquanto que o teor de carbono fixo variou de 65,41% a 86,91% e de 57,41% a 77,30% para o carvão vegetal do lenho e da casca respectivamente. Os resultados obtidos mostram que tanto a temperatura final quanto a velocidade de aquecimento influenciam significativamente as propriedades energéticas do carvão do lenho assim como da casca que teve um teor de cinzas mais elevado em relação ao lenho. No entanto, a temperatura de carbonização é o factor que merece maior controle no processo de carbonização, pois influenciou bastante o rendimento gravimétrico, o teor de materiais voláteis, o teor de carbono fixo e a qualidade energética do carvão em geral.

Palavras-chave: *Vernonanthura phosphorica*, casca, velocidade de aquecimento, temperatura de carbonização, análise química imediata.

ABSTRACT

INFLUENCE OF HEATING RATE AND FINAL CARBONIZATION TEMPERATURE ON THE ENERGY PROPERTIES OF WOOD AND BARK CHARCOAL FROM *Vernonanthura phosphorica*

This study aims to evaluate the influence of the carbonization heating rate and final carbonization temperature on the energy properties of charcoal obtained from the wood and bark of *Vernonanthura phosphorica*, an invasive species. To achieve this objective, an experimental study was conducted in which five logs from an equal number of trees were selected. A 3 cm thick disc was extracted from the DBH (Diameter at Breast Height) region to determine the basic density of the wood and bark. The remaining material was debarked, yielding approximately 260 discs of 0.5 cm thickness for carbonization and subsequent determination of the gravimetric yield and proximate analysis of the charcoal. The wood and bark samples were subjected to different carbonization conditions in a muffle furnace, with temperatures of 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, and 600°C. For each temperature, carbonization was carried out at heating rates of 1°C/min, 2°C/min, and 3°C/min. The results indicate that the average basic density of the wood *Vernonanthura phosphorica* was 0.47 g/cm³, while that of the bark was 0.22 g/cm³. The gravimetric yield ranged from 28.67% to 38.09% for wood charcoal and from 33.40% to 48.32% for bark charcoal. The volatile matter content in wood charcoal ranged from 9.25% to 32.01%, while in bark charcoal, it varied from 11.27% to 33.77%. The ash content ranged from 1.69% to 9.38% for wood charcoal and from 8.49% to 15.30% for bark charcoal. The fixed carbon content varied from 65.41% to 86.91% for wood charcoal and from 57.41% to 77.30% for bark charcoal. The results show that both the final temperature and the heating rate significantly influence the energy properties of the charcoal from both wood and bark. However, the bark exhibited higher ash content compared to wood. Nevertheless, the carbonization temperature is the most critical factor to control in the carbonization process, as it showed higher degree of influence on gravimetric yield, volatile matter and fixed carbon contents as well as in the overall energy quality of the charcoal.

Keywords: *Vernonanthura phosphorica*, bark, heating rate, carbonization temperature, proximate analysis.

ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA	i
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
ABREVIATURA/SIMBOLOGIA	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Problema de Estudo	2
1.3. Objectivos	4
1.3.1. Geral	4
1.3.2. Específicos.....	4
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Produção e consumo de energia em Moçambique.....	5
2.2. Pirólise da madeira.....	6
2.2.1. Considerações gerais	6
2.2.3. Factores que influenciam o rendimento gravimétrico e/ou a qualidade do carvão vegetal do lenho	8
2.2.4. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal.....	14
2.2.5. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal.....	16
2.3. Carbonização da casca	17
2.3.1. Composição química e elementar da casca	17
2.3.2. Características do carvão obtido a partir da casca.....	17
2.4. Descrição da espécie de <i>Vernonanthura phosphorica</i>	18
3. MATERIAIS E MÉTODO.....	20

3.1. Materiais	20
3.2. Métodos	20
3.2.1. Área de colecta do material de estudo	20
3.2.2. Preparação das amostras.....	21
3.2.3. Determinação da densidade básica do lenho e da casca	23
3.2.4. Carbonização e determinação do rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca.....	24
3.2.5. Análise química imediata do carvão vegetal e da casca	25
3.2.6. Análise química elementar das cinzas	28
3.3. Processamento e análise de dados	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. Densidade básica do lenho e da casca.....	29
4.2. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca	31
4.2.1. Valores médios de rendimento gravimétrico.....	31
4.2.2. Variação do rendimento gravimétrico em relação a temperatura máxima e velocidade de aquecimento	32
4.3. Análise química imediata do carvão vegetal e da casca	34
4.3.1. Teor de materiais voláteis.....	35
4.3.2. Teor de cinzas	37
4.3.3. Teor de carbono fixo.....	41
4.4. Análise química das cinzas	45
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	47
5.1. Conclusões	47
5.2. Recomendações	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7. ANEXOS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de colecta do material de estudo.	21
Figura 2. Amostras dos discos usados na determinação da densidade básica.	22
Figura 3. Esquema de obtenção de amostras para o estudo.....	22
Figura 4. Amostras submetidas à secagem ao ar livre para posterior carbonização.	23
Figura 5. Determinação do volume verde pelo método de balança hidrostática.	23
Figura 6. Amostras envolvidas em papel alumínio para posterior carbonização.	24
Figura 7. Etapa de crivagem das amostras destinadas à análise química imediata.	26
Figura 8. Procedimento de análise para quantificação de materiais voláteis em amostras.	26
Figura 9. Gráficos de dispersão do rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca em função da temperatura final de carbonização e velocidade de aquecimento.	33
Figura 10. Gráficos de dispersão do teor de materiais voláteis do carvão vegetal do lenho e da casca em função da temperatura final de carbonização e velocidade de aquecimento.	36
Figura 11. Gráficos de dispersão do teor de cinzas do carvão vegetal do lenho e da casca em função da temperatura final de carbonização e velocidade de aquecimento.....	39
Figura 12. Gráficos de dispersão do teor de carbono fixo do carvão vegetal do lenho e da casca em função da temperatura final de carbonização e velocidade de aquecimento.....	42
Figura 13. Composição mineral da cinza vegetal.....	46
Figura 14. Estufa de circulação forçada de ar utilizada para a secagem das amostras.....	62
Figura 15. Balanças analíticas utilizadas para a pesagem das amostras.....	62
Figura 16. Pilão e almofariz utilizadas para moer as amostras	63
Figura 17. Mesa vibratória acoplada a peneiras utilizada para a classificação granulométrica dos finos de carvão vegetal.....	63
Figura 18. Forno mufla utilizada para carbonização e análise química imediata das amostras.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixas de temperatura para controle da carbonização.	7
Tabela 2. Materiais utilizados na realização do trabalho.....	20
Tabela 3. Tempo de carbonização em função da temperatura máxima e da taxa de aquecimento das amostras do lenho e da casca de <i>V. phosphorica</i>	25
Tabela 4. Valores médios da densidade básica do lenho e da casca <i>V. phosphorica</i> (g/cm^3) ..	29
Tabela 5. Densidade básica do lenho das espécies mais usadas na produção de carvão.....	30
Tabela 6. Densidade básica do lenho de espécies do género <i>Pinus</i> e <i>Eucalyptus</i>	30
Tabela 7. Valores médios do rendimento gravimétrico do lenho e da casca de <i>V. phosphorica</i>	32
<i>Tabela 8. Regressão linear do rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca.</i>	33
Tabela 9. Teor de materiais voláteis do carvão vegetal do lenho e da casca (%).....	35
Tabela 10. Regressão linear do teor de materiais voláteis do carvão do lenho e da casca.	36
Tabela 11. Teor de cinza do carvão vegetal do lenho e da casca (%)	38
Tabela 12. Regressão linear do teor de cinza do carvão do lenho e da casca.....	39
Tabela 13. Teor de carbono fixo do carvão vegetal do lenho e da casca (%)	41
Tabela 14. Regressão linear do teor de cinza do carvão do lenho e da casca.....	42
Tabela 15. Comparação de médias das propriedades energéticas entre carvão do lenho e da casca.....	44

ABREVIATURA/SIMBOLOGIA

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ALER	Associação Lusófona de Energias Renováveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm ³	Centímetro cúbico
DAP	Diâmetro altura do peito
EDTA	Ácido etilenodiamina tetra-acético
FAO	Food and Agriculture Organization
g	Gramma
g/cm ³	Gramma por centímetro cúbico
IIAM	Instituto de Investigação Agraria de Moçambique
ISO	International Organization for Standardization
Km	Quilómetro
LTM	Laboratório de Tecnologia de Madeira
MAE	Ministério da Administração Estatal
meq/100g	Miliequivalentes por 100 gramas
%	Percentagem
°C/min	Graus Celsius por minuto
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PCU	Poder Calorífico Útil
RLFFB	Regulamento da Lei de Florestas e Fauna Bravia

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

As florestas têm sido utilizadas para os mais diversos fins desde os primórdios da civilização e continuam sendo uma das fontes muito utilizadas para produção de madeira para construções, estacas, postes, lenha e carvão vegetal, entre outros produtos. A sua importância como fonte de energia é evidente, tanto a nível local como regional, pois pode ser usada para produzir energia em larga escala a preço mais acessível do que as fontes convencionais de energia (Oliveira, 2003).

A biomassa é uma das fontes de obtenção de energia com maior potencial de crescimento, considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2015). Dados da FAO (2010), mostram que os combustíveis lenhosos, especialmente a lenha e o carvão, fornecem mais de 14% da energia primária total a nível mundial

Em Moçambique, pelo menos 70% da população depende da biomassa para as necessidades energéticas, com a população urbana a apresentar uma dependência dos combustíveis tradicionais de biomassa como sua principal fonte de energia doméstica (Egas *et al.*, 2016). De acordo com Atanassov *et al.* (2012) o consumo médio do carvão vegetal pelas famílias foi estimado em cerca de 87% para Maputo e Matola, 85% para a cidade da Beira e, 92% em Nampula. Por outro lado, Egas *et al.* (2016) relatam que na cidade de Pemba, uma média de 95% dos agregados familiares utilizam o carvão vegetal como principal fonte de energia, enquanto em Montepuéz o percentual é de 95%.

O abate indiscriminado de espécies arbóreas para a produção de carvão vegetal representa uma ameaça ambiental ao estar associada à perturbações nas florestas naturais, afectando a sobrevivência de várias espécies preciosas (Afonso *et al.*, 2015; Nisgoski *et al.*, 2020). Em Moçambique, a produção de carvão vegetal contribui significativamente para a degradação florestal, ao representar 9,1% das alterações florestais na paisagem do Miombo (Lisboa *et al.*, 2024). Na mesma vertente, Lisboa *et al.* (2024) relatam que a degradação florestal, principalmente devido à produção selectiva de carvão vegetal, contribuiu para uma perda adicional de 2.399,1 hectares anualmente.

Os elevados índices de desmatamento e o corte indiscriminado de árvores para a obtenção de lenha e carvão vegetal evidenciam a necessidade de encontrar alternativas mais sustentáveis para a geração de energia a partir de biomassa. Nunes *et al.* (2021), relatam que as espécies

invasoras podem ser geridas para criar cadeias de valor que sustentam o seu controlo, proporcionando benefícios económicos e, na perspectiva de Guedes *et al.* (2018), a utilização de espécies invasoras, pode fornecer uma fonte alternativa de carvão vegetal, reduzindo a dependência de espécies nativas.

Timberlake (2017), considera *Vernonanthura phosphorica*, como uma espécie de planta invasora que representa um grande desafio para o sector florestal devido à sua rápida proliferação, invadindo extensas áreas agrícolas e florestais. O seu aproveitamento para a produção de energia pode ser uma forma eficaz de controlo da disseminação dessa espécies invasoras e redução da pressão de exploração de florestas nativas para energia.

Estudos sobre as propriedades da *Vernonanthura phosphorica* para a geração de energia ainda são escassos. Embora essa espécie seja conhecida por seu potencial invasivo e sua alta taxa de crescimento em ambientes não nativos, conforme referido por Timberlake (2017), pesquisas específicas que avaliam seu aproveitamento energético, ainda estão em fase inicial. Isso cria uma lacuna no conhecimento, que precisa ser preenchida para uma aplicação mais ampla e segura dessa espécie na geração de energia.

1.2. Problema de Estudo

A biomassa proveniente de materiais orgânicos é amplamente reconhecida como uma das principais fontes de energia renovável, desempenhando um papel fundamental na produção de carvão vegetal, que segue um ciclo de carbono fechado, ajudando a manter o balanço de carbono atmosférico, evitando o aumento das concentrações de CO₂ em comparação com fontes de energia fósseis (Goswami *et al.*, 2021). Por outro lado, o carvão vegetal é amplamente utilizado devido à sua maior eficiência energética em relação a lenha (Gao *et al.*, 2024).

De acordo com Abreu Neto *et al.* (2020), ainda persistem dificuldades de controlar o processo de produção de carvão vegetal, seja através da homogeneidade da madeira ou do controlo das condições de carbonização. Os mesmos autores, enfatizam que este facto é prejudicial uma vez que a quantidade e qualidade do carvão vegetal está relacionada com a operação nos fornos quando submetido a determinados tempos e temperaturas finais de carbonização.

Oliveira *et al.* (2010), destacaram que as propriedades energéticas consideradas satisfatórias para o uso do carvão vegetal são os maiores teores de carbono fixo, densidade relativa aparente e o poder calorífico, menores teores de substâncias voláteis e cinzas, e estão associadas à madeira com altos teores de lignina, para determinadas condições de carbonização.

As propriedades energéticas do carvão vegetal são significativamente influenciadas pela temperatura de carbonização como pela velocidade de aquecimento. Com o aumento da temperatura de carbonização o rendimento do carvão vegetal diminui, mas a qualidade melhora com maior teor de carbono fixo e menor teor de humidade, e uma diminuição da matéria volátil (Dong *et al.*, 2024). Por outro lado, o rendimento do carvão vegetal é maximizado a temperaturas mais baixas, levando a uma maior densidade energética e um baixo teor de cinzas (Amrullah *et al.*, 2023).

Taxas de aquecimento mais baixas resultam em maiores rendimentos de carvão, por outro lado, taxas de aquecimento mais elevadas promovem rendimentos de gases e líquidos, reduzindo o rendimento sólido do carvão e, leva a uma maior produção de materiais voláteis, uma vez que a rápida decomposição da biomassa gera mais gases (Medeiros *et al.*, 2020).

Reconhecendo a importância e a potencialidade do carvão vegetal de *Vernonanthura phosphorica*, entender como a temperatura final e a velocidade de aquecimento influenciam as propriedades energéticas do carvão desta espécie em termos quantitativos é essencial para otimizar processos industriais e melhorar a eficiência energética dos combustíveis obtidos. A casca é uma biomassa pouco explorada em estudos de carbonização. A avaliação das suas propriedades energéticas após a carbonização pode revelar novas oportunidades de uso e agregar valor a este material, que de outra forma poderia ser subutilizado.

1.3. Objectivos

1.3.1. Geral

- ✚ Avaliar a influencia da velocidade de aquecimento e da temperatura final de carbonização nas propriedades energéticas do carvão vegetal obtido a partir do lenho e da casca de *Vernonanthura phosphorica*.

1.3.2. Específicos

- ✚ Determinar a densidade básica do lenho e da casca de *Vernonanthura phosphorica*;
- ✚ Estabelecer os valores do rendimento gravimétrico, composição química imediata; composição mineral da cinza do carvão vegetal obtido a partir do lenho e da casca de *Vernonanthura phosphorica*; e
- ✚ Analisar a relação entre a velocidade de aquecimento e a temperatura máxima, e o rendimento gravimétrico e os parâmetros da composição química imediata do carvão vegetal do lenho e da casca de *Vernonanthura phosphorica*.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Produção e consumo de energia em Moçambique

Estudos da ALER (2017), revelam que desde 1972 a biomassa lenhosa tem sido a principal fonte de energia renovável em Moçambique, especialmente nas áreas rurais, onde a maior parte da população utiliza madeira e carvão vegetal para suas necessidades domésticas. A energia hídrica começou a ganhar destaque a partir de 1997, tornando-se a segunda maior fonte de energia. O petróleo também passou a ter um papel importante na matriz energética, seguido pelo gás natural que começou a ser explorado em 2004 e, por último, o carvão mineral cuja exploração teve início em 2017.

Fortes *et al.* (2020); ALER (2017), relatam que a biomassa continua a ser a principal fonte de energia renovável em Moçambique, contribuindo com 79,2% do consumo total de energia nas áreas urbanas, onde o carvão vegetal é amplamente utilizado. Já a população rural depende predominantemente da lenha para suas necessidades energéticas.

Em Moçambique, a maior parte do carvão vegetal produzido para a comercialização provém de florestas naturais, onde são usadas diferentes espécies florestais. Como indicado por Atanassov *et al.* (2012), em Maputo e Matola, as principais espécies utilizadas para a produção de carvão são *Colophospermum mopane* (Chanato), *Combretum sp.* (Xivondzuane) e *Acacia sp.* (Micaias). Na cidade da Beira, as espécies incluem *Brachystegya spiciformis* (Messassa), *Uapaca kirkiana* (Metongoro), *Tabernaemontana elegans* (Mucaucau) e *Breonardia microcephala* (Mugonha). Em Nampula, as principais espécies são *Brachystegya spiciformis* (Messassa), *Julbernardia globiflora* (Mpacala), *Brachystegya sp.* (Muroto), *Ficus sp.* (Mukui) e cajueiro.

Falcão (2013), ilustra as espécies que comumente são utilizadas na produção do carvão no país a *Millettia stuhlmannii*, *Azelia quanzensis*, *Brachystegya speciformis*, *Colophospermum mopane*, e *Combretum imberbe*. Por outro lado, Chavana (2014), relata que na província de Gaza *Colophospermum mopane* é a espécie mais utilizada na produção do carvão vegetal e *Acacia nigrescens* como alternativa.

Adicionalmente, Egas *et al.* (2016), sustentam que as espécies mais usadas para produção do carvão vegetal em Cabo Delgado são as *Brachystegias* (Messassas) e por vezes outras espécies de madeira comercial como *Dalbergia melanoxylon*, *Julbernardia globiflora* e *Acacia nigrescens*.

Grande parte das espécies indicadas acima, usadas para a produção de carvão pertencem à classes de alto valor comercial (preciosa, 1ª e 2ª classes) conforme o regulamento da lei de florestas e fauna bravia (RLFFB, 2002). Isso contraria as normas estabelecidas que ao usar-se recursos de alto valor económico para a produção de carvão vegetal contribui se para a desvalorização da floresta. Portanto, é essencial promover o uso de espécies alternativas, como *Vernonanthura phosphorica*, que não apenas são mais sustentáveis, mas também podem contribuir para a redução da pressão sobre as espécies proibidas.

2.2. Pirólise da madeira

2.2.1. Considerações gerais

A pirólise é um processo em que ocorre a degradação térmica da biomassa na ausência de oxigénio ou em quantidades limitadas deste, dando origem a três fases: carvão vegetal, outra gasosa, não condensável, e uma fase líquida (bio óleo). Diante disso, uma destas fases pode ser maximizada dependendo das condições operacionais do reactor. O objectivo principal do processo de pirólise é obter produtos que possuam densidade energética superior à biomassa original (Demirbas, 2001).

Na perspectiva de Bridgwater & Maniatis (2004), a pirólise recebe diferentes denominações dependendo das condições utilizadas. Na pirólise rápida são empregadas temperaturas moderadas e pequenos tempos de residência dos gases favorecendo a produção de líquidos. Na pirólise lenta, ou carbonização, são empregadas baixas temperaturas e longos tempos de residência favorecendo a produção de carvão vegetal (fase sólida).

2.2.2. Carbonização

Machado *et al.* (2014), afirmam que a carbonização da madeira consiste fundamentalmente em concentrar carbono e expulsar oxigénio, com a principal aplicação na produção de carvão vegetal, cujo rendimento pode atingir até 40% em massa, em relação à madeira de partida. Os mesmos autores relatam que na madeira, as quantidades de carbono e oxigénio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%. Após a carbonização esses valores passam, em média no carvão vegetal, para 82% e 13,7% respectivamente. O carvão retém 57% do carbono da madeira enquanto que 89% do oxigénio são volatilizados.

Em conjunto com o carvão também são produzidos voláteis condensáveis como, alcatrões solúveis e insolúveis, ácidos orgânicos, cetonas, água, álcoois e hidrocarbonetos, conforme relatado por (Machado *et al.*, 2014).

Para Oliveira (2003), o processo de carbonização pode ser entendido ao se estudar o comportamento dos três componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina. Nesse âmbito, no processo de conversão da madeira em carvão, as hemiceluloses, que são os componentes menos estáveis, decompõem-se de forma lenta na faixa de 200 a 300°C e a degradação da celulose que se processa rapidamente em curto intervalo de temperatura, entre 300 e 400°C, tal como constataram (Machado *et al.*, 2014).

Adicionalmente, Machado *et al.* (2014), referiram que a lignina que é o componente mais estável, decompõe-se gradualmente, a partir de temperaturas mais baixas 150°C e continua perdendo peso até 500°C quando o carvão vegetal é produzido. Os polissacarídeos são os responsáveis, no processo de carbonização, pela formação da maioria dos produtos voláteis e uma boa quantidade de água, enquanto a lignina, para além do carvão, contribui para a produção de alcatrões.

Os fenómenos que acontecem durante a carbonização podem ser agrupados em fases segundo a temperatura, conforme descrito por (Trugilho & Silva, 2001; Oliveira *et al.*, 2013).

Tabela 1. Faixas de temperatura para controle da carbonização.

Fase	T (°C)	Fenómenos e Produtos
1. Secagem	até 200°C	Liberação de vapor de água; secagem da madeira. Fase endotérmica.
2. Torrefacção	200 - 280°C	Eliminação de gases; A madeira passa para a cor marrom arroxeada; degradação das hemiceluloses. Fase endotérmica.
3. Carbonização	280 - 400°C	Importante fase de reacções e grande eliminação de gases; Composição de gases: centenas de componentes químicos orgânicos (alguns recuperáveis), como Ácido acético, Metanol, Acetona, Fenóis, Aldeídos, Hidrocarbonetos e Alcatrões; Degradação da celulose, formação do carvão vegetal. Fase exotérmica.
4. Fixação	400 - 470°C	Redução da emissão de gases, O carvão vegetal passa a sofrer uma purificação na sua composição química com a eliminação dos gases voláteis contendo H e O, tornando-se mais rico em carbono fixo em sua estrutura. Fase exotérmica.

Fonte: Adaptado de (Trugilho & Silva 2001; Oliveira *et al.*, 2013).

2.2.3. Factores que influenciam o rendimento gravimétrico e/ou a qualidade do carvão vegetal do lenho

Alguns autores como Santos (2010); Mota (2013), revelam que diversos são os factores que influenciam na qualidade do carvão vegetal e que podem ser agrupados em (i) factores inerentes a madeira e (ii) factores inerentes ao processo de carbonização. A seguir discutem-se esses factores.

2.2.3.1. Factores ligados a matéria-prima

Densidade da madeira

A densidade da madeira é uma propriedade física que relaciona a massa da madeira com o volume que ela ocupa. Essa densidade pode variar amplamente entre espécies devido a diferenças anatómicas, como a proporção do lenho inicial e tardio, a presença de poros e a composição química. Entre os vários tipos de densidade da madeira, destaca-se a densidade básica (Rowell, 2005).

A densidade básica da madeira é definida como a massa do material seco em estufa (com teor de humidade reduzido a 0%) dividida pelo volume do material em seu estado saturado; é expressa em unidades de massa por unidade de volume, como g/cm^3 ou kg/m^3 (Zanuncio *et al.*, 2014). Estudos de Barreiros *et al.* (2024), arrolam vários métodos, tais como os métodos de equilíbrio estereométrico e hidrostático, que podem medir de forma fiável a densidade básica, embora os resultados possam variar com base no método utilizado.

O método de equilíbrio estereométrico que calcula o volume de amostras de madeira utilizando fórmulas geométricas baseadas em dimensões, é particularmente útil para amostras de formato regular, permitindo cálculos directos de densidade. O método hidrostático envolve a submersão de uma amostra de madeira em água e a medição da perda de peso, que se correlaciona directamente com o volume de água deslocada. A densidade é então calculada utilizando a fórmula: densidade = massa/volume, aplicando o princípio de Arquimedes para encontrar a densidade (Barreiros *et al.*, 2024).

A densidade básica da madeira influencia significativamente o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido, impactando a sua densidade energética e outras propriedades. Para Venega *et al.* (2023), a maior densidade da madeira está associada ao aumento do rendimento gravimétrico do carvão vegetal, isto porque a madeira mais densa contém mais biomassa por unidade de volume, o que se traduz em mais material disponível para conversão em carvão durante a carbonização.

O carvão vegetal produzido a partir de madeira mais densa tende a ter maior densidade aparente e densidade de energia. Isto deve-se à estrutura compacta da madeira, que resulta em carvão vegetal com menor porosidade e maior valor calorífico (Venega *et al.*, 2023).

Conforme Vale *et al.* (2010), existe alta correlação entre densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão, ou seja, quanto maior for a densidade da madeira mais denso será o carvão vegetal e maior será a quantidade de energia por unidade de volume desse biocombustível.

Teor de humidade

A madeira é higroscópica, o que significa que pode absorver e libertar humidade dependendo das condições ambientais, o que afecta tanto a água da parede celular como a água capilar dentro da sua estrutura (Thybring & Fredriksson, 2023). Para, Tian *et al.* (2024), o teor de humidade é quantificado como a massa de água em relação à massa seca da madeira e varia significativamente com a humidade relativa e a temperatura.

Demirbas & Demirbas (2004), revelam que a fabricação de carvão com madeira que contém mais de 30% de humidade, prejudica a eficiência da combustão. Isso ocorre porque a energia gerada durante a combustão é, em grande parte, utilizada para evaporar a água, reduzindo o calor disponível para aquecimento ou outros usos energéticos.

Além disso, os mesmos autores destacam que a temperatura de combustão final é reduzida quando há humidade excessiva, o que resulta em uma combustão incompleta e aumento nas emissões de poluentes, como o monóxido de carbono (CO). Humidade elevada pode afectar negativamente a qualidade do carvão vegetal, diminuindo o rendimento gravimétrico e o poder calorífico do produto final. Dessa forma, Silva (2019), sustenta que o teor de humidade abaixo de 30% é recomendável para produção de carvão vegetal.

Maior teor de humidade na casca impacta negativamente o rendimento do carvão da casca, como demonstrado por Fields & Criscione (2023), onde os rendimentos diminuíram com o aumento dos níveis de humidade de 50% para 70% (Fields & Criscione, 2023).

Poder calorífico

Na abordagem de Neves (2012b), o poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível. O mesmo autor refere que, na escolha de espécies para produção de energia é fundamental a quantificação do poder calorífico, em virtude de que essa propriedade é um importante parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassa.

Paralelamente o poder calorífico é denominado superior (PCS) quando a combustão se efectua a volume constante e no qual a água formada durante o processo é condensada e o calor latente do vapor de água não é perdido (Santos, 2010). Já o poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de energia disponível quando não se considera o calor latente da condensação da humidade presente nos produtos de combustão, tal como é sustentado por (Brand, 2010). Santos (2010), refere que o poder calorífico útil (PCU), é obtido por meio de equações nas quais se leva em consideração o teor de humidade do combustível.

O poder calorífico da madeira é 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 conforme relatado por (Couto *et al.*, 2013).

O poder calorífico da madeira influencia significativamente a qualidade do carvão vegetal produzido, uma vez que se correlaciona directamente com o teor energético e a eficiência de combustão do carvão vegetal. O carvão vegetal derivado da madeira altamente calorífica não só queima mais tempo como também produz temperaturas mais elevadas, melhorando a sua eficiência como fonte de combustível (Couto *et al.*, 2013; Santos, 2010).

Composição química da madeira

Na perspectiva de Brand (2010), é fundamental o conhecimento da composição química da madeira para que se possa direccioná-la para determinados usos. Os constituintes químicos presentes na biomassa são holocelulose, lignina, extractivos e cinzas.

De acordo com Santos (2010), elevado teor dos componentes, como os extractivos e a lignina, resulta em um carvão com maior densidade e mais resistente, em termos de propriedades físico-mecânicas e é indesejável a presença de altos teores de holocelulose, quando se destina à produção de carvão.

A lignina, um dos principais componentes estruturais da madeira, desempenha um papel positivo na produção e qualidade do carvão vegetal. Durante o processo de carbonização, a lignina decompõe-se em temperaturas mais altas (acima de 300°C), contribuindo para a formação de uma maior quantidade de carbono fixo e um carvão mais denso e energético. Como resultado, madeiras com alto teor de lignina tendem a produzir carvão vegetal com melhor rendimento gravimétrico, maior densidade e maior poder calorífico. A lignina também aumenta a resistência mecânica do carvão, tornando-o menos friável e mais adequado para aplicações industriais (Kambo & Dutta, 2015; Antal & Grønli, 2003).

Extractivo é um termo adoptado para especificar um número de vários compostos químicos contidos na madeira, mas que não fazem parte de sua estrutura essencial. Nesse grupo de compostos estão incluídos: polifenóis, óleos, gorduras, gomas resinas, ceras, e de alguns outros tipos de compostos orgânicos, conforme descrito por Sjostrom (1993). Adicionalmente, Moulin *et al.* (2017) referem que os extractivos, apresentaram efeito mínimo no rendimento gravimétrico do carvão vegetal de várias espécies de madeira. A presença de extractivos pode potenciar o elevado poder calorífico do carvão vegetal, tal como verificado em estudos onde os extractivos foram removidos antes da carbonização (Moulin *et al.*, 2017; Zanuncio *et al.*, 2014).

O teor de minerais inorgânicos afecta negativamente o valor calórico do combustível, sendo, portanto, indesejável em qualquer tipo de combustível e, na madeira, os minerais inorgânicos resultam em cinzas da madeira (Santos, 2010). Segundo Brito (1993), a cinza é um resíduo de óxidos minerais, oriunda da combustão completa da madeira. Esses minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa, sendo indesejáveis para a produção de carvão vegetal.

De acordo com Soares *et al.* (2015), o teor de cinzas da madeira influencia negativamente o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal. Cinzas compostas por minerais como potássio e cálcio, catalisam a degradação térmica durante a carbonização, aumentando a liberação de voláteis e reduzindo o rendimento sólido. Além disso, altos teores de cinzas no carvão vegetal reduzem o conteúdo de carbono fixo, comprometendo a densidade energética, a resistência mecânica e a eficiência da combustão (Pereira *et al.*, 2013).

Composição química elementar da madeira

A composição química elementar da madeira é compreende o carbono, hidrogénio e oxigénio, além de pequenas quantidades de nitrogénio e enxofre. A proporção desses elementos e compostos influencia o poder calorífico e a biodegradabilidade da madeira, factores importantes na utilização como biomassa para bioenergia (Rowell, 2005).

De acordo com Neves (2012b), madeiras de diferentes espécies apresentam-se uniformes em relação a composição química elementar, sendo aproximadamente de 50% para o carbono, 6% de hidrogénio, 43% de oxigénio e 0,5% de nitrogénio. Estes mesmos autores relatam que a presença de enxofre ocorre em quantidades insignificantes, quando comparadas com as de qualquer combustível fóssil.

Demirbaş & Demirbas (2004), entendem que para a produção de energia é desejável que a madeira apresente altos teores de carbono e hidrogénio e baixos teores de oxigénio, sobretudo, por favorecer o aumento do poder calorífico dos combustíveis de biomassa. Por outro lado,

Kumar *et al.* (2010), refere que é desejável que a biomassa apresente baixo teor de nitrogénio, pois este resulta em poluição ambiental, como a formação de óxidos de nitrogénio tóxicos após combustão.

Idade das árvores

Para Protásio *et al.* (2014), a influência da idade das árvores nas propriedades energéticas do carvão vegetal varia consoante as espécies e as características específicas avaliadas. O aumento da idade resulta num maior teor de lignina, o que é benéfico para a produção de carvão vegetal, enquanto os teores de cinzas, hidrogénio e azoto diminuem, indicando melhoria da qualidade da madeira para fins energéticos.

Castro *et al.* (2016), sustentam que as árvores mais velhas tendem a ter madeira mais densa, com maior teor de lignina, o que resulta em carvão de melhor qualidade, maior densidade, e maior poder calorífico. Os mesmos autores relatam que as árvores mais jovens têm mais celulose e hemicelulose, o que pode reduzir o rendimento gravimétrico.

Em um estudo sobre a determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii* em diferentes idades, Nones *et al.* (2014), verificaram que houve influência da idade para as características energéticas observadas da madeira. A madeira com 5 anos de idade apresentou maior teor de carbono fixo, menor teor de voláteis e menor teor de cinzas, enquanto que a madeira com 13 anos de idade apresentou maior massa específica básica e maior poder calorífico superior.

2.2.3.2. Factores inerentes ao processo de carbonização

Temperatura final de carbonização

A temperatura final de carbonização influencia significativamente as propriedades energéticas do carvão vegetal, como evidenciado por múltiplos estudos. De acordo com Trugilho & Silva (2001), a temperatura é uma determinante na qualidade do carvão vegetal e influencia a geração de produtos com propriedades físicas e químicas diferentes.

A maior parte das referências de pesquisas sobre pirólise de madeiras, tais como os trabalhos de Silva *et al.* (2018); Oliveira *et al.* (2010); Trugilho & Silva (2001), indicam que temperaturas mais altas de carbonização aumentam o teor de carbono enquanto reduzem os teores de hidrogénio e oxigénio, levando a melhores valores caloríficos e potencial energético global do carvão vegetal produzido.

Trugilho & Silva (2001), em trabalho realizado com carbonização de Jatobá (*Hymenea courbaril L.*) a diferentes temperaturas (variando de 300 °C até 900 °C), observaram que a

temperatura final de carbonização foi determinante na qualidade do carvão, em que houve um aumento do teor de carbono fixo e cinzas e diminuição do teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura.

Por outro lado, Silva *et al.* (2018), constataram em seus estudos que o poder calorífico do carvão aumentou com o aumento da temperatura final para as cinco espécies tropicais, encontrando-se dentro dos padrões de qualidade e apresentando alto potencial energético, e a temperatura final de carbonização recomendada no estudo foi de 500 °C. Por outro lado, Machado *et al.* (2014), sustentam que o aumento da temperatura de carbonização produz um carvão mais friável, gerando um teor de finos dezasseis vezes maior.

De acordo com Qubeissi *et al.* (2020); Trugilho & Silva (2001), a carbonização a temperaturas entre 400°C e 600°C oferece um equilíbrio entre qualidade energética e rendimento. Os mesmos autores também ressaltam que, em temperaturas superiores a 600°C, a porosidade do carvão pode aumentar, o que melhora sua reactividade, mas também pode reduzir sua densidade e resistência mecânica.

Desta forma, faz-se necessária a avaliação da temperatura final de pirólise para produção comercial de carvão vegetal, a fim de manter o equilíbrio entre o rendimento da fracção sólida e a qualidade do material combustível resultante.

Taxa de aquecimento

A velocidade de aquecimento é um factor crítico na produção de carvão vegetal, pois afecta tanto a qualidade do carvão vegetal quanto a eficiência do processo de carbonização. Uma velocidade de aquecimento muito alta pode resultar em uma carbonização incompleta, produzindo um carvão de baixa qualidade, com maior conteúdo de alcatrão e menor densidade energética (Somerville & Deev, 2020).

Em contraste, uma taxa de aquecimento mais lenta pode permitir uma carbonização mais uniforme e completa, resultando em um carvão de melhor qualidade (Somerville & Deev, 2020). Os mesmos autores observaram que o aquecimento rápido pode levar à liberação excessiva de gases voláteis, o que pode afectar a pureza do carvão produzido e acrescentam que a gestão adequada da velocidade de aquecimento pode ajudar a minimizar a produção de compostos indesejados e melhorar a eficiência do processo.

Vidaurre *et al.* (2012) sustentam que quando a carbonização ocorre com aumento drástico da temperatura, as reacções químicas favorecem a formação de fracções voláteis (gases e líquidos). Por outro lado, quando o aquecimento acontece de forma gradual, as reacções favorecem a

formação de fracções sólidas (carvão vegetal). Além disso, a compensação entre o rendimento de carvão e o teor de carbono é evidente; temperaturas mais elevadas e aquecimento rápido podem aumentar a concentração de carbono no carvão (Oliveira *et al.*, 1982). Pesquisas indicam que, embora taxas de aquecimento mais altas geralmente levem a uma diminuição no rendimento de carvão, baixas taxas de aquecimento tendem a resultar em maior rendimento de carvão vegetal (Lang *et al.*, 2019).

2.2.4. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal

A qualidade do carvão vegetal é um dos principais aspectos para sua aceitação no mercado. Segundo Oliveira (2003), a qualidade do carvão vegetal depende de algumas propriedades da madeira e de alguns parâmetros de carbonização. Para Rosa *et al.* (2012), o carvão vegetal para ser considerado de boa qualidade para o uso doméstico, deve reunir algumas características como: alta densidade relativa aparente; alto teor de carbono fixo; alto poder calorífico; baixa humidade; baixo teor de materiais voláteis e baixo teor de cinzas.

2.2.4.1. Densidade relativa aparente

A densidade aparente relativa do carvão vegetal é entendida como a relação entre a massa do carvão e o volume total por ele ocupado, incluindo seus espaços vazios ou poros (Barcellos, 2007). Segundo Costa *et al.* (2014), a densidade aparente do carvão vegetal é um indicador crucial de sua qualidade, uma vez que influencia directamente o seu poder calorífico. Protásio *et al.* (2014), reforçam que a densidade aparente é um parâmetro importante para o uso do carvão vegetal, já que influencia directamente a quantidade de carbono por volume e, conseqüentemente, a produtividade.

De acordo com Santos (2010), o carvão vegetal de maior densidade relativa aparente tende a ter uma estrutura mais compacta, o que resulta em uma queima mais lenta e uniforme, prolongando o tempo de combustão e maximizando o aproveitamento energético. Entretanto, Santos *et al.* (2016), observaram que a densidade aparente também está associada à porosidade do carvão vegetal. Segundo eles, o carvão de alta densidade geralmente possui menor porosidade, o que reduz a fragmentação durante o manuseio e transporte, além de promover uma combustão mais controlada e eficiente.

Trugilho & Silva (2001), ressaltam que a densidade aparente do carvão vegetal está directamente ligada à sua eficiência energética. Carvão com maior densidade apresenta uma maior quantidade de massa por volume, o que implica em um maior teor de carbono fixo e maior resistência mecânica.

2.2.4.2. Humidade no carvão vegetal

A humidade do carvão vegetal influencia significativamente a sua produção, qualidade e aplicações, particularmente na geração de energia. O teor de humidade em equilíbrio do carvão vegetal também afecta o seu valor calórico e densidade energética (Trugilho *et al.*, 2023).

Segundo Brito (1993), a humidade no carvão vegetal deve ser a menor possível, uma vez que quanto maior é o teor de água maior será o gasto energético para secagem deste combustível na primeira etapa da combustão. Isso ocorre porque parte da energia é usada para evaporar a água antes que o processo de combustão possa ser iniciado.

Nos estudos de Torrezani & Oliveira (2013); Panassal *et al.* (2022), foi observado que o carvão com humidade elevada gera mais compostos orgânicos voláteis e fumaça durante a combustão, principalmente porque a queima é menos eficiente e mais irregular, gerando produtos de combustão incompleta. Essas emissões são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, podendo agravar problemas respiratórios e contribuir para a poluição atmosférica.

Ribeiro *et al.* (2018), apontaram que a combustão de carvão húmido pode liberar ácidos orgânicos que são potencialmente corrosivos para os equipamentos resultando em desgaste que pode reduzir a vida útil desses equipamentos. Por sua vez Júnior *et al.* (2022), destacam que o carvão vegetal húmido apresenta um peso maior devido à absorção de água, o que aumenta os custos de transporte. O transporte de carvão com alto teor de umidade pode exigir mais recursos, aumentando o custo logístico, especialmente em grandes volumes.

2.2.4.3. Análise química imediata

Conforme observado por Souza *et al.* (2016), a qualidade do carvão vegetal pode ser estabelecida por meio da análise química imediata que consiste em determinar a percentagem do teor de carbono fixo, de materiais voláteis e de cinzas, pois essas variáveis apresentaram significativas correlações com o poder calorífico do carvão.

Teor de Materiais voláteis

Os materiais voláteis são os componentes presentes na madeira que podem ser removidos por efeito da temperatura em atmosfera não oxidante ou inerte (Kurauchi, 2014). Souza *et al.* (2016), relatam que o teor de materiais voláteis determina a facilidade de ignição, a estabilidade da chama e a velocidade de combustão. Um alto teor de voláteis facilita a ignição e a combustão.

Conforme Kurauchi (2014), o carvão vegetal com alto teor de voláteis produz uma chama com maior geração de fumaça. Carvão contendo baixos teores de voláteis são mais difíceis para entrarem em ignição, mas queimam de forma mais limpa, sem geração de fumaça. Para o uso

doméstico assim como para indústrias siderúrgicas, o carvão vegetal de boa qualidade apresenta um teor de materiais voláteis menor que 25% (Dias Junior *et al.*, 2020). Da mesma forma, São Paulo (2003), diz que o carvão de boa qualidade deve possuir matéria volátil inferior a 23,50%.

Teor de cinzas

Em conformidade com Arantes *et al.* (2013), o teor de cinzas é a massa do resíduo sólido inorgânico existente. As cinzas representam a mistura de todos os componentes restantes após a combustão completa do carvão, geralmente resíduos de óxido de minerais. Sua presença dá-se pela composição química da madeira e possíveis contaminantes (Santos, 2010). O carvão vegetal retém todas as cinzas da madeira de origem e é composta principalmente, de cálcio, potássio e fósforo, além de magnésio, ferro e silício (Arantes *et al.*, 2013).

Brand (2010), relata que as cinzas não participam no processo de combustão e contribuem para redução do poder calorífico. Dessa forma, Altos teores de cinzas não são desejáveis sob ponto de vista energético. É nesse sentido que Arantes *et al.* (2013), sustentam que o carvão vegetal de boa qualidade possui um teor de cinzas menor que 3%. Além disso, São Paulo (2003), diz que o carvão de boa qualidade deve possuir teor de cinzas inferior a 1,50%.

Teor de carbono fixo

Pereira (2021), indica que o carbono fixo é uma das propriedades que mais despertam interesse, uma vez que pode ser compreendido como a quantidade de carbono contida no carvão vegetal após a carbonização. Brand (2010), refere que os combustíveis com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis tendem a queimar-se mais lentamente, ou seja, eles poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para queima total, quando comparados com combustíveis que possuam baixo índice de carbono fixo.

O carvão vegetal de boa qualidade deve apresentar alto teor de carbono fixo maior que 73% (Dias Júnior *et al.*, 2020; São Paulo (2003)). De acordo com Pereira (2021), um baixo teor de carbono fixo é um indicativo de que componentes como material volátil e cinzas estão presentes em maior quantidade no carvão vegetal.

2.2.5. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

Na abordagem de Barcellos (2007), o rendimento gravimétrico é a relação entre o peso do produto (carvão anidro) e a matéria-prima (madeira anidra), e é expresso em percentagem. O mesmo autor acrescenta que para a produção energética geralmente é desejável obter elevado rendimento gravimétrico e, como consequência, maior produção de carvão vegetal nos fornos de carbonização.

Os factores que influenciam o rendimento incluem a composição química da madeira, particularmente o teor de celulose e lignina, que se correlacionam positivamente com maiores rendimentos (Pereira *et al.*, 2013). Adicionalmente, o tempo e a temperatura da carbonização desempenham um papel crucial (Silva *et al.*, 2018).

Em resumo pode-se afirmar que a utilização de uma madeira para fins energéticos deve basear-se no conhecimento de suas características físicas e químicas, assim como das variáveis do processo de produção do carvão vegetal. Estudos de Somerville & Deev (2020), evidenciam que temperaturas mais elevadas conduzem geralmente a uma redução dos rendimentos de carvão vegetal e que taxas de aquecimento elevadas correlacionam-se com menores rendimentos de carvão vegetal, uma vez que o aquecimento rápido limita o tempo disponível para condensação de alcatrão e formação de carvão secundário.

2.3. Carbonização da casca

2.3.1. Composição química e elementar da casca

A casca de madeira é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina. O teor de lignina muitas vezes superior ao da madeira, o que contribui para uma maior resistência a decomposições térmicas e biológicas, sendo relevante para processos de pirólise e produção de carvão vegetal (Kusiak *et al.*, 2022).

A análise elementar revela que a casca contém concentrações mais elevadas de minerais como cálcio, potássio, magnésio e ferro em comparação com a madeira, sendo os teores de cálcio na casca superiores. Além disso, a casca contém elementos como carbono, oxigénio, hidrogénio, nitrogénio, entre outros em menor quantidade, que afectam suas características de combustão e estabilidade térmica (Kusiak *et al.*, 2022).

A composição química da casca, em comparação a madeira, possui maior concentração de minerais e substâncias inorgânicas, o que pode afectar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal (Neiva *et al.*, 2018). A composição química da casca, particularmente o teor de celulose, hemiceluloses e lignina, afecta significativamente o rendimento gravimétrico. O maior teor de celulose cristalina correlaciona-se com o aumento da produção de carvão (Pereira *et al.*, 2013).

2.3.2. Características do carvão obtido a partir da casca

O carvão vegetal derivado da casca da madeira apresenta características distintas influenciadas pela sua composição química, propriedades físicas e métodos de produção.

Como evidenciado por Malengue *et al.* (2023), o carvão vegetal proveniente da casca tende a ter uma densidade básica mais baixa (cerca de 505 kg/m³) em comparação com o lenho (580 kg/m³). Isso significa que a casca é menos eficiente em aplicações que exigem um alto poder calorífico por unidade de volume.

De acordo com as observações de Sakthivel *et al.* (2019), o carvão obtido da casca é mais reactivo, o que significa que se decompõe mais facilmente em comparação com o carvão do lenho. Isso pode ser uma vantagem em processos que requerem uma combustão rápida, mas também pode levar a uma vida útil menor dos equipamentos utilizados na combustão.

O carvão de casca de madeira tende a ter um teor de cinzas mais elevado do que o carvão de lenho, devido à presença de minerais como cálcio, potássio e sílica. Esse teor mais alto de cinzas pode afectar negativamente o desempenho do carvão em alguns usos, pois pode causar acúmulo de resíduos durante a combustão conforme descrito por (Malengue *et al.*, 2023).

A quantidade de carbono fixo no carvão de casca é geralmente menor do que a do carvão de lenho, especialmente se a casca possui alto teor de extractivos. Contudo, devido à menor quantidade de carbono fixo e ao maior teor de cinzas, o poder calorífico do carvão de casca do lenho tende a ser ligeiramente inferior ao do carvão de lenho. Contudo, a casca de algumas espécies, especialmente as ricas em lignina, pode produzir carvão com poder calorífico satisfatório (Sakthivel *et al.*, 2019).

2.4. Descrição da espécie de *Vernonanthura phosphorica*

Vernonanthura phosphorica é primariamente nativa da América do Sul, especificamente do Brasil, onde foi originalmente classificada sob o género Vernónia antes de ser transferida para *Vernonanthura* (Vega & Dematteis, 2014). Não obstante que a sua distribuição nativa esteja na América do Sul, particularmente no Brasil, a sua adaptabilidade permitiu-lhe prosperar em ambientes não nativos, levando a preocupações ecológicas nessas áreas (Ngarakana & Kativu, 2017).

Timberlake (2017), relata que *Vernonanthura phosphorica* foi introduzida como planta forrageira para abelhas, invade rapidamente áreas desmatadas principalmente aquelas que antes eram floresta, muitas vezes formando povoamentos altos e extensos que inibem a regeneração da floresta original. Apesar das suas finalidades iniciais, a espécie tornou-se invasora, dominando a flora local e alterando as condições do solo, o que suscita preocupações sobre o seu impacto ecológico.

Timberlake *et al.* (2016), observam que *Vernonanthura phosphorica* tornou-se comum, abundante e dominante em locais perturbados, na vegetação secundária ao longo das estradas e nas margens da floresta em toda a área de Chimanimani. Por outro lado, Lisboa *et al.* (2022), relatam que *Vernonanthura phosphorica* é uma espécie arbustiva invasora mais comum e dominante na Reserva Florestal Moribane, com maior registo na beira da estrada e no pousio.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Materiais

Para a condução deste estudo, foram necessários materiais, equipamentos e reagentes que permitiram a execução de procedimentos experimentais e analíticos. A seguir, apresenta-se a lista completa de materiais, equipamentos e reagentes utilizados neste estudo.

Tabela 2. Materiais utilizados na realização do trabalho.

Materiais	Equipamentos	Soluções/Reagentes
Marcadores, Bloco de notas, Canetas, Sacos plásticos, Papel alumínio, Papeis de filtro.	Suta, Balança analítica, Estufa de circulação forçada de ar, Forno mufla, Paquímetro, Dessecador, Peneiras acopladas à mesa vibratória, Pinça, Pilão, Almofariz, Espectrofotómetro ultravioleta, Fotómetro de chama, Agitador magnético, Buretas, Copos, Erlenmeyers, Provetas, Cadinho de porcelana, Régua, Vareta, Placas de Petri.	Água destilada, Ácido bórico (H_3BO_3), Ácido nítrico (HNO_3), EDTA (0,02N), Indicador calcon, Indicador negro ericromo T, Hidróxido de sódio (NaOH), Solução tampão, Tartarato de potássio e antimónio ($K_2Sb_2(C_4H_2O_6)_2$), Ácido sulfúrico (H_2SO_4), Ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$), Molibdato de amónio ($(NH_4)_2MoO_4$)

3.2. Método

3.2.1. Área de colecta do material de estudo

O material do estudo consistiu em 5 torretes de 1,20m de comprimento obtidos após o abate de igual número de árvores com tronco livre de defeitos de *Vernonanthura phosphorica* com Diâmetro a Altura do Peito (DAP) entre 7,5 e 9,5cm na floresta de Inhamacari, situada no Posto Administrativo de Machipanda no distrito de Manica província do mesmo nome na região centro de Moçambique. Este Posto Administrativo faz fronteira com a República do Zimbabué numa extensão de 6 km e geograficamente localiza-se a uma latitude meridional variando de

18°55'45" a 18°57'56" e longitude oriental entre os 32°41'52" e 32°44'17", numa zona planáltica a uma altitude compreendida entre 400 a 1000 m (Chamba & Rokyta, 1994).

Os solos dominantes na floresta de Inhamacari são vermelhos a castanhos, arenosos a argilosos. A precipitação média anual varia entre 1000 a 1020 mm/ano, a temperatura máxima do mês mais quente (Outubro) chega a atingir 30,9°C e a mínima do mês mais frio (Julho) chega até 7,3°C, com uma média anual de 21,2°C (MAE, 2005).

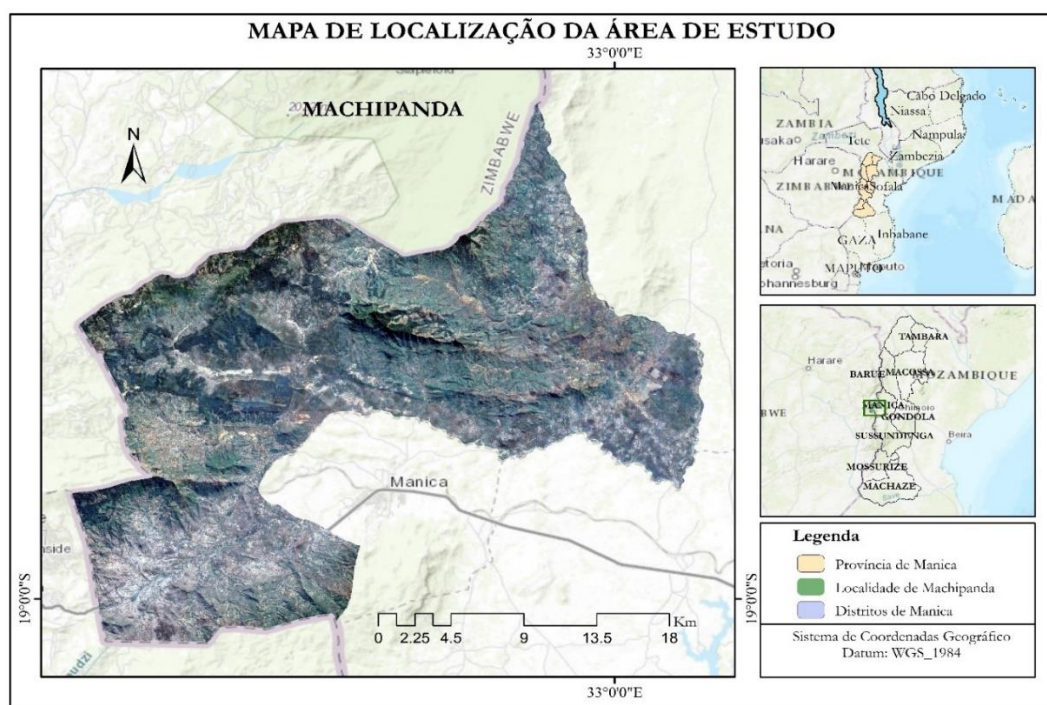


Figura 1. Mapa de localização da área de colecta do material de estudo.

3.2.2. Preparação das amostras

Uma vez extraídos da árvore os torretes foram imediatamente codificados, colocados em sacos e envolvidos em papel grosso para minimizar as perdas de humidade e evitar rachaduras, encaminhados à carpintaria do Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM) em Maputo, onde foram produzidas as amostras.

Em cada torrete foi retirado um disco de 3cm de espessura na região do DAP para a determinação da densidade básica do lenho e da casca.



Figura 2. Amostras dos discos usados na determinação da densidade básica.

Do material restante de cada torrete foi removida a casca e em seguida produzidos cerca de 260 discos de aproximadamente 0,5 cm de espessura para a carbonização (Figura 3).

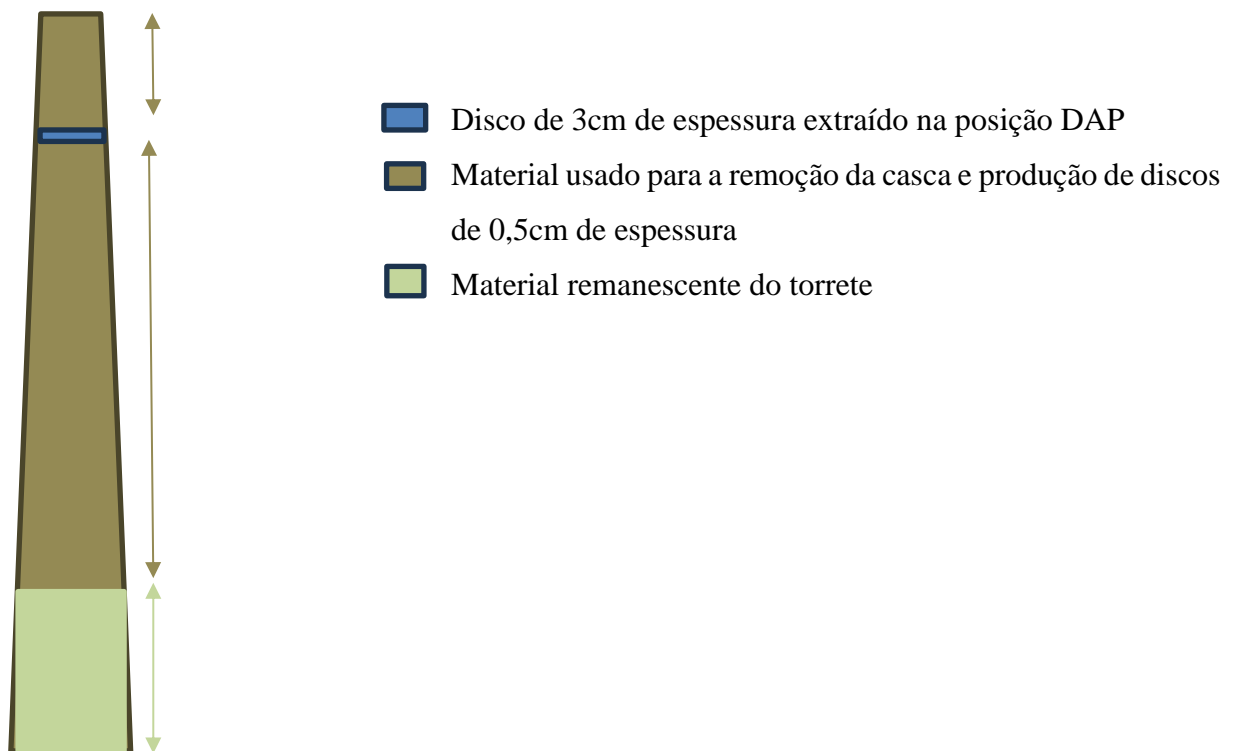


Figura 3. Esquema de obtenção de amostras para o estudo.

3.2.2.1 Condução dos ensaios laboratoriais

Todas as amostras, devidamente identificadas, foram transportadas para o Laboratório de Tecnologia de Madeira (LTM) da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane. As amostras do lenho e casca foram em seguida expostas à secagem ao ar livre (Figura 4).



Figura 4. Amostras submetidas à secagem ao ar livre para posterior carbonização.

Em seguida foram realizados os ensaios listados abaixo:

- ✚ Determinação da densidade básica dos discos; e
- ✚ Carbonização e determinação do rendimento gravimétrico e da composição química imediata do carvão produzido

3.2.3. Determinação da densidade básica do lenho e da casca

Os 5 discos com casca retirados da região do DAP, foram primeiramente submergidos em água até a saturação total e, de seguida foram determinados os volumes verdes com casca e sem casca após a remoção da casca. Os volumes com e sem a casca foram determinados a partir do método de Arquimedes (deslocamento por imersão em água) e o volume da casca foi obtido por diferença de volumes.



Figura 5. Determinação do volume verde pelo método de balança hidrostática.

Posteriormente, os discos e a casca retirada deles, foram levados à estufa para secagem a uma temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ até atingirem peso anidro. Para monitorar a secagem até o peso anidro foram realizadas pesagens com auxílio de uma balança analítica de 0,001g de precisão, até que as amostras atingissem massa constante (quando a diferença de massa entre as duas últimas pesagens consecutivas fosse menor ou igual a 0,2%).

Para a determinação de densidade básica usou-se a seguinte equação, de acordo a norma (ISO 13061-2, 2014):

$$Db = \frac{ms}{Vv} \quad (1)$$

Onde:

Db = Densidade básica da madeira ou da casca (g/cm³)

ms = Massa seca do lenho ou da casca (g)

Vv = Volume verde do lenho ou da casca (cm³)

3.2.4. Carbonização e determinação do rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca

Para aferir o rendimento gravimétrico foi primeiramente conduzido o processo de carbonização, o qual foi realizado em conformidade com a norma ISO 13061-2 (2014) e os procedimentos indicados por Silva *et al.* (2018). Após a secagem ao ar livre por duas semanas os discos foram codificados em função do torrete de modo a obter-se 15 tratamentos do lenho e de casca constituídas por 5 repetições cada representando as 5 árvores. Para o caso do lenho as repetições eram constituídas por 3 discos seleccionados ao acaso no universo de discos de cada torrete, enquanto que para a casca as repetições eram formadas por uma amostra de casca por árvore.

As amostras seleccionadas do lenho e da casca foram codificadas, pesadas numa balança analítica de 0,01g de precisão, e colocadas a secar na estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, até massa constante onde a diferença de massa entre as duas últimas pesagens consecutivas fosse menor ou igual a 0,2%. Em seguida as mesmas foram envolvidas em papel alumínio e devidamente codificadas novamente e em função do tratamento colocados na mufla para a carbonização, seguindo uma sequência em função do tratamento, conforme o esquema da Figura 6.



Figura 6. Amostras do lenho envolvidas em papel alumínio para posterior carbonização.

A carbonização foi realizada, de forma separada para o lenho e a casca. A temperatura inicial foi sempre igual a 100°C e as temperaturas máximas, de 400, 450, 500, 550 e 600°C, permanecendo na temperatura máxima por um período de 30 minutos, antes de um período de 30 minutos para o arrefecimento. Foram aplicadas velocidade de aquecimento de 1°C/min, 2°C/min e 3°C/min para cada temperatura de acordo com a tabela 3.

Tabela 3. Tempo de carbonização em função da temperatura máxima e da taxa de aquecimento das amostras do lenho e da casca de V. phosphorica.

Velocidade (°C/min)	Temperatura (° C)				
	400	450	500	550	600
1	5h	5h 50min	6h 40min	7h 30min	8h 20min
2	2h 30min	2h 55min	3h 19min	3h 45min	4h 10min
3	1h 40m	1h 56min	2h 13min	2h 30min	2h 45min

Depois de arrefecimento, as amostras foram retiradas do forno mufla, resfriadas no dessecador durante 30 minutos e, removeu-se o papel alumínio, pesou-se o carvão e casca resultante da carbonização.

O rendimento gravimétrico foi determinado de acordo com seguinte equação:

$$RGC(\%) = \frac{Pc}{Pm} \quad (2)$$

Onde: RGC = Rendimento gravimétrico da carbonização (%)

Pc = Peso do carvão (g);

Pm = Peso do lenho ou da casca anidra (g).

3.2.5. Análise química imediata do carvão vegetal e da casca

Para a realização da análise química imediata, seguiu-se os procedimentos descritos na norma ASTM Standard D1762 – 84 (2013), onde triturou-se os três discos carbonizados referentes a cada tratamento e casca com auxílio de um pilão e almofariz e, crivadas de modo que passassem totalmente na peneira nr.20 (granulometria de 850 µm), e retidas na peneira nr.40 (granulometria de 425 µm) 14,5%, e na peneira nr.60 (granulometria de 250 µm) ficou retida uma fracção de 18,7% do material crivado.



Figura 7. Etapa de crivagem das amostras destinadas à análise química imediata.

Posteriormente, prosseguiu-se com a determinação da massa seca das amostras, onde utilizou-se cadinhos de porcelana os quais foram primeiramente colocados com tampa no forno mufla por 10min a uma temperatura de 750°C e deixou-se a seguir para resfriarem-se no dessecador por 1 hora. De seguida, os cadinhos foram pesados e 1g de finos de carvão ou casca, em função do tratamento e levados à estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura, durante 2 horas, resfriados no dessecador por 1 hora, seguido da determinação da massa seca das amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão. Repetiu-se o procedimento até alcançar a massa constante, em que a diferença entre as duas pesagens consecutivas fosse igual ou menor a 0,0005g.

3.2.5.1. Teor de materiais voláteis

Para a determinação do teor de materiais voláteis, regulou-se previamente o forno mufla a temperatura de $950 \pm 10^{\circ}\text{C}$ E os cadinhos com tampas da operação anterior contendo os finos de carvão ou casca foram colocados sobre a porta da mufla aberta por 2 minutos, na borda interior da porta da mufla por 3 minutos (Figura 8) e no interior da mufla com a porta fechada por 6 minutos.



Figura 8. Procedimento de análise para quantificação de materiais voláteis em amostras.

Em seguida, retirou-se os cadinhos da mufla, colocou-se no dessecador durante 1 hora e pesou-se os cadinhos sem a tampa na balança analítica de 0,0001g de precisão.

O teor de materiais voláteis foi determinado através da equação:

$$TMV(\%) = \frac{(B - C)}{B} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

TMV = Teor de materiais voláteis (%);

B = Peso da amostra após a secagem na estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g);

C = Peso da amostra após a secagem na mufla à $950 \pm 10^\circ\text{C}$ (g).

3.2.5.2. Teor de cinzas

Com as mesmas amostras da actividade anterior, o forno mufla foi aquecido a 750°C e os cadinhos sem tampa foram colocados no interior do forno mufla por aproximadamente por 6h, com a porta fechada. Após esse tempo, retirou-se as amostras do forno, colocaram-se no dessecador por 1 hora e pesou-se as amostras com auxílio de uma balança analítica de 0,0001g de precisão. Repetiu-se o procedimento da queima na mufla por intervalos de 1 hora até alcançar a massa constante, em que a diferença entre as duas pesagens consecutivas fosse igual ou menor a 0,0005g.

O teor de cinzas foi determinado através da equação:

$$TCZ(\%) = \frac{D}{B} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TCZ = Teor de cinzas (%);

B = Peso da amostra após a secagem na estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g);

D = Peso da amostra após secagem no forno mufla a $750 \pm 10^\circ\text{C}$ de temperatura.

3.2.5.3. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado através da equação:

$$TCF(\%) = 100 - (TMV + TCZ) \quad (5)$$

Onde:

TCF = Teor de carbono fixo (%).

3.2.6. Análise química elementar das cinzas

Esta análise foi realizada no Laboratório de Solos da FAEF. Para determinar os elementos presentes na cinza, utilizou-se a cinza do carvão vegetal do lenho e da casca dos cinco torretes, resultante da queima no processo de análise química imediata do carvão. O método utilizado para a análise foi o de titulação descrito no manual de Westerhout & Bovee (1985). Para isso, dissolveu-se 0,2 g da amostra de cinza em 50 ml de água destilada e agitou-se a mistura em um agitador magnético por uma hora. Em seguida, a amostra foi filtrada com o auxílio de papel de filtro e um frasco e usados procedimentos específicos para a determinação das concentrações de cálcio, magnésio, sódio, potássio e fósforo cujos detalhes são apresentados no anexo 7.1.

3.3. Processamento e análise de dados

Após o desenvolvimento experimental, foram realizadas análises estatísticas dos resultados, num delineamento completamente casualizado (DCC), em arranjos factoriais, para todas as variáveis avaliadas (velocidade e temperatura) de forma separada para casca e para o lenho. No processo de análise, foram utilizados dois softwares estatísticos, nomeadamente o Microsoft Excel que num pacote integrado para Microsoft Office, o STATA, que é um pacote de software estatístico de uso geral desenvolvido pela StataCorp para manipulação de dados, visualização, estatísticas e relatórios automatizado.

Os dados foram submetidos e agrupados no software da Microsoft Excel, onde foram determinados os parâmetros de estatística descritiva (média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação) para determinação da densidade básica, rendimento gravimétrico em carvão vegetal do lenho e da casca e, os parâmetros de análise química imediata do carvão vegetal do lenho e da casca (teor de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo) em função da velocidade e temperatura.

No software STATA, os dados foram submetidos a análise de regressão linear, onde a validação dos resultados foi realizada com base em propriedades de estimadores: Consistência e nos testes de especificações: Ramsey RESET, Normalidade (teste de Shapiro Wilks), Heterocedasticidade (teste de Breusch – Pagan), Multicolinearidade e, Teste *t student* para comparação de medias e Mann-Whitney.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos na caracterização da madeira de *Vernonanthura phosphorica*, referente a densidade básica, bem como às propriedades energéticas do carvão vegetal do lenho e da casca, nomeadamente o rendimento gravimétrico, e a composição química imediata, especificamente os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

4.1. Densidade básica do lenho e da casca

Os resultados da caracterização da espécie *V. phosphorica* referente a densidade básica do lenho e da casca estão descritos na Tabela abaixo.

Tabela 4. Valores médios da densidade básica do lenho e da casca *V. phosphorica* (g/cm³)

Parâmetro	Material	
	Lenho	Casca
Média	0,47	0,22
Mínimo	0,43	0,18
Máximo	0,50	0,25
CV (%)	5,32	14,59

CV- coeficiente de variação

Medri (2011), considera que um experimento é de alta precisão quando os valores do coeficiente de variação encontram-se abaixo de 20%, precisão média quando varia de 20 a 30%, e baixa precisão valores superiores a 30%. Neste sentido, considera-se que os resultados da densidade básica apresentam alta precisão tanto para o lenho como para a casca.

A densidade básica do lenho de *V. phosphorica* enquadram-se na categoria de baixa densidade, conforme a classificação apresentada por (Marroquín-Morales *et al.*, 2022).

Os valores de densidade básica deste estudo encontram-se abaixo do intervalo observado pelas principais espécies utilizadas na produção de carvão vegetal consumido nas principais cidades de Moçambique, apresentadas por Atanassov *et al.* (2012); Egas *et al.* (2016), conforma a Tabela 4.

Tabela 5. Densidade básica do lenho das espécies mais usadas na produção de carvão

Espécie	Densidade básica (g/cm ³)	Bibliografia
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	0,47	Estudo em questão
<i>Brachystegia spiciformis</i> (Messassa)	0,57	Massuque (2017)
	0,59	Bunster, J. (2006)
<i>Julbernardia globiflora</i> (Mpacala)	0,63	Massuque (2017)
<i>Uapaca kirkiana</i> (Metongoro)	0,52	Massuque (2017)
	0,56	Bunster, J. (2006)
<i>Colophospermum mopane</i> (Chanato)	1,06	Bunster, J. (2006)

Além disso, os valores médios de densidade encontrados neste estudo estão em conformidade com os intervalos observados para diferentes espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* utilizadas para fins energéticos, como demonstrado na tabela 5.

Tabela 6. Densidade básica do lenho de espécies do género *Pinus* e *Eucalyptus*

Espécie	Densidade básica (g/cm ³)	Bibliografia
<i>Vernonanthura phosphorica</i>	0,47	Estudo em questão
<i>Pinus maximinoi</i>	0,47	Trianoski <i>et al.</i> (2013)
<i>Pinus taeda</i>	0,48	Trianoski <i>et al.</i> (2013)
<i>Eucalyptus dunnii</i>	0,56	Batista <i>et al.</i> (2010)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,45	Batista <i>et al.</i> (2010)
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,46	Batista <i>et al.</i> (2010)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,49	Paulino & Lima (2018)

Trugilho *et al.* (2001), destacam a densidade básica da madeira como a propriedade que mais influencia a qualidade do carvão vegetal. A densidade básica da madeira está intimamente relacionada com a produção de energia, isto é, quanto maior é a densidade, maior será a parcela energética armazenada por metro cúbico de madeira (Kumar *et al.* 2010).

Fortaleza *et al.* (2019), verificou que existe uma correlação positiva entre a densidade da madeira e o rendimento gravimétrico de carvão vegetal para determinadas espécies, indicando que madeiras mais densas tendem a proporcionar melhores rendimentos. Além disso, a

densidade energética também é geralmente maior em espécies com maior densidade básica, reforçando a relação entre a compactação do lenho e o desempenho energético do carvão.

Na perspectiva de 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.

Entretanto, Hoefnagels *et al.* (2014), sustenta que na utilização de madeiras de baixa densidade, os custos de produção e logística devem ser favoráveis, devido ao facto de que, para gerar uma unidade de energia, é necessária uma quantidade maior de madeira em comparação com espécies de maior densidade básica.

O valor da densidade básica da casca de *V. phosphorica* obtida no presente estudo apresenta similaridade com os valores encontrados por Andrade *et al.* (2009), para a casca de *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus saligna*, que registraram densidades médias de 0,19 e 0,21 g/cm³ respectivamente. Eloy *et al.* (2015), ao trabalhar com a casca de *Acacia mearnsii*, obtiveram um valor médio de densidade básica de 0,35 g/cm³, superior aos observados neste estudo.

De acordo com Sobol *et al.* (2023), a utilização da casca na produção de energia oferece importantes benefícios para a sustentabilidade ambiental. Em primeiro lugar, ao reduzir o desperdício de biomassa, promove o uso eficiente de recursos e incentiva fontes de energia renováveis. Adicionalmente, seu alto valor calorífico torna-a uma alternativa viável para geração de energia, enquanto sua natureza hidrofóbica facilita o armazenamento e transporte, minimizando problemas de humidade. Dessa forma, a casca de madeira surge como uma solução eficiente e sustentável para atender às demandas energéticas.

Adicionalmente, a casca possui menor densidade, em comparação com o lenho. No entanto, ela pode ser utilizada como complemento na geração de energia em sistemas de biomassa em locais próximos à fonte, onde é possível transportar grandes volumes com menor custo, otimizando a logística e minimizando o custo de transporte e armazenamento.

4.2. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca

4.2.1. Valores médios de rendimento gravimétrico

De acordo com os resultados obtidos, os valores médios do rendimento gravimétrico variam de 28,67% a 38,09% para o carvão vegetal produzido a partir das amostras do lenho, e de 33,40% a 48,32% para a casca (Tabela 5). Na tabela, observa-se um baixo coeficiente de variação dentro do intervalo de 1,35% a 7,07%, o qual indica uma alta precisão experimental (Medri, 2011).

Rancatti (2012), trabalhando com madeira de *Mimosa scabrella* com uma taxa de aquecimento de 3°C/min e temperaturas de 400 e 500°C, encontrou rendimento gravimétrico de 33,62% e 29,35% em comparação com os valores de 36,92% e 32,31% respectivamente obtidos no presente estudo.

Tabela 7. Valores médios do rendimento gravimétrico do lenho e da casca de *V. phosphorica*

Material	Velocidade de aquecimento (°C/min)	Temperatura (°C)				
		400	450	500	550	600
Carvão vegetal do lenho	1	38,09	34,75	32,84	31,06	29,50
		(4,96)	(4,22)	(3,87)	(3,27)	(1,36)
	2	35,77	33,89	31,25	28,68	28,68
		(4,52)	(6,44)	(2,81)	(2,29)	(3,32)
	3	36,92	33,55	32,31	29,6	28,67
		(5,10)	(3,73)	(4,59)	(3,29)	(3,33)
Carvão vegetal da casca	1	46,85	43,75	40,72	36,42	34,37
		(4,27)	(3,92)	(3,53)	(4,63)	(4,12)
	2	48,32	41,59	39,02	36,05	33,89
		(3,58)	(1,35)	(2,63)	(1,96)	(2,16)
	3	45,45	40,07	37,08	34,02	33,40
		(7,07)	(2,32)	(3,86)	(4,53)	(3,32)

Observação: os valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

4.2.2. Variação do rendimento gravimétrico em relação a temperatura máxima e velocidade de aquecimento

De acordo com a Figura 9, o rendimento gravimétrico da carbonização diminui progressivamente com o aumento da temperatura máxima de carbonização, tanto para o lenho quanto para a casca.

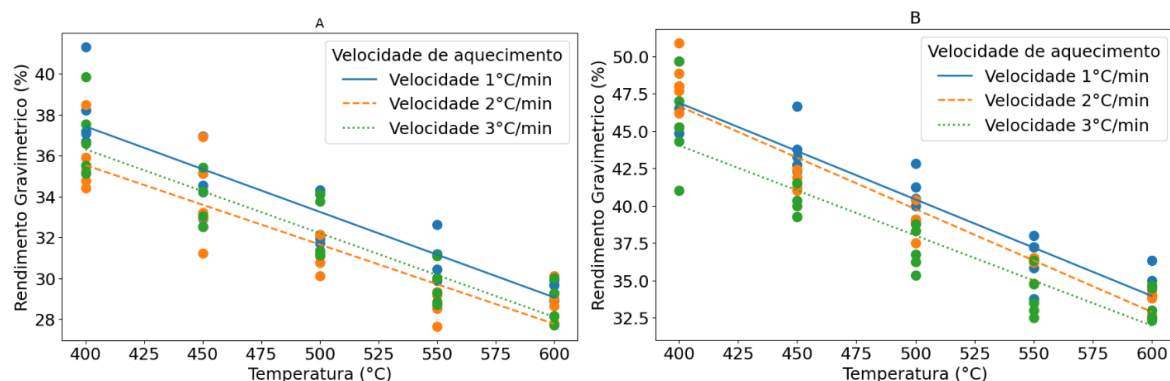


Figura 9. Tendências do rendimento gravimétrico em função da temperatura

A - Lenho; B - Casca

Essa constatação gráfica é suportada pelos resultados dos modelos de regressão desenvolvidos a partir dos mesmos dados experimentais dos gráficos (Tabela 6), que indicam que tanto a temperatura como velocidade de aquecimento afectaram de forma significativa ($p = 0,000$) o rendimento gravimétrico do carvão vegetal produzido a partir do lenho e da casca.

Tabela 8. Regressão linear do rendimento gravimétrico do carvão vegetal do lenho e da casca.

Material	TMV	Coef.	Er. Padr	Valor-t	Valor-p	Est. de Reg.
Carvão vegetal do lenho	Temperatura	-0,0405	0,0025	-16,41	0,000	$R^2 = 0,8044$
	Velocidade	-0,5184	0,1943	-2,67	0,009	$P > F = 0,000$
	Constante	53,647	1,3917	43,70	0,000	
Carvão vegetal da casca	Temperatura	-0,065	0,003	-22,25	0,000	$R^2 = 0,8780$
	Velocidade	-1,208	0,251	-4,81	0,000	$P > F = 0,000$
	Constante	74,108	1,55	47,82	0,000	

Um aumento unitário da temperatura de carbonização conduz a uma redução do rendimento do carvão vegetal do lenho em cerca de 0.04%, mantendo a velocidade constante. Por outro lado, um aumento unitário da velocidade de aquecimento conduz a uma redução do rendimento do carvão vegetal do lenho em cerca de 0.52%, mantendo a temperatura constante. O modelo sugere ainda que a temperatura de carbonização tem efeito negativo mais forte sobre o rendimento do carvão vegetal em relação a velocidade de aquecimento, o que implica a temperatura é o factor que merece um maior controle no processo de produção do carvão vegetal. A mesma tendência observa-se também para a equação do carvão da casca.

Temperatura de carbonização

A redução do rendimento gravimétrico com o aumento da temperatura também tem sido reportada em diferentes trabalhos. Trugilho e Silva (2001), que estudaram a influência da temperatura final na carbonização de *Hymenea courbaril L.* para temperaturas finais variando de 300 a 900°C, observaram um decréscimo acentuado no rendimento em carvão com o aumento da temperatura final de carbonização, e uma estabilização dos valores na medida em que as temperaturas finais eram muito elevadas (700, 800 e 900°C). Para temperaturas finais de 300, 400 e 500°C foram encontrados altos valores de rendimento em carvão para o cerne (92,94, 51,85 e 44%, respectivamente).

Avaliando o rendimento gravimétrico em carvão de *Eucalyptus microcorys* submetidos às temperaturas finais de 500, 600, 700, 800 e 900°C Vieira *et al.* (2013), concluiu que a temperatura final de carbonização influenciou o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, pois quanto mais se incrementava a temperatura final de carbonização menor era o rendimento em carvão vegetal.

Oliveira *et al.* (2010), em estudo realizado para avaliar a temperatura final e a taxa de aquecimento de *Eucalyptus pellita*, observaram para temperatura final de carbonização de 450 °C por 6 h um obteve-se o rendimento gravimétrico médio de 32,1% e para temperatura de 500 °C por 7 h um rendimento gravimétrico foi de 31,1%.

De forma semelhante Oliveira *et al.* (2010), estudaram a influência da temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento no *Eucalyptus pellita*, e o rendimento do carvão vegetal foi afectado significativamente pela marcha de carbonização. Apontam que a temperatura final de carbonização é o principal factor que influencia a redução do rendimento do carvão vegetal.

Velocidade de aquecimento

Outros autores reportam também a redução do rendimento gravimétrico com o aumento da velocidade de aquecimento. Demirbas (2005), investigaram os efeitos da taxa de aquecimento e da temperatura de carbonização nos rendimentos de produtos líquidos e de carvão vegetal. Para tal, as temperaturas de carbonização foram mantidas em 550 a 800°C, enquanto as taxas de aquecimento aplicadas foram de 2 a 40°C/min e concluíram que tanto a temperatura quanto a taxa de aquecimento têm um impacto significativo no rendimento do carvão vegetal obtido a partir da carbonização da madeira e da casca.

Entretanto, Azevedo *et al.* (2013) estudaram a influência da velocidade de aquecimento no rendimento gravimétrico do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, e verificaram que não houve diferença significativa das análises.

Silva *et al.* (2018), refere que é desejável obter alto rendimento gravimétrico em carvão vegetal devido ao maior aproveitamento da madeira durante o processo de carbonização e maior produção de energia.

4.3. Análise química imediata do carvão vegetal e da casca

A análise química imediata da carbonização da madeira e da casca fornece a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil), material residual (cinzas), assim como o material no estado sólido (carbono fixo).

4.3.1. Teor de materiais voláteis

Na Tabela 7, os resultados do teor de materiais voláteis variam de 9,25% a 32,01% e de 11,27% a 33,77% para o carvão vegetal produzido a partir das amostras do lenho e da casca respectivamente.

Oliveira *et al.* (2010), testando diferentes marchas de carbonização em *Eucalyptus pellita F. Muell.*, observaram que com o aumento da temperatura final de carbonização (450°C a 550°C), houve diminuição do teor de materiais voláteis variando de 14,65% a 9,71%, em contraste com os resultados obtidos no presente estudo nas mesmas condições de temperatura de carbonização.

Tabela 9. Teor de materiais voláteis do carvão vegetal do lenho e da casca (%)

Material	Velocidade (°C/min)	Temperatura (°C)				
		400	450	500	550	600
Carvão vegetal do lenho	1	31,12	26,80	17,85	13,53	9,74
		(7,57)	(6,18)	(10,33)	(7,63)	(9,88)
	2	32,01	25,46	20,82	14,46	11,36
		(7,81)	(4,76)	(7,20)	(7,83)	(6,26)
	3	31,80	22,64	17,25	13,54	9,25
		(1,47)	(10,74)	(6,93)	(10,01)	(14,11)
Carvão vegetal da casca	1	32,13	23,66	20,68	15,07	11,27
		(6,97)	(9,60)	(11,29)	(7,39)	(14,82)
	2	31,74	24,40	19,09	15,13	12,38
		(7,44)	(7,54)	(5,96)	(7,62)	(12,95)
	3	33,77	26,11	21,24	14,26	12,40
		(5,43)	(3,13)	(12,50)	(4,88)	(4,12)

Observação: os valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

O teor de materiais voláteis apresenta uma tendência decrescente com o aumento da temperatura de carbonização para o carvão tanto do lenho quanto da casca, conforme ilustrado na Figura 10.

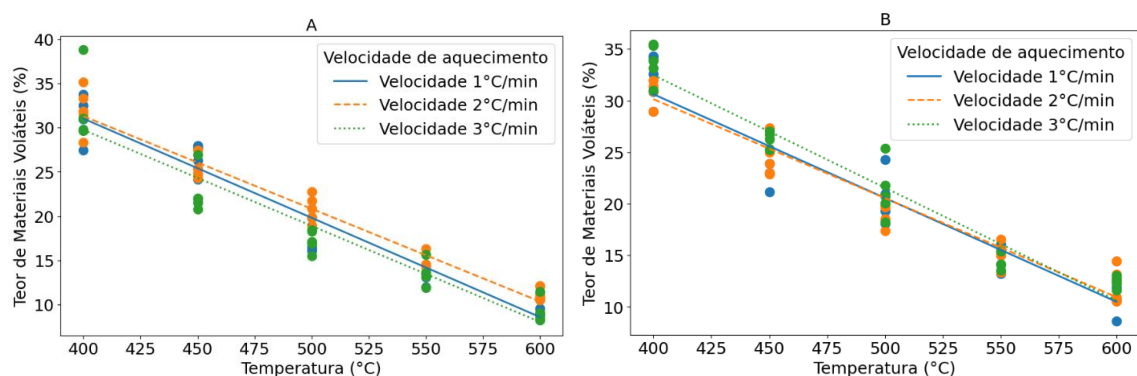


Figura 10. Tendências do teor de material volátil em função da temperatura.

A - Lenho; B – Casca

Os resultados dos modelos de regressão da Tabela 8 mostram essa tendência, pois que para o carvão vegetal do lenho e da casca, o valor-p associado à temperatura é menor que 0,05, indicando que este factor possui um efeito estatisticamente significativo sobre o teor de materiais voláteis. Por outro lado, o p-valor referente à velocidade de aquecimento é maior que 0,05 em ambos os casos, o que demonstra que a velocidade não apresenta um efeito significativo sobre o teor de matérias materiais voláteis.

Tabela 10. Regressão linear do teor de materiais voláteis do carvão do lenho e da casca.

Material	TMV	Coef.	Er. Padr	Valor-t	Valor-p	Est. de Reg.
Carvão vegetal do lenho	Temperatura	-0,1083	0,0038	-28,25	0,000	$R^2 = 0,9251$
	Velocidade	-0,4562	,3245	-1,36	0,177	$P > F = 0,000$
	Constante	74,925	1,9473	38,48	0,000	
Carvão vegetal da casca	Temperatura	-0,102	0,003	-29,72	0,000	$R^2 = 0,9241$
	Velocidade	0,497	0,297	1,67	0,100	$P > F = 0,000$
	Constante	70,851	1,831	38,70	0,000	

Comportamento idêntico de diminuição do teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura final de carbonização foi observado por Trugilho e Silva (2001) na carbonização do lenho de *Himenea coubaril* nas temperaturas finais de carbonização de 300°C a 900°C, por Oliveira *et al.* (2010) para a espécie *Eucalyptus pellita* F. Muell. nas temperaturas finais de carbonização de 450°C, 500 °C e 550°C; e por Azevedo *et al.* (2013) ao avaliarem a carbonização de *Eucalyptus pellita*; *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com as temperaturas finais de 400 °C, 700 °C e 900 °C.

Segundo Barcellos (2007) este comportamento justifica-se, pois quanto maior a exposição da madeira a elevadas temperaturas, maior é a intensidade com que as substâncias voláteis se desprendem do carvão, reflectindo directamente na redução do teor de materiais voláteis.

Os resultados do presente estudo onde a velocidade de aquecimento não mostrou efeito significativo sobre o teor de material volátil divergem de alguns estudos anteriores. Em um estudo sobre a influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais, Silva *et al.* (2018), observou diferenças estatísticas significativas para as espécies em relação ao teor de materiais voláteis, entre as velocidades de aquecimento, com tendência de redução em velocidades mais altas.

Oliveira *et al.* (2010), estudaram a influência da temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento no *Eucalyptus pellita*, e para o teor de materiais voláteis, houve diferenças significativas entre velocidades de aquecimento, seguindo a tendência comum de maior liberação de voláteis com aumento da velocidade de aquecimento. Segundo Dias Júnior *et al.* (2015). o carvão com elevado conteúdo de voláteis pode ser de fácil inflamabilidade, por necessitar de baixas temperaturas de ignição, desde que o sistema de conversão esteja dimensionado para fornecer a quantidade de ar necessária para que ocorra um regime de combustão completa.

O maior teor de componentes voláteis indica maior quantidade de substâncias na forma gasosa liberada da madeira, favorecendo na longa duração do processo de carbonização e queima, sugerindo assim uma óptima qualidade e rendimentos para carbonização da madeira (Machado *et al.*, 2014). De acordo com os mesmos autores, espécies com quantidade menor de substâncias voláteis terão degradação térmica mais lentas em relação a aquelas com maior quantidade

Arantes *et al.* (2013) afirmam que para uso doméstico, é desejável que o carvão vegetal apresente teor de materiais voláteis inferior a 26%. No presente estudo, o carvão vegetal do lenho atinge esse limite a partir de 450°C, especialmente com velocidades de aquecimento de 2°C/min e 3°C/min, enquanto o carvão da casca atinge o mesmo valor também a partir de 450°C, especialmente com velocidades de aquecimento de 1°C/min e 2°C/min, sugerindo que é necessário otimizar as condições de carbonização para atender ao padrão desejado para uso doméstico.

4.3.2. Teor de cinzas

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da análise química imediata, com base nos valores médios obtidos para o teor de cinzas variando de 1,69% a 9,38% para o carvão vegetal

produzido a partir das amostras do lenho e 8,49% a 15,30% para o carvão da casca. Os dados experimentais da cinza do lenho são classificados como de alta precisão, enquanto que os da casca apresentam uma variabilidade elevada em todas as temperaturas e velocidades, com maior dispersão em temperaturas e velocidades mais altas, sugerindo uma baixa precisão, conforme (Medri, 2011).

Tabela 11. Teor de cinza do carvão vegetal do lenho e da casca (%)

Material	Velocidade (°C/min)	Temperatura (°C)				
		400	450	500	550	600
Carvão vegetal do lenho	1	1,69	2,06	2,90	3,12	3,31
		(17,84)	(16,25)	(15,58)	(19,56)	(19,07)
	2	2,24	2,27	2,13	2,37	2,94
		(7,53)	(7,11)	(20,13)	(21,83)	(42,75)
	3	2,79	5,85	7,61	8,45	9,38
		(22,85)	(17,12)	(5,50)	(10,21)	(8,25)
Carvão vegetal da casca	1	8,63	9,43	10,34	10,93	11,43
		(24,09)	(27,49)	(28,03)	(28,57)	(28,84)
	2	10,86	12,61	13,36	14,49	15,30
		(18,20)	(22,38)	(21,19)	(20,68)	(15,32)
	3	8,49	10,16	10,48	10,44	11,30
		(25,09)	(26,71)	(36,38)	(40,20)	(41,83)

Observação: os valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

Trugilho & Silva (2001), obtiveram um valor médio para o teor de cinzas no carvão vegetal de jatobá de 1.39%, na temperatura final de 500 °C, sendo o valor inferior ao encontrado nesse estudo nas mesmas condições de carbonização. Ainda nesse sentido, Protásio *et al.* (2014) para o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* carbonizado a uma temperatura de 450°C e taxa de aquecimento de 1.67°C min⁻¹, encontraram teor de cinzas de 1.1%, inferior ao relatado neste trabalho quando a madeira foi carbonizada nas mesmas condições.

O teor de cinza da casca, foi relativamente alto, o que representa alto percentual de constituintes inorgânicos na casca de *Vernonanthura phosphorica*. Brito & Barrichelo (1978), também obtiveram altos teores de cinza em *E. grandis* (6,60%) e *E. saligna* (6,14%).

Conforme a Figura 11, com o aumento da temperatura de carbonização, observa-se um incremento no teor de cinzas no carvão vegetal tanto do lenho quanto na casca, evidenciando a maior concentração de minerais residuais no carvão. Além disso, a velocidade de aquecimento mais elevadas resultou em alto teor de cinza no carvão do lenho.

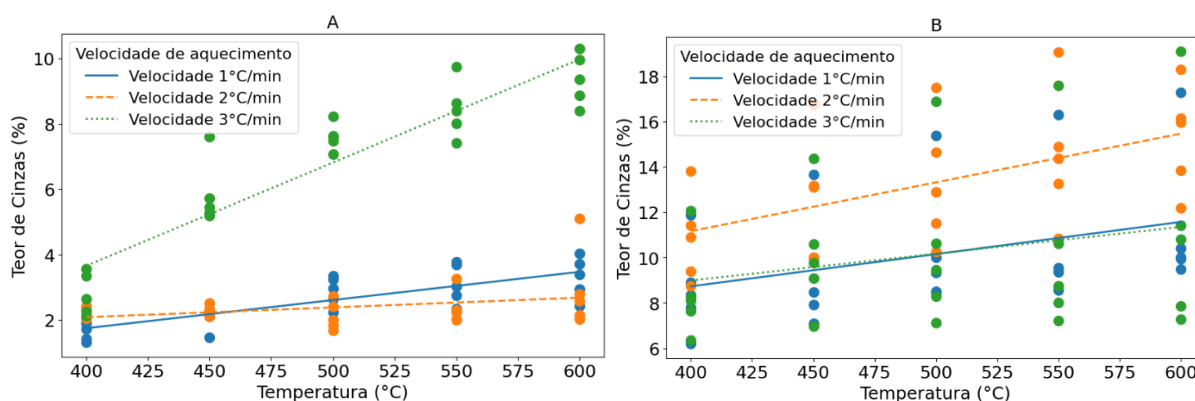


Figura 11. Tendências do teor de cinza em função da temperatura

A - Lenho; B – Casca.

De acordo com os resultados da regressão linear da Tabela 10, o aumento do teor de cinza com o incremento da temperatura de carbonização mostra-se significativo tanto no carvão vegetal do lenho ($p = 0,000$) quanto do carvão da casca ($p = 0,003$). A velocidade de carbonização, por sua vez, exerce efeito significativo no teor de cinzas do carvão do lenho ($p = 0,000$), mas não é significativo para o carvão da casca ($p = 0,983$).

Tabela 12. Regressão linear do teor de cinza do carvão do lenho e da casca.

Material	TCZ	Coef.	Er. Padr	Valor-t	Valor-p	Est. de Reg.
Carvão vegetal do lenho	Temperatura	-0,0144	0,0027	5,25	0,000	$R^2 = 0,1128$
	Velocidade	2,1014	0,2028	5,26	0,000	$P>F = 0,0102$
	Constante	7.4529	1,4209	1,4209	0,000	
Carvão vegetal da casca	Temperatura	0,0159	0,0051	3,09	0,003	$R^2 = 0,8780$
	Velocidade	0,0096	0,4509	0,02	0,983	$P>F = 0,000$
	Constante	3,2693	2,7350	1,20	0,236	

Temperatura de carbonização

O aumento do teor de cinza com o incremento da temperatura da carbonização observado neste estudo foi também constatado por Trugilho & Silva (2001), Azevedo *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2018), e deve-se a diminuição do teor de material volátil com o aumento da temperatura.

Apesar da tendência geral de aumento no teor de cinzas com o acréscimo na temperatura final de carbonização, observou-se um decréscimo do teor desse material quando a temperatura passou de 450°C para 500°C na velocidade de aquecimento de 2°C/min, porém voltou a mostrar tendência crescente a partir da temperatura de 550°C. Trugilho & Silva (2001) verificaram o

mesmo fenómeno em seus estudos e relatam que esse decréscimo pode ser explicado pelo facto de ocorrer a ignição de algum componente mineral nessa temperatura.

Diferentes tipos de madeira, como *Eucalyptus* e *Corymbia*, apresentam variações no teor de cinzas em resposta à temperatura de carbonização, sendo que temperaturas mais elevadas tendem a aumentar o teor de cinzas e reduzir o teor de minerais (Couto *et al.*, 2015).

Azevedo *et al.* (2013), estudaram a influência da temperatura final de carbonização no teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Ao analisarem os teores de cinzas, observaram que houve um aumento no teor de cinzas com o aumento da temperatura final de carbonização.

Em um estudo sobre a influência da temperatura final de carbonização (450°C e 550°C), nas características do carvão vegetal de espécies tropicais realizado por Silva *et al.* (2018), registou-se um aumento do teor de cinzas (que variou de 1,1% a 3,0%) com o aumento da temperatura final de carbonização. Esse aumento ocorre porque temperaturas mais altas promovem maior volatilização da matéria orgânica, concentrando os minerais presentes no material.

Por outro lado, num estudo sobre a selecção da temperatura de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia, Silva *et al.* (2020) verificou que para o teor de cinzas não foram observadas diferenças estatísticas em relação a variável temperatura.

Velocidade de aquecimento

A velocidade de aquecimento tem uma influência directa no teor de cinzas do carvão vegetal. Por um lado, velocidades mais baixas (1°C/min) tendem a produzir carvão com menor teor de cinzas, uma vez que o aquecimento mais lento permite maior retenção de matéria volátil e orgânica, diluindo a concentração de minerais, por outro lado, velocidades mais altas (3°C/min) resultam em maior teor de cinzas, visto que a rápida eliminação de voláteis concentra os minerais inorgânicos no material residual (Lang *et al.*, 2019).

Azevedo *et al.* (2013), estudaram também a da taxa de aquecimento no teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e verificaram através da análise de variância realizada para as relações entre a taxa de aquecimento e a temperatura final de carbonização, não foi observada diferença significativa entre as marchas de carbonização.

Protásio *et al.* (2014) afirmam que são desejáveis menores quantidades de cinzas no carvão vegetal, pois os minerais não sofrem combustão, gerando resíduos e diminuindo o valor calórico do combustível. Arantes *et al.* (2013) afirmam que para uso doméstico, é desejável que o carvão vegetal apresente teor de cinzas inferior a 3%. Segundo Machado *et al.* (2014), esta variável é

também importante para o processo de carbonização e queima do material, pois teores de cinza relativamente altos, constituem um factor indesejável e limitante para a sua utilização residencial urbana e rural.

4.3.3. Teor de carbono fixo

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da análise química imediata para o teor de carbono fixo cujos valores variam de 65,41% a 86,91% para o carvão do lenho e 57,41% a 77,30% para o carvão obtida da casca. O coeficiente de variação indica que tanto o carvão vegetal quanto a casca apresentam uma baixa variabilidade nos teores de carbono fixo, variando de 0.62% a 7.06%, sendo considerado de alta precisão experimental, de acordo com (Medri, 2011).

Os teores de carbono fixo para a espécie estudada foram próximos aos encontrados por Silva *et al.* (2018), que estudaram a influência da temperatura final de carbonização (450 °C e 500 °C) e taxa de aquecimento (1,19°C/min e 1,25°C/min) nas características do carvão vegetal de espécies tropicais, observaram um aumento do teor de carbono fixo de 65,9% a 76,3% com o aumento da temperatura final de carbonização entre as marchas de carbonização.

Tabela 13. Teor de carbono fixo do carvão vegetal do lenho e da casca (%)

Material	Velocidade (°C/min)	Temperatura (°C)				
		400	450	500	550	600
Carvão vegetal do lenho	1	67,20	71,14	79,25	83,35	86,95
		(3,41)	(2,25)	(1,81)	(1,78)	(1,52)
	2	65,76	72,26	77,04	83,17	85,70
		(3,65)	(1,61)	(1,78)	(1,31)	(1,56)
	3	65,41	71,51	75,14	78,02	81,37
		(6,70)	(3,28)	(1,83)	(1,91)	(2,27)
Carvão vegetal da casca	1	59,25	66,91	68,97	74,00	77,30
		(4,96)	(3,94)	(5,29)	(4,78)	(5,40)
	2	57,41	62,99	67,55	70,38	72,31
		(5,47)	(5,08)	(5,17)	(3,02)	(4,66)
	3	57,74	63,73	68,28	75,31	76,30
		(4,70)	(4,93)	(7,06)	(6,46)	(6,23)

Observação: os valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

Com o aumento da temperatura de carbonização, verifica-se uma elevação do teor de carbono fixo tanto no carvão vegetal do lenho quanto no da casca, reflectindo maior concentração de

carbono devido à redução de materiais voláteis, o que está em conformidade com Oliveira *et al.* (2010) e Brand (2010).

Além disso, as velocidades de aquecimento mais baixas tendem a apresentar maior teor de carbono fixo, especialmente nas temperaturas mais baixas, conforme ilustra a figura 12.

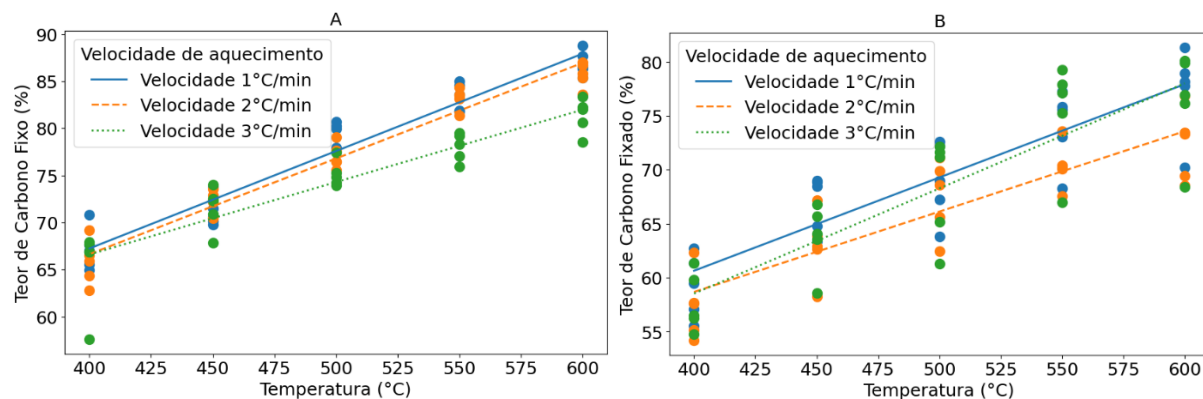


Figura 12. Tendências do teor de cinza em função da temperatura

A - Lenho; B - Casca.

De acordo com os resultados da regressão linear apresentados na Tabela 12, a temperatura de carbonização exerce uma influência significativa no teor de carbono fixo (TCF) tanto para o carvão vegetal do lenho ($p = 0,000$) quanto para o carvão da casca ($p = 0,000$). A velocidade de carbonização, por outro lado, mostra uma influência significativa no TCF do carvão do lenho ($p = 0,000$), mas não exerce influência significativa no carvão da casca ($p = 0,355$).

Tabela 14. Regressão linear do teor de cinza do carvão do lenho e da casca.

Material	TCF	Coef.	Er. Padr	Valor-t	Valor-p	Est. de Reg.
Carvão vegetal do lenho	Temperatura	-0.0939	0,0041	22,74	0,000	$R^2 = 0,9035$
	Velocidade	-1.6466	0,3432	-4,80	0,000	$P > F = 0,000$
	Constant	32.5341	2,2167	14,68	0,000	
Carvão vegetal da casca	Temperatura	-0,0861	0,0062	13,82	0,000	$R^2 = 0,7305$
	Velocidade	-0,5068	0,5446	-0,93	0,355	$P > F = 0,000$
	Constant	25,8788	3,3267	7,78	0,000	

Temperatura de carbonização

O aumento do teor de carbono fixo com o incremento da temperatura neste trabalho foi observado também em outros estudos. Trugilho & Silva (2001) estudaram a influência da temperatura final de carbonização no teor de carbono fixo no carvão vegetal de *Himenea*

coubaril L. e observaram que quando houve um acréscimo da temperatura final de carbonização de 300°C a 900°C, o teor de carbono fixo aumentou de 21,59% a 92,22%.

Oliveira *et al.* (2010), observaram que o teor de carbono fixo o aumento da temperatura final de carbonização (450°C, 500°C e 550°C) acarretou no aumento do teor de carbono fixo de 83,17% a 88,17%. Silva *et al.* (2018), analisaram a influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais e observaram um aumento do teor de carbono fixo de 65,9% a 76,3% com o aumento da temperatura final de carbonização (450°C e 500°C) entre as marchas de carbonização.

Oliveira *et al.* (2010), estudaram a influência da temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento no *Eucalyptus pellita*, e foi observado que para o teor de carbono fixo, houve maior influência da temperatura de carbonização, dado que houve diferenças significativas entre marchas de temperatura.

Velocidade de aquecimento

A velocidade de aquecimento afecta o teor de carbono fixo no carvão vegetal. Em velocidades mais baixas, a carbonização é mais controlada, favorecendo a conversão da matéria orgânica em carbono fixo, resultando em maior teor de carbono fixo tanto no carvão do lenho quanto na casca. Em velocidades mais altas, a liberação rápida de voláteis pode diminuir a eficiência da conversão, levando a um menor teor de carbono fixo (Medeiros *et al.*, 2020).

O carbono fixo é o componente predominante do carvão vegetal, e quanto maior o seu valor maior será o seu valor calórico, além de apresentar um regime de queima mais lento, podendo residir por mais tempo nos fornos de carbonização (Brand, 2010). Combustíveis com teores elevados de carbono fixo são preferíveis para o uso siderúrgico, devido à estabilidade térmica e elevado poder energético (Neves, 2012).

Arantes *et al.* (2013) afirmam que para uso doméstico, é desejável que o carvão vegetal apresente teor de carbono fixo superior a 65%. Por outro lado, Dias Junior *et al.* (2020), afirmam que para o uso em indústrias siderúrgicas assim como para uso doméstico, o carvão vegetal deve apresentar, alto teor de carbono fixo (maior que 73%).

Comparação de propriedades energéticas entre carvão do lenho e da casca

Os resultados da comparação de médias na tabela abaixo revelam que o lenho e casca apresentam diferenças significativas em termos de rendimento gravimétrico, material volátil, cinza e carbono fixo. Nesse sentido, a casca se destaca por apresentar maior rendimento

gravimétrico e maior quantidade de cinza, enquanto o lenho tende a ter maior formação de carbono fixo, especialmente nas temperaturas mais baixas.

Tabela 15. Comparação de médias das propriedades energéticas entre carvão do lenho e da casca.

Parâmetro (%)	VA(°C/min)	Material	Temperatura (°C)				
			400	450	500	550	600
Rendimento gravimétrico	1	Lenho	38,09	34,75	32,84	31,06	29,50
		Casca	46,85	43,75	40,72	36,42	34,37
		<i>p</i>	0.0001	0.0000	0.0000	0.0003	0.0001
	2	Lenho	35,77	33,89	31,25	28,68	28,68
		Casca	48,32	41,59	39,02	36,05	33,89
		<i>p</i>	0.0000	0.0001	0.0000	0.0090	0.0088
	3	Lenho	36,92	33,55	32,31	29,6	28,67
		Casca	45,45	40,07	37,08	34,02	33,40
		<i>p</i>	0.0009	0.0086	0.0090	0.0006	0.0001
Material volátil	1	Lenho	31,12	26,80	17,85	13,53	9,74
		Casca	32,13	23,66	20,68	15,07	11,27
		<i>p</i>	0.6057	0.0369	0.0656	0.0534	0.1153
	2	Lenho	32,01	25,46	20,82	14,46	11,36
		Casca	31,74	24,40	19,09	15,13	12,38
		<i>p</i>	0.8629	0.3132	0.0737	0.3798	0.2289
	3	Lenho	31,80	22,64	17,25	13,54	9,25
		Casca	33,7	26,11	21,24	14,26	12,40
		<i>p</i>	0.1425	0.0758	0.0156	0.3219	0.0010
Cinza	1	Lenho	1,69	2,06	2,90	3,12	3,31
		Casca	8,63	9,43	10,34	10,93	11,43
		<i>p</i>	0.0001	0.0088	0.0090	0.0006	0.0090
	2	Lenho	2,24	2,27	2,13	2,37	2,94
		Casca	10,86	12,61	13,36	14,49	15,30
		<i>p</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0090	0.0090
	3	Lenho	2,79	5,85	7,61	8,45	9,38
		Casca	8,49	10,16	10,48	10,44	11,30
		<i>p</i>	0.0004	0.0163	0.1332	0.3295	0.3969
Carbono fixo	1	Lenho	67,20	71,14	79,25	83,35	86,95
		Casca	59,25	66,91	68,97	74,00	77,30
		<i>p</i>	0.3968	0.0014	0.0153	0.0006	0.0012
	2	Lenho	65,76	72,26	77,04	83,17	85,70
		Casca	57,41	62,99	67,55	70,38	72,31
		<i>p</i>	0.0015	0.0003	0.0005	0.0000	0.0000
	3	Lenho	65,41	71,51	75,14	78,02	81,37
		Casca	57,74	63,73	68,28	75,31	76,30
		<i>p</i>	0.0280	0.0090	0.0156	0.2682	0.0569

Por outro lado, em algumas propriedades, como o material volátil, a diferença entre os dois materiais é mais variável. Em determinadas condições experimentais, como as diferentes temperaturas e velocidades de aquecimento, alguns valores de p indicam diferenças significativas, enquanto outros não, mostrando que a volatilização é influenciada de maneira diferente para cada material, dependendo das condições de carbonização.

Os estudos de autores como Damásio *et al.* (2013), evidenciam diferenças no rendimento gravimétrico e teor de cinzas. Em geral, a casca tende a apresentar maior rendimento gravimétrico e maior concentração de cinza em comparação com o lenho. Isso é consistente com o comportamento de materiais lignocelulósicos, onde a casca, por ser rica em compostos inorgânicos, resulta em uma maior quantidade de cinzas após a carbonização (Aziz *et al.*, 2022).

A maior concentração de cinza na casca pode ser explicada pela presença de substâncias minerais naturais que são mais difíceis de decompor durante o processo de carbonização, como observado por Vital (1989), em estudos similares com outras espécies vegetais.

O maior conteúdo de carbono fixo no lenho pode estar relacionado à sua maior densidade e maior concentração de celulose e hemicelulose, que são precursores para a formação de carbono fixo durante a pirólise (Santos *et al.*, 2016).

Damásio *et al.* (2013) e Aziz *et al.* (2022) destacam que, em temperaturas elevadas, o material volátil tende a ser mais rapidamente liberado, o que pode resultar em diferenças no comportamento da volatilização entre a madeira e a casca, como observado nos resultados experimentais. Além disso, Miranda (2017) sugere que a natureza heterogênea da casca, com uma maior presença de substâncias voláteis e compostos orgânicos, pode tornar sua volatilização mais sensível às condições de carbonização, explicando a variabilidade observada entre os diferentes tratamentos experimentais.

4.4. Análise química das cinzas

Os minerais essenciais cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K) e fósforo (P) estão presentes tanto nas cinzas da casca como do lenho de *V. phosphorica*. Estes elementos, segundo Nakakoji *et al.* (2020), são conhecidos por suas funções cruciais para o desenvolvimento vegetal e potenciais aplicações em práticas agrícolas e mantêm-se no carvão resultante do processo de carbonização do lenho assim como da casca, indicando a possibilidade de aproveitamento como fontes minerais.

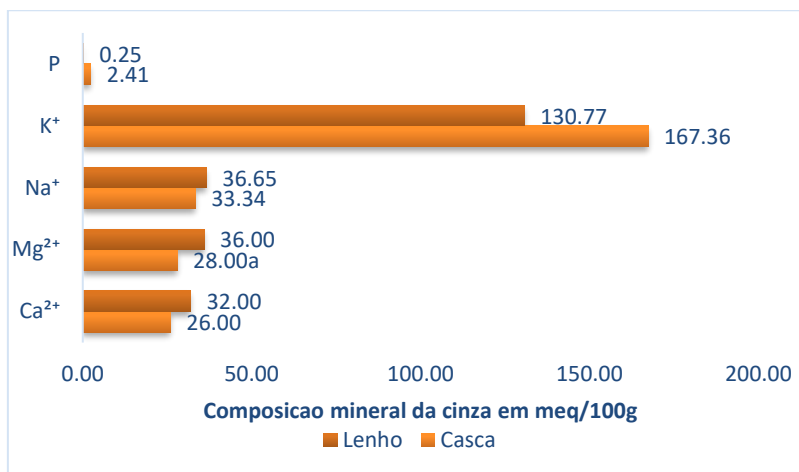


Figura 13. Composição mineral da cinza vegetal

No presente estudo a composição mineral das cinzas mostra que tanto o lenho como a casca têm concentrações mais altas de potássio, sódio e magnésio. Nakakoji et al. (2020), constatou que o nutriente mineral mais abundante nas cinzas vegetais é o cálcio, seguido de perto pelo potássio e magnésio, enquanto que o fósforo é frequentemente o mais escasso. De acordo com Stankowski *et al.* (2021), as cinzas de biomassa, particularmente de madeira e agro-biomassa, contêm tipicamente uma elevada concentração destes macroelementos, sendo o cálcio o mais prevalente.

Para Neina *et al.* (2020), as cinzas da madeira geralmente contêm concentrações significativas de cálcio, potássio, fósforo e magnésio, tornando-se uma fonte importante de nutrientes para o solo. Os resultados obtidos no presente trabalho divergem com as tendências apresentadas na literatura quanto a concentração de cálcio que no presente trabalho teve pouca expressão.

Neina *et al.* (2020), explica que essa baixa concentração de cálcio deve se ao facto de ser atribuída ao tipo específico de biomassa utilizada (*Vernonanthura phosphorica*) e às condições experimentais de carbonização, que podem ter influenciado a volatilização e a retenção do cálcio durante o processo de aquecimento.

Embora as concentrações destes elementos variem significativamente entre a madeira e a casca, a tendência geral indica que a casca contém geralmente níveis mais elevados desses nutrientes (Werkelin *et al.*, 2005). Esta tendência foi observada para o potássio e o fósforo no presente trabalho.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

A espécie *Vernonanthura phosphorica* possui potencial energético para a produção de carvão vegetal adequado para aplicações domésticas, assim como sua casca, que pode ser utilizada para geração de energia, uma vez que:

- ✚ A densidade básica do lenho e da casca de *Vernonanthura phosphorica* apresentou valores compatíveis com os de outras espécies de rápido crescimento mencionadas na literatura;
- ✚ O rendimento gravimétrico, o teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas do carvão vegetal do lenho e da casca encontram-se dentro ou próximos dos intervalos recomendados pela literatura para espécies energéticas;
- ✚ O aumento da temperatura final de carbonização influenciou significativamente as propriedades do carvão vegetal do lenho e da casca, de forma negativa o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis, e de forma positiva o teor de carbono fixo e, em menor escala, o teor de cinzas;
- ✚ O aumento da velocidade de aquecimento teve influência menos expressiva, mas reduziu o rendimento gravimétrico, teor de carbono fixo do carvão do lenho e da casca, e o teor de material volátil do carvão do lenho, e incrementou o teor de cinzas do carvão do lenho e da casca, assim como o teor de material volátil do carvão da casca.

5.2. Recomendações

Para otimizar o processo e explorar o potencial da biomassa de *Vernonanthura phosphorica*, são necessários estudos adicionais sobre as variáveis na produção de carvão vegetal. A seguir, estão algumas recomendações para futuras pesquisas:

- ✚ Caracterizar o rendimento gravimétrico do ácido pirolenhoso e gases não condensáveis gerados durante a carbonização;
- ✚ Investigar outras características do carvão, como densidade aparente e poder calorífico em diferentes condições, para avaliar a aplicabilidade do carvão produzido em diferentes tipos de uso doméstico ou industrial;
- ✚ O carvão produzido a temperatura de 500°C e a velocidade de 1°C/min apresentou rendimento gravimétrico aceitável de boa qualidade energética, com baixo teor de voláteis e cinzas, e elevado carbono fixo, sendo recomendável para fins domésticos e industriais;

- ✚ Utilização da casca de *Vernonanthura phosphorica* na produção de briquetes de carvão vegetal como forma de agregar valor e melhorar sua aplicabilidade energética;
- ✚ Realização de um estudo de viabilidade económica para avaliar a disponibilidade de *Vernonanthura phosphorica* para produção de carvão vegetal a partir do lenho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu Neto, R., Assis, A. A., Ballarin, A. W., & Hein, P. R. G. (2020). Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. *SN Applied Sciences*, 2(6), 1020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2822-0>
- Afonso, C. M. I., Gonçalves, T. A. P., Muñiz, G. I. B. D., Matos, J. L. M. D., & Nisgoski, S. (2015). Mozambique's charcoals: Anatomy of nine native species. *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 105–112. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000100011>
- ALER - Associação Lusófona de Energias Renováveis. (2017). *Energias Renováveis em Moçambique – Relatório Nacional do Ponto de Situação (Segunda Edição)*. Moçambique. 200.
- Amrullah, A., Irawansyah, H., Ardiyat, I. N., Cahyono, G. R., & Ansyah, P. R. (2023). Effect of carbonization temperature on the properties of Rubber Seed-Shell briquettes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1187(1), 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1187/1/012022>
- Andrade, M., Minhoni, M., Sansígolo, C., & Zied, D. (2009). Basic density of wood from seven species and three clones of *eucalyptus* before and during shiitake cultivation. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 31, 235–240. <https://doi.org/10.1590/S1807-86212009000200008>
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. (2015). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Parte 2. BIG – Banco de Informações de Geração*. Brasil. 199
- Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(8), 1619–1640. <https://doi.org/10.1021/ie0207919>
- Arantes, M. D. C., Trugilho, P. F., Silva, J. R. M. da, & Andrade, C. R. (2013). Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Cerne*, 19, 423–431. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300009>
- ASTM Standard D1762 – 84. (2013). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials.
- Atanassov, B., Egas, A., Falcão, M., Fernandes, A., & Mahumane, G. (2012). Mozambique urban biomass energy analysis. *Capacity Building in Energy Planning and Management Europe*. Ministry of Energy. Mozambique, 55.
- Azevedo, C. H., Santos, F., Andrade, L., Silva, A., & Santos, F. (2013). Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico

- e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Enciclopedia biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, 9(16), 1279-1287.
- Aziz, I., Babar, Z. B., Haider, R., Mahmood Saleem, Munir, S., & Sattar, H. (2022). A comparative study of thermal and combustion kinetics for raw and bio-chars of eucalyptus wood and bark. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 44(2), 3313–3329. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2062490>
- Barcellos, D. C. (2007). Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 163.
- Barreiros, R. M., Godinho, E. Z., Pereira, L. C., Dias, K. B., & Caneppele, F. de L. (2024). Methods in determining basic density of wood. *Wood Material Science & Engineering*, 19(4), 918–919.
- Batista, D. C., Klitzke, R. J., & Santos, C. V. T. (2010). Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. *Ciência Florestal*, 20, 665–674. <https://doi.org/10.5902/198050982425>
- Brand, M. A. (2010). Energia de biomassa florestal. Interciência. Rio de Janeiro. 131.
- Bridgwater, T., & Maniatis, K. (2004). The production of biofuels by the thermochemical processing of biomass. 521–611. https://doi.org/10.1142/9781860945496_0010
- Brito, J. O. (1993). Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Pesquisas e Estudos Florestais Departamento de Silvicultura da E.S.A.L.Q. - USP. Circular técnica N. 181, 6.
- Brito, J. O., & Barrichelo, L. E. G. (1978). Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca. *IPEF*, 16, 63–70.
- Bunster, J. (2006). Commercial Timbers of Mozambique. Technological Catalogue. Traforest Lda. Maputo, 49–59.
- Castro, A. F. N. M., Castro, R. V. O., Carneiro, A. de C. O., Santos, R. C. dos, Carvalho, A. M. M. L., Trugilho, P. F., & Melo, I. C. N. A. de. (2016). Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. *Revista Árvore*, 40, 551–560. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300019>
- Chamba, E., & Rokyta, k. (1994). Inventario Florestal das Plantações de Inhamacari. FAEF/UEM. Maputo.
- Chavana, R. (2014). Estudo da cadeia de valor de carvão vegetal no sul de Moçambique. Instituto de Investigação Agrária de Moçambique, República de Moçambique, 44.

- Costa, T. G., Bianchi, M. L., Protásio, T. de P., Trugilho, P. F., & Pereira, A. J. (2014). Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. *Cerne*, 20, 37–46. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602014000100005>
- Couto, A. M., Trugilho, P. F., Napoli, A., Lima, J. T., Silva, J. R. M. da, & Protásio, T. de P. (2015). Quality of charcoal from *Corymbia* and *Eucalyptus* produced at different final carbonization temperatures. *Scientia Forestalis*, 43(108), 817–831.
- Couto, C. M. (2013). Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas—RS. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 56.
- Damásio, R. A. P., Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Cardoso, M. T., Vital, B. R., & Carvalho, A. M. L. M. (2013). Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33(75), 261-267. <https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.75.505>
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Demirbas, A., & Demirbas, A. H. (2004). Estimating the Calorific Values of Lignocellulosic Fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, 22(2), 135–143. <https://doi.org/10.1260/0144598041475198>
- Demirbas, A. H. (2005). Yields and heating values of liquids and chars from spruce trunkbark pyrolysis. *Energy Sources*, 27(14), 1367–1373. <https://doi.org/10.1080/009083190523208>
- Dias Junior, A. F., Esteves, R. P., Silva, Á. M. da, Júnior, A. D. D., Oliveira, M., Brito, J., Napoli, A., & Braga, B. (2020). Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01489-6>
- Dong, W., Zhu, X., Meng, L., Ji, L., Yang, F., Shen, D., Xue, M., & Zhang, Q. (2024). Effect of Carbonization Temperature on the Structure of Pitch Carbon and Its Low-temperature Lithium Storage Properties. *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, 17(1), 55–68.
- Egas, A. F., Fernandes, A. M., Bila, N. F., & Wilissone, A. (2016). Título: Cadeia de Fornecimento e Consumo de Combustíveis Lenhosos nas Cidades de Pemba e Montepuéz. Relatório sobre cadeia de combustíveis lenhosos. FNDS. Maputo., 36.
- Eloy, E., Silva, D. A. da, Caron, B. O., & Souza, V. Q. de. (2015). Capacidade energética da madeira e da casca de acácia-negra em diferentes espaçamentos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(82), 163-167. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.606>

- Falcão, D. M. S. C. de S. (2013). Produção e consumo doméstico de combustíveis lenhosos em Moçambique [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. 108]. <https://run.unl.pt/handle/10362/10926>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). Criteria and Indicators for sustainable woodfuels. Forestry Paper 160, Roma. <https://www.fao.org/4/i1673e/i1673e00.htm>
- Fields, J., & Criscione, K. (2023). Pine Bark Particle Separation Improves as Moisture Content Decreases at Time of Screening. *HortScience*, 58, 1068–1074.
- Fortaleza, A. P., Filho, J. J. P. do N., Ceretta, R. P. da S., Barros, D. de S., & Silva, S. S. da. (2019). Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. *Ciencia Florestal*, 29(3), 1436–1451. <https://doi.org/10.5902/1980509831639>
- Fortes, A. G., Mutenda, F. M., & Raimundo, B. (2020). Energias renováveis em Moçambique: Disponibilidade, geração, uso e tendências futuras. *Revista brasileira multidisciplinar*, 23(1), 8–27.
- Goswami, M., Pant, G., Mansotra, D. K., Sharma, S., & Joshi, P. C. (2021). Biochar: A Carbon Negative Technology for Combating Climate Change. Em D. Pant, A. Kumar Nadda, K. K. Pant, & A. K. Agarwal (Eds.), *Advances in Carbon Capture and Utilization* (pp. 251–272). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0638-0_11
- Guedes, B., Olsson, B., Siteo, A., & Gustaf, E. (2018). Net primary production in plantations of *Pinus taeda* and *Eucalyptus cloeziana* compared with a mountain miombo woodland in Mozambique. *Global Ecology and Conservation*, 15, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00414>
- Hoefnagels, R., Junginger, M., & Faaij, A. (2014). The economic potential of wood pellet production from alternative, low-value wood sources in the southeast of the U.S. *Biomass & Bioenergy*, 71, 443–454.
- ISO 13061-2. (2014). Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens. International standard.
- Júnior, C. D. S. G., Coelho, M. D. S., & Santos, J. M. D. (2022). Avaliação da influência do tempo de estocagem nos parâmetros de qualidade de carvão vegetal e coque de petróleo. 9. <https://doi.org/10.17648/enemp-2022-159190>
- Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>

- Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., & Mohan, S. (2010). Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. *Journal of Forestry Research*, 21(4), 514–516. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0108-x>
- Kurauchi, M. H. N. (2014). Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal. [Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais]. Universidade de São Paulo, São Paulo. 102.
- Kusiak, W., Majka, J., Zborowska, M., & Ratajczak, I. (2022). Chemical Composition and Related Properties of Lime (*Tilia cordata* Mill.) Bark and Wood as Affected by Tree Growth Conditions. *Materials*, 15(11), 4033–4033. <https://doi.org/10.3390/ma15114033>
- Lang, M., Weber, K., & Quicker, P. (2019). Influence of heating rate on the solid yield of biomass pyrolysis. *Engineering Conferences International*, Cetraro, Italy, 85, 186–191.
- Lisboa, S., Francisco, F., Vallius, E., Lensu, A., Macamo, E., & Siteo, A. (2022). Assessing the Impact of Road and Land Use on Species Diversity of Trees, Shrubs, Herbs and Grasses in the Mountain Landscape in Southern Africa. *Frontiers in Conservation Science*, 3, 9. <https://doi.org/10.3389/fcsc.2022.829690>
- Lisboa, S. N., Grinand, C., Betbeder, J., Montfort, F., & Blanc, L. (2024). Disentangling the drivers of deforestation and forest degradation in the Miombo landscape: A case study from Mozambique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103904>
- Machado, G. O., Vogel, F., & Silva, M. M. e. (2014). Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.). *Ambiência*, 10(1), 83-96.
- MAE - Ministério da Administração Estatal. (2005). Perfil do Distrito de Manica-Província de Manica. República de Moçambique. <http://www.govnet.gov.mz>
- Malengue, A., Lourenço, A., Patrício, H., Costa, R. A., Quilhó, T., & Gominho, J. (2023). Tropical mobola plum (*Parinari curatellifolia*): A full characterization of wood and bark within the scope of biorefineries. *Research Square*, Universidade de Lisboa. 32.
- Marroquín-Morales, P., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., & Torre, D. de J. P. de la. (2022). Estimación de la densidad básica de la madera en tres especies tropicales en Chiapas, México. *E-Cucba*, 10(19), 25–32. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi19.260>
- Massuque, J. Z. (2017). Potencial energético de espécies procedentes de plano de manejo florestal sustentado no norte de Moçambique. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de Lavras. Lavras-Minas gerais, 50.

- Medeiros, L. C. D. de, Pimenta, A. S., Braga, R. M., Carnaval, T. K. de A., Medeiros Neto, P. N., & Melo, D. M. de A. (2020). Effect of pyrolysis heating rate on the chemical composition of wood vinegar from *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*. *Revista Árvore*, 43.
- Medri, D. W. (2011). Análise exploratória de dados. Curso de Especialização “Lato Sensu” em Estatística, Universidade Estadual de Londrina; Londrina. 82.
- Miranda, M. R. da S. (2017). Investigação da pirólise de biomassas do cerrado para aplicação à sistemas de gaseificação estagiada. Universidade de Brasília. Brasília-DF, 188.
- Mota, F. C. M. (2013). Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de *Eucalyptus sp.* No Brasil. Brasília/DF, 169.
- Moulin, J. C., Nobre, J. R. C., Castro, J. P., Trugilho, P. F., & Arantes, M. D. C. (2017). Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in amazon rainforest. *Cerne*, 23(2), 209–218.
- Nakakoji, N. K. N., Narusawa, Í. D. S., Cardoso, E. P., & Paulo, C. (2020). Agronomic evaluation of mineral elements of vegetable ash from the ceramic industrial district of são miguel do guamá. *Sociedade 5.0: educação, ciência, tecnologia e amor*. Recife, 6.
- Neina, D., Faust, S., & Joergensen, R. G. (2020). Characterization of charcoal and firewood ash for use in African peri-urban agriculture. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40538-019-0171-2>
- Neiva, D. M., Araújo, S., Gominho, J., Carneiro, A. D. C., & Pereira, H. (2018). An integrated characterization of *Picea abies* industrial bark regarding chemical composition, thermal properties and polar extracts activity. *Plos one*, 13(11), 14.
- Neves, T. A. (2012). Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Lavras. Minas gerais, 95.
- Ngarakana, E., & Kativu, S. (2017). Soil based assessment of the invasive species *Vernonanthura phosphorica* (Vell.) H. Rob. (Asteraceae) in Burma Valley, Zimbabwe. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 73(1), 918–919. <https://doi.org/10.1080/0035919X.2017.1369470>
- Nisgoski, S., Vieira, H. C., Gonçalves, T. A. P., Afonso, C. M., & de Muñiz, G. I. B. (2020). Charcoal anatomy and NIR spectra of *Spirostachys africana*, *Terminalia sp.* And *Colophospermum mopane* in different carbonization process. *SN Applied Sciences*, 2(5), 908. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2719-y>
- Nones, D., Brand, M., Cunha, A., Carvalho, A., & Weise, S. (2014). Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de

- Eucalyptus benthamii*. Floresta Ambiente, Curitiba, PR, 45(1), 57–64.
<https://doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157>
- Nunes, L., Raposo, M., Meireles, C., Gomes, C., & Ribeiro, N. (2021). Carbon Sequestration Potential of Forest Invasive Species: A Case Study with *Acacia dealbata* Link. Resources, 10, 51. <https://doi.org/10.3390/resources10050051>
- Oliveira, A. C., Almeida, W., & Pereira, B. L. C. (2010). Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. Scientia Forestalis. Piracicaba, 38(87), 431–439.
- Oliveira, A. C., Carneiro, A. D. C. O., Pereira, B. L. C., Vital, B. R., Carvalho, A. M. M. L., Trugilho, P. F., & Damásio, R. A. P. (2013). Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. Revista Árvore, 37(3), 557–566. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>
- Oliveira, E. de. (2003). Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino. Universidade Federal de Viçosa, Minas gerais, Brasil, 149.
- Oliveira, J. B., Gomes, P. A., & de Almeida, M. R. (1982). Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. Serie de Publicações Técnicas-Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Brazil). no. 6.
- Panassal, K. V., Osório, D. M. M., Costa, C. C. da, Ceratti, A. M., Machado, A. B., & Berlese, D. B. (2022). Análise da qualidade do ar e a associação com as doenças respiratórias na população exposta a fumaça de carvão vegetal. Saúde (Santa Maria). <https://periodicos.ufsm.br/revistasaude/article/view/66495>
- Paulino, P. da S., & Lima, I. L. de. (2018). Densidade básica e dimensões celulares da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla*, aos oito anos de idade. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 9(1), 9-18.
- Pereira, A. K. S. (2021). Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus spp* . Uniersidade Estadual do Sudoeste da bahia – brasil. 78.
- Pereira, B., Carneiro, A., Márcia, A., Colodette, J., Oliveira, A., & Fontes, M. (2013). Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. BioResources, 8(3), 4574–4592.
- Protásio, T. de P., Neves, T. A., Reis, A. A. dos, & Trugilho, P. F. (2014). Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus spp* visando à produção de bioenergia. Ciência Florestal,. Ciência Florestal, Santa Maria, 24(2), 465–477. <https://doi.org/10.5902/1980509814587>

- Protásio, T., Goulart, S., Neves, T., Trugilho, P., Ramalho, F., & Queiroz, L. (2014). Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 34(78), 111–123. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657>
- Qubeissi, M. A., El-Kharouf, A., & Soyhan, H. S. (2020). *Renewable Energy: Resources, Challenges and Applications*. BoD – Books on Demand. 540.
- Rancatti, H. (2012). Potencialidade energética da madeira de duas espécies florestais via uso directo e através da pirólise. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Centro-Oeste, 89.
- Ribeiro, L. R. R., Santos, V. N. B. dos, Rocha, E. da J. T., & Silveira, R. B. (2018). Estudo de viabilidade da instalação de um gerador de energia eléctrica a partir do biogás produzido no aterro sanitário de caucaia-ce. *Instituto Federal do Ceará*, 18, 38.
- RLFFB. (2002). Regulamento da Lei de Florestas e Fauna Bravia. Decreto n.º 12/2002, Lei n.º 10/99, de 07 de Julho. Moçambique.
- Rosa, R. A., Arantes, M. D. C., Paes, J. B., Andrade, W. S. de P., Moulin, J. C., Rosa, R. A., Arantes, M. D. C., Paes, J. B., Andrade, W. S. de P., & Moulin, J. C. (2012). Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 3(2), 41-48. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v3n2.rosa>
- Rowell, R. . M. (2005). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Library of Congress Cataloging. Florida, 473.
- Sakthivel, R., Ramesh, K., Shameer, P. M., & Purnachandran, R. (2019). A Complete Analytical Characterization of Products Obtained from Pyrolysis of Wood Barks of *Calophyllum inophyllum*. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2319–2333. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0236-7>
- Santos, R. C. dos, Carneiro, A. de C. O., Vital, B. R., Castro, R. V. O., Vidaurre, G. B., Trugilho, P. F., & Castro, A. F. N. M. (2016). Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, 26, 657–669. <https://doi.org/10.5902/1980509822765>
- Santos, I. D. (2010). Influência dos teores de lignina, holocelulose e extractivos na densidade básica e na contracção da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. 57. <http://repositorio.unb.br/handle/10482/3594>
- São Paulo, (Estado). (2003). Resolução n° 10 SAA, de 11 de julho de 2003. *Diário Oficial do Estado de São Paulo. Poder Executivo*, São Paulo, 113.
- Silva, L. F. F. da, Castro, A. R. S. de, Oliveira, R. S., Silva, S. S. da, Pamplona, V. M. S., Barros, D. de S., Nobre, J. R. C., & Numazawa, S. (2020). Selecção de espécie,

- temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 40, 1–11.
- Silva, R. C., Marchesan, R., Fonseca, M. R., Dias, A. C. C., & Viana, L. C. (2018). Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 38. <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801573>
- Silva, F. T. M. (2019). Valorização da madeira *Eucalyptus* sp. via pirólise: Caracterização e rendimentos dos produtos [Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia.]. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.323>
- Sjostrom, E. W. (1993). *Wood chemistry: Fundamentals and applications*. (2.^a ed.). Academic Press, NY. 250.
- Soares, V. C., Bianchi, M. L., Trugilho, P. F., Höfler, J., & Pereira, A. J. (2015). Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. *Cerne*, 21(2), 191–197.
- Sobol, L., Sabat, D., & Dyjakon, A. (2023). Assessment of Bark Properties from Various Tree Species in Terms of Its Hydrophobicity and Energy Suitability. *Wroclaw University of Environmental and Life Sciences, Energies*, 16(6586), 1–21. <https://doi.org/10.3390/en16186586>
- Somerville, M., & Deev, A. (2020). The effect of heating rate, particle size and gas flow on the yield of charcoal during the pyrolysis of radiata pine wood. *Renewable Energy*, 151, 419–425.
- Souza, N. D., Amodei, J. B., Xavier, C. N., Dias Júnior, A. F., & Carvalho, A. M. de. (2016). Estudo de Caso de uma Planta de Carbonização: Avaliação de Características e Qualidade do Carvão Vegetal Visando Uso Siderúrgico. *Floresta e Ambiente*, 23(2), 270–277.
- Stankowski, S., Chajduk, E., Osińska, B., & Gibczyńska, M. (2021). Biomass ash as a potential raw material for the production of mineral fertilisers. *Agronomy Research*, 19(4), 1999–2012.
- Thybring, E. E., & Fredriksson, M. (2023). Wood and Moisture. Em P. Niemz, A. Teischinger, & D. Sandberg (Eds.), *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer International Publishing. 355-397.
- Tian, P., Han, J., Guo, S., Di, J., & Han, X. (2024). Distribution Model of Moisture Content in Laminated Wood Components. *Polymers*, 16(11), 15.

- Timberlake, J. (2017). Biodiversity knowledge from the chimanimani trans-frontier conservation area (TFCA). Em Biodiversity knowledge from the chimanimani trans-frontier conservation area (TFCA). (p. 87).
- Timberlake, J., Darbyshire, I., Wursten, B., Ballings, P., Hadj-Hammou, J., Matimele, H., Banze, A., Chipanga, H., Muassinar, D., Massunde, J., Chelene, I., Osborne, J., & Shah, T. (2016). Chimanimani mountains: Botany and Conservation. CEPF Grant 63512: In from the cold: Providing the knowledge base for comprehensive Biodiversity Conservation in the Chimanimani Mountains. Mozambique, 95.
- Torrezani, N. C., & Oliveira, E. F. D. (2013). Problemas ambientais decorrentes da exploração do carvão mineral e a aplicação da ecotoxicologia aquática como ferramenta de biomonitoramento. *Oecologia Australis*, 17(4), 509–521. <https://doi.org/10.4257/oeco.2013.1704.05>
- Trianoski, R., Matos, J. L. M., Iwakiri, S., & Prata, J. G. (2013). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. *Floresta*, 43(3), 503. <https://doi.org/10.5380/rf.v43i3.28252>
- Trugilho, P. F., & Silva, D. A. D. (2001). Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). *Scientia Agraria*, 2(1), 45. <https://doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976>
- Trugilho, P., Lima, J., Mori, F., & Lino, A. (2001). Evaluation of *Eucalyptus* clones for charcoal production. *Cerne*, 7, 104–114.
- Trugilho, P., Marconato, D., Massuque, J., Mazzuchi, N., Salgado, T., & Silva, P. (2023). Equilibrium moisture content in charcoal exposed to different relative humidity conditions. *Tree Dimensional*, 10(e023014), 1–4.
- Vale, A. T., Abreu, V. L. S., Gonçalves, J. C., & Costa, A. F. (2002). Estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis. *Brasil Florestal*, 21(73), 47–52.
- Vale, A. T. do, Dias, Í. S., & Santana, M. A. E. (2010). Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, 20(1), 137–145.
- Vega, A. J., & Dematteis, M. (2014). The transfer of *Vernonia perangusta* to the genus *Vernonanthura* (Vernonieae, Asteraceae) and the correct name for *Vernonanthura phosphorica*. *Phytotaxa*, 8(1), 46. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.8.1.5>
- Venega, R. de S., Silva, R. C. da, Saraiva, K. F., Colares, C. J. G., Loiola, P. L., Silva, D. A. da, & Marchesan, R. (2023). Energy Quality of Wood and Charcoal from the Stem and Root of *Eucalyptus* spp. *Floresta e Ambiente*, 30(1), 8.

- Vidaurre, G. B., Carneiro, A. de C. O., Vital, B. R., Santos, R. C. dos, & Valle, M. L. A. (2012). Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). *Revista Árvore*, 36(2), 365–371.
- Vieira, R., Lima, J., Monteiro, T., de Sousa Selvatti, T., Baraúna, E., & Napoli, A. (2013). Influence of temperature on products yield of *Eucalyptus microcorys* carbonization. *Cerne*, Lavras, 19(1), 59–64. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000100008>
- Vital, B. R. (1989). Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. *IPEF*, 41/42, 44–49.
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., & Hupa, M. (2005). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest. *Biomass & Bioenergy*, 29(6), 451–466.
- Westerhout, F., & Bovee, M. (1985). Métodos de Análise Química e Física de Solos em Uso no INIA (Parte I). Instituto nacional de investigação agronómica, Maputo, Mozambique.
- Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., Trugilho, P. F., & Monteiro, T. C. (2014). Extractives and energetic properties of wood and charcoal. *Revista árvore*, 38(2), 369–374.

7. ANEXOS

7.1. Procedimentos usados para quantificação dos minerais presentes nas cinzas

7.1.1. Determinação do Cálcio (Ca²⁺)

A concentração de cálcio nas cinzas da madeira e da casca foi determinada por titulação complexométrica com EDTA. Foram pipetados 10 ml da solução de cinza em um Erlenmeyer, adicionando-se 10 ml de NaOH (para precipitar o magnésio) e 80 ml de água destilada. Em seguida, adicionou-se o indicador calcon, que conferiu uma coloração rosa, e agitou-se a solução para facilitar a dissolução. Realizou-se a titulação com uma solução padrão de EDTA até a mudança de cor (de rosa para uma solução transparente), registrando-se o volume de EDTA utilizado. A concentração de cálcio foi calculada com base no volume de EDTA consumido, através da equação.

$$Ca^{2+} \left(\frac{meq}{100g} \right) = \frac{(A - B) \times t \times V \times 100 \times f}{(v \times p)} \quad (6)$$

Onde:

Ca²⁺ = Concentração de cálcio (meq/100g);

A = ml de EDTA gastos na titulação da amostra;

B = ml de EDTA gastos na titulação do ensaio em branco;

t = Normalidade de EDTA (N);

V = Volume inicial do extracto (ml);

f = Factor de humidade;

v = Volume pipetado do extracto (ml);

p = Peso da cinza (g).

7.1.2. Determinação do Magnésio (Mg²⁺)

Para o teor de magnésio, usou-se a diferença entre a titulação do cálcio isolado e a titulação conjunta de cálcio e magnésio. Pipetou-se 10 ml da solução de cinza, adicionando 10 ml de solução tampão (para manter cálcio e magnésio solúveis), 80 ml de água destilada e o indicador negro de ericromo T, que conferiu coloração rosa e roxa à solução. Agitou-se a mistura para dissolução e titulou-se com EDTA até a mudança de cor, indicando o ponto final da reacção (de rosa e roxo para azul). Registrou-se o volume de EDTA utilizado, que corresponde à soma

das concentrações de cálcio e magnésio. A diferença entre o volume total de EDTA usado na segunda titulação (cálcio + magnésio) e o da primeira titulação (apenas cálcio) corresponde ao EDTA gasto com o magnésio.

$$Ca^{2+} + Mg^{2+} \left(\frac{meq}{100g} \right) = \frac{(A - B) \times V \times 100 \times f}{(v \times p)} \quad (7)$$

$$Mg^{2+} \left(\frac{meq}{100g} \right) = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) - Ca^{2+} \quad (8)$$

Onde:

$Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (meq/100g) = Concentração de cálcio e magnésio;

Mg^{2+} (meq/100g) = Concentração de magnésio.

7.1.3. Determinação de sódio (Na^+) e potássio (K^+)

Para determinar sódio e potássio, utilizou-se o método de fotometria de chama. Adicionaram-se 10 ml da amostra de cinza diluída e filtrada em um frasco, e a solução foi introduzida no fotômetro de chama, que mediu a intensidade de luz emitida por sódio e potássio, proporcional à concentração de cada elemento na solução.

As concentrações de sódio e potássio foram determinadas através da equação:

$$Na^+ \text{ ou } K^+ \left(\frac{meq}{100g} \right) = \frac{c \times 5 \times f}{p} \quad (9)$$

Onde:

Na^+ ou K^+ = Concentração de sódio (Na^+) ou potássio (K^+);

c = Concentração de sódio (Na^+) ou potássio (K^+) emitido pelo fotômetro.

7.1.4. Determinação do fósforo (P)

Para preparar a solução, pipetou-se 10 ml da solução, adicionando-se 4 ml de ácido bórico, tartarato de potássio e antimônio, ácido sulfúrico, ácido ascórbico e molibdato de amônio, que conferiu coloração azul à solução. A intensidade da cor é proporcional à quantidade de fósforo presente na amostra. A solução colorida foi analisada no espectrofotômetro, e a absorbância foi lida no comprimento de onda específico para o azul de molibdênio.

A concentração de fósforo foi determinado através da equação:

$$P \left(\frac{meq}{100g} \right) = \frac{(a - b) \times 4.2}{W} \quad (10)$$

Onde:

P (meq/100g) = Concentração de fosforo;

a = Concentração de fosforo emitido pelo espectrofotômetro;

b = Concentração de fosforo medido no ensaio em branco;

W = peso da cinza (g).

7.2. Equipamentos utilizados no laboratório



Figura 14. Estufa de circulação forçada de ar utilizada para a secagem das amostras



Figura 15. Balanças analíticas utilizadas para a pesagem das amostras



Figura 16. Pilão e almofariz utilizadas para moer as amostras



Figura 17. Mesa vibratória acoplada a peneiras utilizada para a classificação granulométrica dos finos de carvão vegetal



Figura 18. Forno mufla utilizada para carbonização e análise química imediata das amostras

7.3. Influencia da velocidade de aquecimento e temperatura de carbonização nas propriedades energéticas do carvão vegetal e casca de *Vernonanthura phosphorica*

7.3.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

. testout rend veloc temp
Outlier Test for OLS (reg)

Obs = 75
k = 4
alpha = 0.050

-
- 1) Test fails to reject the null hypothesis of consistency. (p-value=0.73)
2) Test fails to reject the null hypothesis of root-n normality.(p-value=0.71)
-

```
. reg rend veloc temp
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	75
Model	627.923334	2	313.961667	F(2, 72)	=	148.01
Residual	152.729005	72	2.12123617	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.8044
				Adj R-squared	=	0.7989
Total	780.652338	74	10.5493559	Root MSE	=	1.4564

rend	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc	-.5184001	.2059726	-2.52	0.014	-.928999	-.1078011
temp	-.04048	.0023784	-17.02	0.000	-.0452212	-.0357388
_cons	53.64693	1.269701	42.25	0.000	51.11583	56.17804

```
. estat ovtest
```

Ramsey RESET test using powers of the fitted values of rend
 Ho: model has no omitted variables
 F(3, 69) = 2.45
 Prob > F = 0.0707

```
. estat hettest
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity
 Ho: Constant variance
 Variables: fitted values of rend

 chi2(1) = 6.04
 Prob > chi2 = 0.0140

```
. reg rend veloc temp, vce (robust)
```

Linear regression
 Number of obs = 75
 F(2, 72) = 135.58
 Prob > F = 0.0000
 R-squared = 0.8044
 Root MSE = 1.4564

rend	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc	-.5184001	.1942893	-2.67	0.009	-.9057087	-.1310914
temp	-.04048	.0024666	-16.41	0.000	-.0453971	-.0355629
_cons	53.64693	1.391683	38.55	0.000	50.87266	56.4212

```
. estat vif
```

Variable	VIF	1/VIF
temp	1.00	1.000000
veloc	1.00	1.000000
Mean VIF	1.00	

7.3.2. Rendimento gravimétrico da casca

```
. testout rend veloc temp
Outlier Test for OLS (reg)
Obs = 75
k = 4
alpha = 0.050
```

1) Test fails to reject the null hypothesis of consistency. (p-value=1.00)
 2) Test fails to reject the null hypothesis of root-n normality.(p-value=1.00)

. reg rend veloc temp

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	75
Model	1637.23593	2	818.617963	F(2, 72)	=	259.04
Residual	227.53405	72	3.16019514	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.8780
				Adj R-squared	=	0.8746
Total	1864.76998	74	25.1995943	Root MSE	=	1.7777

rend	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc	-1.2084	.2514039	-4.81	0.000	-1.709564	-.7072355
temp	-.0645853	.002903	-22.25	0.000	-.0703723	-.0587984
_cons	74.1084	1.549757	47.82	0.000	71.01901	77.19778

. estat ovtest

Ramsey RESET test using powers of the fitted values of rend

Ho: model has no omitted variables
 F(3, 69) = 5.95
 Prob > F = 0.0011

. estat hettest

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance
 Variables: fitted values of rend

chi2(1) = 5.12
 Prob > chi2 = 0.0237

. reg rend veloc temp, vce (robust)

Linear regression

Number of obs = 75
 F(2, 72) = 208.74
 Prob > F = 0.0000
 R-squared = 0.8780
 Root MSE = 1.7777

rend	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc	-1.2084	.2621593	-4.61	0.000	-1.731005	-.6857949
temp	-.0645853	.0033624	-19.21	0.000	-.0712881	-.0578826
_cons	74.1084	1.771654	41.83	0.000	70.57667	77.64013

. estat vif

Variable	VIF	1/VIF
temp	1.00	1.000000
veloc	1.00	1.000000
Mean VIF	1.00	

7.3.3. Parâmetros da análise química imediata do carvão vegetal lenho

. testout tmv tcz tcf veloc temp
 Outlier Test for OLS (reg)

Obs = 75
 k = 4
 alpha = 0.050

1) Test fails to reject the null hypothesis of consistency. (p-value=0.95)
 2) Test fails to reject the null hypothesis of root-n normality. (p-value=0.95)

```
. mvreg tmv tcz tcf= veloc temp
```

Equation	Obs	Parms	RMSE	"R-sq"	F	P
tmv	75	3	2.227047	0.9251	444.7913	0.0000
tcz	75	3	1.599836	0.6182	58.28677	0.0000
tcf	75	3	2.261132	0.9035	336.9809	0.0000

		Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
tmv	veloc	-.4562	.314952	-1.45	0.152	-1.084045 .1716454
	temp	-.1083413	.0036368	-29.79	0.000	-.1155911 -.1010916
	_cons	74.9252	1.941495	38.59	0.000	71.0549 78.7955
tcz	veloc	2.1014	.226251	9.29	0.000	1.650377 2.552423
	temp	.0143827	.0026125	5.51	0.000	.0091747 .0195906
	_cons	-7.452933	1.394705	-5.34	0.000	-10.23323 -4.672641
tcf	veloc	-1.6466	.3197723	-5.15	0.000	-2.284054 -1.009145
	temp	.0939533	.0036924	25.44	0.000	.0865926 .101314
	_cons	32.53413	1.971209	16.50	0.000	28.6046 36.46366

```
. estat vif
```

Variable	VIF	1/VIF
temp	1.00	1.000000
veloc	1.00	1.000000
Mean VIF	1.00	

Teor de materiais voláteis

```
. estat ovtest
```

```
Ramsey RESET test using powers of the fitted values of tmv
Ho: model has no omitted variables
F(3, 69) = 5.28
Prob > F = 0.0025
```

```
. estat hettest
```

```
Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity
Ho: Constant variance
Variables: fitted values of tmv

chi2(1) = 6.71
Prob > chi2 = 0.0096
```

```
. reg tmv veloc temp, vce (robust)
```

```
Linear regression                               Number of obs   =          75
                                                F(2, 72)       =        447.04
                                                Prob > F        =        0.0000
                                                R-squared      =        0.9251
                                                Root MSE     =        2.227
```

	tmv	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
veloc		-.4562	.3344719	-1.36	0.177	-1.122957 .2105575
temp		-.1083413	.0038357	-28.25	0.000	-.1159877 -.1006949
_cons		74.9252	1.947334	38.48	0.000	71.04326 78.80714

Teor de cinzas

```
. estat ovtest
```

```
Ramsey RESET test using powers of the fitted values of tcz  
Ho: model has no omitted variables  
F(3, 69) = 37.05  
Prob > F = 0.0000
```

```
. estat hettest
```

```
Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity  
Ho: Constant variance  
Variables: fitted values of tcz
```

```
chi2(1) = 8.26  
Prob > chi2 = 0.0041
```

```
. reg tcz veloc temp, vce (robust)
```

```
Linear regression          Number of obs   =       75  
                          F(2, 72)        =      60.23  
                          Prob > F          =     0.0000  
                          R-squared         =     0.6182  
                          Root MSE       =     1.5998
```

	tcz	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc		2.1014	.2028031	10.36	0.000	1.697119	2.505681
temp		.0143827	.0027356	5.26	0.000	.0089294	.0198359
_cons		-7.452933	1.420938	-5.25	0.000	-10.28552	-4.620346

Teor de carbono fixo

```
. estat ovtest
```

```
Ramsey RESET test using powers of the fitted values of tcf  
Ho: model has no omitted variables  
F(3, 69) = 0.77  
Prob > F = 0.5135
```

```
. estat hettest
```

```
Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity  
Ho: Constant variance  
Variables: fitted values of tcf
```

```
chi2(1) = 4.91  
Prob > chi2 = 0.0268
```

```
. reg tcf veloc temp, vce (robust)
```

```
Linear regression          Number of obs   =       75  
                          F(2, 72)        =     266.93  
                          Prob > F          =     0.0000  
                          R-squared         =     0.9035  
                          Root MSE       =     2.2611
```

	tcf	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc		-1.6466	.3432258	-4.80	0.000	-2.330808	-.9623917
temp		.0939533	.0041309	22.74	0.000	.0857186	.1021881
_cons		32.53413	2.216693	14.68	0.000	28.11523	36.95303

7.3.4. Parâmetros da análise química imediata do carvão vegetal da casca

```
. testout tmv tcz tcf veloc temp
Outlier Test for OLS (reg)
Obs = 75
k = 4
alpha = 0.050
```

```
1) Test fails to reject the null hypothesis of consistency. (p-value=0.93)
2) Test fails to reject the null hypothesis of root-n normality.(p-value=0.92)
```

```
. mvreg tmv tcz tcf= veloc temp
```

Equation	Obs	Parms	RMSE	"R-sq"	F	P
tmv	75	3	2.099967	0.9248	443.0349	0.0000
tcz	75	3	3.210053	0.1128	4.574938	0.0135
tcf	75	3	3.780695	0.7305	97.60322	0.0000

	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
tmv					
veloc	.4974	.2969802	1.67	0.098	-.0946193 1.089419
temp	-.101916	.0034292	-29.72	0.000	-.1087521 -.09508
_cons	70.85133	1.830709	38.70	0.000	67.20188 74.50079
tcz					
veloc	.0096001	.4539701	0.02	0.983	-.8953728 .914573
temp	.015856	.005242	3.02	0.003	.0054063 .0263057
_cons	3.269333	2.79846	1.17	0.247	-2.309294 8.847961
tcf					
veloc	-.5067996	.534671	-0.95	0.346	-1.572647 .5590476
temp	.08606	.0061738	13.94	0.000	.0737527 .0983673
_cons	25.8788	3.295934	7.85	0.000	19.30848 32.44912

```
. estat vif
```

Variable	VIF	1/VIF
temp	1.00	1.000000
veloc	1.00	1.000000
Mean VIF	1.00	

Teor de materiais voláteis

```
. estat ovtest
```

Ramsey RESET test using powers of the fitted values of tmv

```
Ho: model has no omitted variables
F(3, 69) = 10.09
Prob > F = 0.0000
```

```
. estat hettest
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

```
Ho: Constant variance
Variables: fitted values of tmv
```

```
chi2(1) = 2.61
Prob > chi2 = 0.1064
```

```
. reg tmv veloc temp, vce (robust)
```

```
Linear regression
Number of obs = 75
F(2, 72) = 420.71
Prob > F = 0.0000
R-squared = 0.9248
Root MSE = 2.1
```

tmv	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
veloc	.4974	.2983802	1.67	0.100	-.0974101 1.09221
temp	-.101916	.0035385	-28.80	0.000	-.1089699 -.0948621
_cons	70.85133	1.977908	35.82	0.000	66.90845 74.79422

Teor de cinzas

```
. estat ovtest

Ramsey RESET test using powers of the fitted values of tcz
Ho: model has no omitted variables
      F(3, 69) =      0.11
      Prob > F =      0.9531
```

```
. estat hettest

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity
Ho: Constant variance
Variables: fitted values of tcz

      chi2(1) =      4.20
      Prob > chi2 =    0.0404
```

```
. reg tcz veloc temp, vce (robust)

Linear regression                               Number of obs   =      75
                                                F(2, 72)       =      4.89
                                                Prob > F       =     0.0102
                                                R-squared     =     0.1128
                                                Root MSE     =     3.2101
```

tcz	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc	.0096001	.4509247	0.02	0.983	-.8893018	.908502
temp	.015856	.0051272	3.09	0.003	.0056352	.0260768
_cons	3.269333	2.734998	1.20	0.236	-2.182785	8.721452

Teor de carbono fixo

```
. estat ovtest

Ramsey RESET test using powers of the fitted values of tcf
Ho: model has no omitted variables
      F(3, 69) =      1.58
      Prob > F =     0.2025
```

```
. estat hettest

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity
Ho: Constant variance
Variables: fitted values of tcf

      chi2(1) =      3.07
      Prob > chi2 =    0.0798
```

```
. reg tcf veloc temp, vce (robust)

Linear regression                               Number of obs   =      75
                                                F(2, 72)       =     99.61
                                                Prob > F       =     0.0000
                                                R-squared     =     0.7305
                                                Root MSE     =     3.7807
```

tcf	Coef.	Robust Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
veloc	-.5067996	.54462	-0.93	0.355	-1.59248	.5788805
temp	.08606	.0062289	13.82	0.000	.073643	.098477
_cons	25.8788	3.326679	7.78	0.000	19.24719	32.51041