



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ANNA BEATRIZ BENCKE BRANDÃO

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ARMAZENAMENTO E DIÂMETRO DA
LENHA DE ALGAROBA EM SUAS CARACTERÍSTICAS
ENERGÉTICAS**

JOÃO PESSOA - PB
2023

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 101

ANNA BEATRIZ BENCKE BRANDÃO

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ARMAZENAMENTO E DIÂMETRO DA
LENHA DE ALGAROBA EM SUAS CARACTERÍSTICAS
ENERGÉTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Prof.^a [Monica Carvalho](#), PhD.

Co-orientadora

Prof.^a Dr.^a [Marta Célia Dantas Silva](#)

**JOÃO PESSOA - PB
2023**

ANNA BEATRIZ BENCKE BRANDÃO

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE ARMAZENAMENTO E DIÂMETRO DA
LENHA DE ALGAROPA EM SUAS CARACTERÍSTICAS
ENERGÉTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 30 de maio de 2023.

Banca examinadora:

Prof^a Dr^a. Marta Maria da Conceição - Departamento de Tecnologia de Alimentos (UFPB) – examinador externo

Prof^a Dr^a. Silvia Layara Florinani Andersen - Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB) – examinadora interna

Suplentes

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior - Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB) – suplente interno.

Prof^a Dr^a. Nataly Albuquerque dos Santos - Departamento de Engenharia Química (UFPB) – suplente externo

Orientadora

Prof.^a [Monica Carvalho](#), PhD.

Co-orientadora

Prof.^a Dr^a. [Marta Célia Dantas Silva](#)

**JOÃO PESSOA - PB
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B817i Brandão, Anna Beatriz Bencke.

Influência do tempo de armazenamento e diâmetro da lenha de Algaroba em suas características energéticas / Anna Beatriz Bencke Brandão. - João Pessoa, 2023.
121 f.

Orientação: Mônica Carvalho.

Coorientação: Marta Célia Dantas Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energias renováveis. 2. Prosopis juliflora. 3. Eficiência energética. 4. Secagem ao ar livre. 5. Biomassa. I. Carvalho, Mônica. II. Silva, Marta Célia Dantas. III. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)

DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos que acreditam na pesquisa como sendo um instrumento de avanço tecnológico para o bem da sociedade.

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu capacidade intelectual e física para realizar este trabalho. Deus reuniu todas as condições e me ligou as pessoas certas, no tempo certo, para que tudo acontecesse da "melhor maneira possível".

Agradeço aos meus amados filhos, em especial minha princesa Anna Luiza, que abriu mão inúmeras vezes da minha presença para que eu pudesse dedicar energia e tempo para a pesquisa.

Agradeço ao meu amado marido Jackson, que sempre me incentivou e acreditou no meu potencial. Contribui me apoiando e me cobrindo, quando não estava presente. Sem você meu amado, certamente seria muito mais difícil concluir.

Agradeço a minha querida Professora e orientadora Dr^a. Monica Carvalho, por tanta paciência nos momentos que errei. Agradeço por sua valiosíssima contribuição e orientação nesta jornada, toda sua dedicação e apoio foram fundamentais para o sucesso desta dissertação. Sou grata a todas as contribuições da Professora Dr^a. Marta Silva, que foi essencial na parte prática em laboratório. Serei eternamente grata por tudo.

Por fim, agradeço à CAPES, pelo apoio financeiro e a sociedade, que através dos impostos, proporcionam o acesso às Instituições de Ensino Superior de extrema qualidade.

RESUMO

O uso da biomassa florestal é uma alternativa sustentável para substituir fontes não renováveis de energia. A Algaroba, por suas excelentes propriedades energéticas e ótima adaptabilidade nos solos pouco férteis do semiárido nordestino, vem ganhando cada vez mais espaço no cenário energético. Esta pesquisa tem o objetivo geral de estudar parâmetros que possam interferir na eficiência energética da biomassa, contribuindo para a melhoria do processo de geração de vapor. O primeiro artigo foi realizado em uma indústria de papel que contemplou a influência do tempo de estocagem da Algaroba na eficiência de sua combustão; foram feitos 5 pátios de secagem com variação de 0 a 90 dias de estocagem. O segundo artigo foi realizado em dois estados diferentes do Nordeste e nas duas estações do ano, a fim de entender como funciona o comportamento de secagem ao ar livre e a influência da variação do microclima e as condições de chuvas e secas severas; 4 pátios de secagem foram preparados em cada condição, foi monitorado o teor de umidade ao decorrer de 90 dias em cada pátio, para determinação do comportamento de secagem. O terceiro artigo avalia a variação do diâmetro da lenha de Algaroba e sua influência nas propriedades energéticas, (poder calorífico, teor de cinzas, teor de voláteis e carbono fixo), foram coletadas amostras de 5, 25 e 45 cm de diâmetros para realizar as análises de PCS e análise química imediata. Ocorreu um aumento de 38% na eficiência energética durante a combustão da Algaroba na caldeira, ao armazenar a biomassa por 90 dias. Apontou variação na velocidade de secagem da Algaroba em função das estações do ano e do microclima local. O diâmetro apresentou pouca interferência na variação das propriedades energéticas da biomassa. Este estudo teve caráter precursor em investigar parâmetros que interferem na variação da eficiência energética da Algaroba e colaborou para a melhoria da eficiência energética da Algaroba e contribuiu para a utilização sustentável desta da biomassa.

Palavras-Chave: *Prosopis Juliflora*, Eficiência Energética, Secagem ao ar livre, Poder Calorífico, Biomassa.

ABSTRACT

The use of forest biomass is a sustainable alternative to replace non-renewable energy sources. Algaroba, due to its excellent energetic properties and great adaptability in the infertile soils of the northeastern semi-arid region, has been gaining more and more space in the energy scenario. However, it is a subject little explored by researchers and there are still doubts about the behavior of the species and its development for energy. This research has the general objective of studying parameters that may interfere with the energy efficiency of biomass, certainly for the improvement of the steam generation process. The first article was carried out in a paper industry that considered the influence of Algaroba storage time on the efficiency of its combustion; 5 drying patios were made with a variation of 0 to 90 days of storage. The second article was carried out in two different states in the Northeast and in the two seasons of the year, in order to understand how the behavior of drying in the open air works and the influence of the microclimate variation and the conditions of different rains and droughts; 4 drying yards were prepared in each condition, the moisture content was monitored over 90 days in each yard, for the main drying behavior. The third article evaluates the variation in the diameter of the Algaroba and its influence on the energetic properties, (heating power, ash content, volatile content and fixed carbon), samples of 5, 25 and 45 cm in diameter were collected to carry out the analyzes of PCS and immediate chemical analysis. A great contribution of firewood storage to the energy efficiency of combustion was evidenced. There was a variation in the drying speed of Algaroba depending on the seasons and the local microclimate. The diameter showed little interference in the variation of the energetic properties of the biomass. This study had a pioneering nature, helped to improve the energy efficiency of Algaroba and contributed to the sustainable use of this biomass.

Keywords: *Prosopis Juliflora*, Energy efficiency, Outdoor drying, Heating value, Biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo de manejo da Algaroba.....	26
Figura 2.2. Distribuição dos pátios de secagem.....	27
Figura 2.3. Caldeira de biomassa utilizada no experimento.....	28
Figura 2.4. Gráfico do aumento da eficiência do combustível.....	30
Figura 2.5. Ataque dos agentes xilófagos.....	31
Figura 3.1. Aspirações das pontuações.....	42
Figura 3.2. Pátios de secagem do experimento.....	44
Figura 3.3. Medidor de umidade portátil UmiLog M65.....	46
Figura 3.4. Medição da umidade da árvore antes do corte.....	47
Figura 3.5. Gráfico do comportamento de secagem das etapas do experimento... 	51
Figura 3.6. Teste de Normalidade de Anderson Darling.....	53
Figura 3.7 Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.....	54
Figura 3.8. Gráfico de resíduos de teor de umidade.....	55
Figura 4.1. Seleção das amostras por classe de diâmetro.....	69
Figura 4.2. Preparo das amostras para análise das propriedades energéticas.....	70
Figura 4.3. Gráfico do poder calorífico superior das misturas de diâmetros do experimento.....	74
Figura 4.4. Variação do PCS em função do diâmetro de diferentes espécies (tabela 4.3).....	76
Figura 4.5. Configurações de mistura com os maiores resultados de PCS.....	77
Figura 4.6. Configurações de mistura com os resultados mais baixos de PCS.....	79
Figura 4.7. Quantidade de cerne e alborno presente em cada amostra.....	82
Figura 4.8. Interação entre a análise química imediata de cada classe de diâmetro, com o PCS.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros dos pátios de estocagem.....	29
Tabela 2.2: Redução de exploração da biomassa de Algaroba.....	32
Tabela 2.3: Redução de custos financeiros em função do coeficiente específico de lenha.....	33
Tabela 3.1: Variáveis Meteorológicas.....	49
Tabela 3.2: Variação do teor de umidade no Conde e em Pendências, nas estações chuvosa e seca, para 0, 30, 60, e 90 dias de armazenamento.....	50
Tabela 3.3: Equações de Regressão Linear.....	53
Tabela 4.1: Planejamento do experimento fatorial - Arranjo de Mistura PCS.....	71
Tabela 4.2: Dados de poder calorífico superior (PCS) do experimento de mistura...	73
Tabela 4.3: Estudos que avaliam o comportamento da variação do PCS em função do diâmetro.....	75
Tabela 4.4: Resultado da análise química imediata para as classes de diâmetros....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1: Estudos realizados com Algaroba.....	20
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Am - Clima de Monção

As - Clima Tropical com Estação Seca

B - Clima Seco

BSh - Clima

Semiárido CF –

Carbono Fixo CV –

Teor de Voláteis

CO₂ - Dióxido de Carbono Equivalente

Cwa - Clima Subtropical Úmido com Invernos Secos

Cwb - Clima Oceânico Variante Subtropical de Altitude

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

GEE - Gases do Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

M_U - Massa úmida

M_s - Massa seca

N – Coeficiente específico de lenha

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

PCU – Poder calorífico útil

Qtde. – Quantidade

T_v - Toneladas de vapor

T_L - Toneladas de lenha.

T.U. – Teor de Umidade

T.U.BU– Teor de Umidade base úmida

T.U.BS – Teor de Umidade base seca

η - Eficiência

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1. Cenário energético Nordeste	15
4.2. Principais propriedades energéticas	16
4.3. A Algaroba (<i>Prosopis Juliflora</i>)	17
4.4. Fontes de biomassa: estudos energéticos.	18
CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM DA ALGAROBA	21
RESUMO	21
1. INTRODUÇÃO	22
2. MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1. Caracterização da biomassa e dos pátios de secagem do estudo	24
2.2. Avaliação dos parâmetros de eficiência energética.	26
2.3. Determinação da economia de recursos naturais e financeiros.	28
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1. Dados obtidos após combustão.	28
3.2. Economia de recursos naturais e financeiros.	31
4. CONCLUSÕES	33
5. AGRADECIMENTOS	33
REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO 3 ARTIGO 2: INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES DO ANO NA CURVA DE SECAGEM DA ALGAROBA	39
1. INTRODUÇÃO	40
2. MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1. Local de armazenamento e dados meteorológicos	42
2.2. Caracterização das amostras e dos pátios de secagem	43

2.3. Monitoramento da variação da umidade	44
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
3.1. Dados meteorológicos	47
3.2. Análise do monitoramento da umidade	49
3.3. Análise estatística dos dados - Influência da estação, período de armazenamento, e do microclima na variação do teor de umidade.	51
4. CONCLUSÕES	56
5. AGRADECIMENTOS	57
REFERÊNCIAS	58
CAPÍTULO 4 - ARTIGO 3: INTERFERÊNCIA DO DIÂMETRO NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA ESPÉCIE <i>PROSOPIS JULIFLORA</i>	65
1. INTRODUÇÃO	66
2. MATERIAL E MÉTODOS	67
2.1. Caracterização e preparação da biomassa.	68
2.2. Determinação do poder calorífico superior (PCS)	69
2.3. Análise química imediata	71
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
3.1. Poder calorífico superior (PCS)	72
3.2. Análise química imediata	79
4. CONCLUSÃO	84
5. AGRADECIMENTOS	85
REFERÊNCIAS	86
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO	97

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

1. INTRODUÇÃO

A iminência de um colapso climático tem atraído a atenção de diversos pesquisadores em todo o mundo e o foco passa a ser produzir com zero emissões de carbono, ou o mínimo possível (HABIBA; XINBANG; ANWAR, 2022). Nos últimos 10 anos as alterações climáticas têm surgido como um problema muito perigoso, com consequências de extinção futura da vida na terra (PARAMATI; SHAHZAD; DOĞAN, 2022). Como a demanda por energia só aumenta, é preciso que a ciência promova soluções sustentáveis que unam o desenvolvimento tecnológico, juntamente com a conservação dos recursos naturais e redução de gases de efeito estufa (GHAZOUANI et al., 2020).

A biomassa é uma alternativa para a produção de energia limpa (ELOY; SILVA; CARON, 2022). No Nordeste brasileiro, há uma espécie de crescimento acelerado que possui excelentes propriedades energéticas, conhecida como Algaroba (*Prosopis Juliflora*). Esta espécie possui a capacidade de crescer rapidamente nos solos pouco férteis e com baixo índice de pluviosidade do semiárido Nordestino (CARNEIRO et al., 2021).

A inclusão socioeconômica que o comércio da Algaroba promove é outro fator de extrema relevância, pois essa região tem um elevado índice de pobreza (MELO, 2022). O trabalho com a biomassa florestal tem dado uma alternativa de fonte de renda para diversas famílias da caatinga. A Algaroba, vem promovendo o sustento e a inclusão social, gerando renda e trabalho para milhares de pessoas que vivem nessas regiões com condições geológicas desfavoráveis para o cultivo agrícola ou criação de animais.

Diversas indústrias instaladas na Paraíba e em Pernambuco têm substituído o gás natural por biomassa para geração de vapor (DIAS, 2022). Essa substituição tem aumentado expressivamente a demanda por biomassa de Algaroba, que é a espécie regional em abundância e favorável para fins energéticos (BURNETT, 2018).

Outros autores já avaliaram características energéticas para potencializar a eficiência da biomassa no processo de geração de vapor de espécies como Pinus

(GUEDES et al., 2020) e Eucalipto (MONTEIRO et al., 2022). No entanto há uma lacuna quando se trata da Algaroba, existem apenas trabalhos que caracterizam seu potencial energético (BHATIA; ADHOLEYA; SHARMA, 1998; CIRILO et al., 2021; FONSECA et al., 2020). Existem estudos que avaliam o potencial energético e caracterizam a Algaroba como fonte de energia renovável. No entanto, este estudo é o pioneiro em investigar variáveis que potencializam e melhoram a eficiência da combustão da Algaroba. Como o rendimento da lenha na caldeira de biomassa em escala industrial, em função do tempo de armazenamento ao ar livre. O estudo do comportamento de secagem da espécie e a interferência do diâmetro da lenha de Algaroba nas propriedades energéticas.

Diante de vários benefícios que a utilização da Algaroba como fonte de biomassa para geração de energia proporciona, é relevante quantificar e evidenciar suas características energéticas. Aumentar a eficiência da sua utilização também é importante, pois auxiliará no uso sustentável da biomassa florestal.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar as variáveis que promovem o aumento do rendimento no processo de geração de vapor a partir da Algaroba. Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Avaliar a evolução da eficiência energética da Algaroba em relação ao tempo de estocagem ao ar livre e entender como ocorre o aumento do conteúdo energético da biomassa em função dos dias de estocagem.
- Determinar a influência das estações seca e chuvosa no teor de umidade da Algaroba e gerar as curvas de secagem da biomassa durante esses períodos.
- Estabelecer a interferência do diâmetro da Algaroba em suas principais propriedades energéticas (poder calorífico, teor de cinzas, teor de voláteis e percentual de carbono fixo).

3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O modelo de dissertação apresentado é o de um compêndio de artigos e está

organizado de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 1 é apresentada uma introdução geral do tema, os objetivos gerais e específicos, a estrutura da dissertação e a fundamentação teórica necessária para os conteúdos gerais apresentados neste trabalho.

No capítulo 2 o artigo “Avaliação da Eficiência Energética em função do tempo de Estocagem da lenha da Algaroba”, contempla um estudo de caso realizado na indústria Conpel, no município do Conde PB, onde foi realizada uma avaliação do comportamento da biomassa. Algaroba durante o processo de geração de vapor. Este artigo foi apresentado no XIII CBPE Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, que ocorreu no período de 24 a 26 de agosto de 2022.

No capítulo 3 o artigo “Variação do teor de umidade em função do tempo de armazenamento da lenha de Algaroba, em diferentes estações do ano” apresenta a variação das curvas de secagem durante a estação seca e a estação chuvosa, ao longo de três meses de estocagem da biomassa de Algaroba em pátios de secagem ao ar livre.

No capítulo 4 o artigo “Determinação da interferência do diâmetro nas propriedades energéticas da lenha de Algaroba” aprofunda o estudo da interferência da variação do diâmetro das toras de Algaroba no poder calorífico, teor de voláteis e teor de cinzas. Estas são algumas propriedades que podem influenciar na qualidade da biomassa para fins energéticos.

As conclusões gerais são apresentadas no capítulo 5, em seguida, e por fim estão relacionadas todas as referências citadas ao longo da dissertação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Cenário energético Nordeste

O crescente aumento da demanda energética tem gerado impactos ambientais, além da necessidade de deixar o processo de geração de energia mais eficiente por questões econômicas atrelada a redução de custos para as indústrias (NEDEL et al.,

2018). De acordo com a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2017), para responder à demanda energética por meio da biomassa até 2030 será necessário duplicar a oferta das fontes legais visando atender a necessidade do mercado.

Muitos processos industriais requerem altas demandas de vapor, como é o caso da indústria de papel e celulose (CHEN et al., 2021). Para atender a essa demanda de vapor de maneira sustentável há a necessidade de um planejamento do uso da biomassa florestal (FREITAS, 2019). Para suprir a demanda de vapor há diversas possibilidades e a contratação de gás natural via concessionária local é uma maneira usada por algumas indústrias; no entanto, tem o custo mais elevado e produz gases de efeito estufa (MA et al., 2019). Uma alternativa sustentável para gerar vapor é a utilização de biomassa, em especial a biomassa florestal que pode gerar créditos de carbono durante o seu ciclo de crescimento (YAHYA; NG; ANDIAPPAN, 2021).

Diversos estudos contemplam medidas que promovem a melhor eficiência dos recursos para fins energéticos (CRUZ et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2018; VAN DEN OEVER et al., 2022). A caracterização adequada das propriedades energéticas da espécie a ser utilizada como biomassa é fundamental para a tomada de decisões corretas para o processo em questão a fim de obter um processo mais eficiente e promover uma melhor utilização dos recursos naturais (ANERUD et al., 2018; PINHEIRO et al., 2019).

4.2. Principais propriedades energéticas

Uma biomassa para ser considerada adequada para fins energéticos precisa ter propriedades energéticas favoráveis, como alto teor de carbono fixo e lignina, baixo teor de cinzas, alto percentual de material volátil, alto poder calorífico (ELOY; SILVA; CARON, 2022). Essas são as principais características que qualificam uma biomassa como "boa para energia".

Carbono fixo é a massa restante após a retirada da umidade, cinzas e matérias voláteis (MCKENDRY, 2002). É responsável pelo tempo que a lenha permanece em combustão, geralmente, quanto maior for o percentual de carbono fixo, maior é o poder

calorífico disponível na biomassa (BRITO; BARRICHELO, 1977; MANZONE, 2018).

Percentual de cinzas é todo o material inorgânico presente na biomassa, ou seja, tudo que não entra em combustão (CACURO; WALDMAN, 2015). Quanto maior for o percentual de cinzas contida em uma biomassa, pior será sua performance na caldeira, pois gerará maior percentual de resíduos, reduzindo a eficiência energética e demandando paradas mais frequentes para a limpeza da caldeira (RIBEIRO, 2012).

Poder calorífico pode ser expresso em J/g para uma unidade de massa de combustível e é determinado por meio da quantidade de energia liberada na forma de calor durante o processo de combustão (QUIRINO et al., 2005). O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor liberada na combustão considerando a água de formação e água da umidade do combustível no estado líquido. O poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor liberada sem considerar a evaporação de água de formação do combustível mais a quantidade de água da umidade do combustível (FERREIRA et al., 2014). Já o poder calorífico útil (PCU) desconta a quantidade de calor usada para evaporar a água de formação e a umidade do combustível, sendo a quantidade útil de calor liberado. Quanto maior for o poder calorífico maior será o potencial energético do combustível, o poder calorífico útil é inversamente proporcional ao teor de umidade no momento da queima (QUIRINO et al., 2005).

O teor de umidade (TU) pode ser expresso em base úmida, (TU_{BU} , equação 1) ou base seca (TU_{BS} , equação 2) e representa o percentual de água contida na biomassa (ZEN et al., 2019).

$$TU_{BU} = \frac{M_{H_2O}}{M_U} \quad (1)$$

M_{H_2O} é a massa de água (massa úmida - massa seca em estufa até peso constante), e M_U é a massa úmida (antes de ir para estufa). M_s é a massa seca (em estufa até peso constante).

$$TU_{BS} = \frac{M_{H_2O}}{M_S} \quad (2)$$

O teor de umidade influencia diretamente na eficiência energética durante a combustão. Alguns autores sugerem que a biomassa deve estar com pelo menos 60% de teor de umidade na base seca, para que a biomassa entre em combustão completa (BRAND; GIESEL, 2017; FURTADO et al., 2012; LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008). Quando a biomassa possui a umidade acima de 60%, despende alta quantidade de energia para evaporar a água contida em seu interior, prejudicando as trocas térmicas e reduzindo a eficiência do processo de geração de vapor.

4.3. A Algaroba (*Prosopis Juliflora*)

Conhecida no Brasil como Algaroba, a espécie *Prosopis Juliflora* é nativa do México, teve grande abrangência no continente africano, e foi disseminada pelos europeus em solos degradados, nos últimos 200 anos (CIRILO et al., 2021). A Algaroba foi introduzida no Brasil em 1942 em Pernambuco, no município de Serra Talhada e é considerada uma espécie invasora, pois ao entrar em um bioma, ameaça a existência das espécies nativas (MUKHERJEE; VELANKAR; KUMARA, 2017; RIBASKI et al., 2009).

O percentual de carbono fixo e o poder calorífico da Algaroba são promissores para geração energia (CAVALCANTI et al., 2020). Possui baixo teor de umidade inicial, devido a sua alta densidade, confirmando ser uma excelente opção de fonte de biomassa para energia (CHEN et al., 2012; HAVILAH; SHARMA; GOPINATH, 2019). Estudos apontam a espécie como uma ótima alternativa para suprir a demanda de biomassa florestal para fins energéticos na região Nordeste do Brasil (CARNEIRO-JUNIOR et al., 2021; FONSECA et al., 2020).

As características anatômicas da Algaroba, como espinhos e o seu tronco sinuoso, dificultam a extração mecânica. Esse fato acarreta um elevado índice de

inclusão social no semiárido e na caatinga. O manejo da Algaroba envolve centenas de trabalhadores locais. O comércio desta biomassa, movimenta a economia dessas regiões que possuem um alto nível de pobreza e poucas alternativas de sustentabilidade econômica (BURNETT, 2018).

A Algaroba ainda é considerada uma espécie invasora, é vista como uma praga indesejável em várias regiões ao redor do mundo (ABDULAHY; UTE; REGASA, 2017; MOHANRAJ; PRASATH; RAJASEKARAN, 2022; NASCIMENTO et al., 2020). Mas suas características de rápido crescimento em solos pouco férteis e com baixo índice de pluviosidade, tornam a Algaroba uma ótima alternativa de fonte biomassa para energia (BANDARA et al., 2022).

4.4. Fontes de biomassa: estudos energéticos.

O desenvolvimento sustentável e o uso eficiente de fontes de energias renováveis são uma premissa para atingir as metas de redução de emissões de CO₂. Em especial, a biomassa proveniente da Algaroba tem sido foco de estudos, pois essa espécie além de ser abundante no semiárido Nordeste se desenvolve em solos pouco férteis, despertando relevância mundial em sua utilização. Nos últimos 10 anos foram realizadas 2526 pesquisas com a Algaroba, e entre 2018 a 2023 foram realizados 1048 estudos (Web of Science). O Quadro 1.1 mostra estudos anteriores realizados com a Algaroba.

Quadro 1.1 - Estudos realizados com Algaroba.

Autor	Local	Pesquisa	Resultado	Conclusão
Cavalcanti 2020	João Pessoa, Brasil. Brazilian Journal of Development	Propriedades energéticas de briquetes de podas urbanas de Algaroba	CZ=8,8% MV=73,9% CF=17,4% PCS =18,9MJ.kg ⁻¹	Propriedades energéticas favoráveis

Freitas 2019	João Pessoa, Brasil. Dissertação	Questões econômicas e ambientais da produção de lenha na Paraíba	Redução de 75% de produção de lenha nos últimos 25 anos	Necessidade de planejamento para utilizar a lenha
Pereira; Lima 2002	Petrolina, Brasil. Dissertação	Caracterização de 6 espécies de Algarobeira para energia	Carvão de P. Juliflora CZ=1,2% MV=22,1% CF=77,6% PCS = 30,5 MJ.kg ⁻¹	<i>Prosopis Juliflora</i> e a <i>Prosopis Pallida</i> , obtiveram melhores características energéticas
Natarajan; Suriapparao; Vinu, 2018	India. Fuel Processing Technology	Análise da torrefação de biochar de Algaroba	Diferentes valores das propriedades energéticas para tamanhos diferentes de partículas.	A torrefação de partículas maior na forma de pellets e briquetes tem uma interação complexa
Carneiro et al., 2021	Bahia, Brasil. Energies	Valorização da biomassa de <i>Prosopis juliflora</i> através da torrefação seca.	O maior poder calorífico superior variou entre 18,3 e 23,1 MJ/kg	A torrefação da Algaroba é uma alternativa competitiva para energia de biomassa no Nordeste do Brasil
Sahoo et al., 2021	India. Bioresource Technology	Uma avaliação detalhada da cinética de pirólise de biomassas lignocelulósicas invasivas <i>Prosopis juliflora</i>	PCS 18,92 MJ/kg	Os resultados dos parâmetros termodinâmicos confirmam a adequação <i>Prosopis Juliflora</i> como potencial para o processo de pirólise.
Bezared Ie; Tadesse; Tadesse, 2023	Etiópia . Heliyon	Efeitos de <i>Prosopis juliflora</i> na diversidade de plantas em pastagens no distrito de Shilabo, estado regional da Somália, Etiópia	44 espécies diferentes de Algaroba	Proliferação rápida das áreas invadidas ataca o bioma local.
Ku; Popescu, 2019	Texas, USA. Biomass and Bioenergy	Comparação de vários métodos para mapear a biomassa acima do solo de árvores de algaroba em escala local com dados remoto	O método de florestas aleatórias teve MSE e R2 aceitáveis (1,08 Mg ha ⁻¹ e 0,37).	O método de florestas aleatórias com imagens multiespectrais foi o melhor para mapear Algaroba
Bandara et al., 2022	Sri Lanka Trees Forests and People	Plantas invasoras na produção de energia de biomassa: um estudo de caso <i>Prosopis juliflora</i> em zonas úmidas costeiras do Sri Lanka	Os resultados mostram que 1 kg de P. juliflora produziria uma energia de 0,5 L de diesel e óleo de fôrnelha e 5 kWh de eletricidade	Ótima para energia aprofundar o estudo sobre a colheita da P. juliflora como uma fonte potencial de energia de biomassa

Kumar; Chandrashekar, 2020	India, Journal of the Indian Academy of Wood Science	Produção e caracterização de briquetes de Algaroba	Teor de cinzas 0,7%, carbono fixo 11,4% material volátil 86% e PCS 19,6 MJ/kg	Propriedades energéticas favoráveis para utilização da biomassa para energia.
----------------------------------	---	--	--	--

Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

Hofmann et al. (2018) na Alemanha, avaliou o comportamento de secagem do Pinus em diferentes estações do ano. O autor destaca a relevância da interferência do clima e condições de armazenamento, na velocidade de secagem. Atribuindo esses fatores a alta variação de dados entre os estudos, levando a resultados e conclusões diferentes. Existe uma lacuna na literatura que este estudo visa preencher, ainda não existem estudos direcionados ao comportamento de secagem da Algaroba nas estações seca e chuvosa. Essa pesquisa é pioneira na caracterização do comportamento de secagem da biomassa Algaroba nas estações de clima tropical, na região Nordeste do Brasil.

Existem estudos que validam as características promissoras da Algaroba para fins energéticos ((CAVALCANTE et al., 2021; PEREIRA; LIMA, 2002). No Sri Lanka, Bandara et al. (2022) realizou pela primeira vez a avaliação da variação das propriedades energéticas em função do diâmetro da espécie *Prosopis Juliflora*. Como a madeira é um ser vivo e as condições de solo e clima interferem na sua constituição química, as quais alteram comportamento de secagem e propriedades energéticas, é relevante estudos direcionados para diferentes configurações. Ainda não existem estudos em território brasileiro, e esta pesquisa visa preencher essa lacuna e contribuir para o avanço da compreensão da interferência da variação do diâmetro. É importante salientar que a Algaroba possui grande variação de diâmetro ao longo de sua extensão, essa variação implica em quantidades distintas de cerne e alburno na sua constituição.

CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ESTOCAGEM DA LENHA DE ALGAROBA

Anna Beatriz Bencke Brandão¹, Marta Célia Dantas², Monica Carvalho²

¹ Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

² Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

RESUMO

A substituição de combustíveis fósseis por uma fonte de energia renovável no processo de geração de vapor é um cenário cada vez mais comum no Nordeste brasileiro. A espécie Algaroba, que há pouco tempo era considerada uma praga invasora, tornou-se a protagonista dessa mudança. Aspectos que contribuíram para o aumento da procura da Algaroba como fonte de biomassa para geração de energia são suas excelentes propriedades energéticas. No entanto, ainda há muito desperdício e ineficiência em sua utilização. Este estudo visa contribuir para melhorar o processo de geração de vapor, avaliando a influência do tempo de estocagem da lenha de Algaroba na eficiência energética de uma caldeira aquatubular. Foram estudados 5 pátios de secagem com tempos de estocagem de lenha distintos e avaliada a eficiência do combustível em função da quantidade de vapor gerada durante a combustão na caldeira. O pátio com maior tempo de secagem obteve o maior coeficiente de vapor específico, ou seja, maior rendimento e eficiência na caldeira. O rendimento foi diretamente proporcional ao tempo de secagem da lenha no pátio. Ficou comprovada a importância do controle e logística com a biomassa que chega na fábrica, gerando um ganho de 61% de eficiência no processo, quando a biomassa é estocada por um período de 90 dias.

Palavras-chave: Energia renovável. Tempo de secagem. Consumo específico de lenha. Algaroba. Biomassa.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do custo do gás natural de 123% no intervalo de junho de 2019 à junho de 2022 (FIDELIS, 2021), atrelado às preocupações com as mudanças climáticas, contribuem para a substituição de fontes provenientes do petróleo por fontes de energia limpa (EPE, 2021; PERERA et al., 2020). O relatório mais recente do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (ARAUJO et al., 2018) informa que o consumo de energia tem contribuído com 32,7% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), que podem levar a um aumento de 4,8°C na temperatura do planeta nos próximos 100 anos, causando danos irreversíveis ao ecossistema (IPCC, 2022).

As condições climáticas do Nordeste brasileiro não são favoráveis para o cultivo de espécies como Pinus e Eucalipto, muito utilizadas para energia na região sul e sudeste do Brasil (MOREIRA et al., 2021; PACHECO, 2022). O uso da lenha de *Prosopis Juliflora*, conhecida como Algaroba, surge como uma alternativa de fonte renovável de energia para geração de vapor, pois possui resistência à seca e boa adaptação às condições adversas (MOHANRAJ; PRASATH; RAJASEKARAN, 2022; NASCIMENTO et al., 2020).

Pertence à família Leguminosae (*Mimosoideae*) e é uma espécie tradicionalmente usada para fins madeireiros e forrageiros (RIBASKI et al., 2009). A Algaroba é bastante utilizada para fins energéticos em indústrias cerâmicas (CARVALHO; SILVA, 2018). A utilização da Algaroba para energia, tem contribuído para o desenvolvimento socioeconômico do semiárido nordestino, uma região que possui um elevado índice de pobreza e difíceis condições de cultivos agrícolas (MOURA; SOUSA, 2020; SAMPAIO; MARIA DO SOCORRO; SAMPAIO, 2008).

A inserção da comercialização da Algaroba como fonte de biomassa tem dado oportunidade de empregos e desenvolvimento social (CIRILO et al., 2021). Toda a cadeia produtiva é realizada de maneira manual, devido a características fisiológicas da espécie, já que seu tronco sinuoso e irregular dificulta a mecanização da extração. Isso proporciona emprego a milhares de moradores da caatinga e semiárido nordestino

(BURNETT, 2018). O aumento da demanda da Algaroba tem acarretado uma redução de sua disponibilidade, por esse motivo é relevante estudos que visam melhorar a eficiência da utilização desta biomassa (FREITAS, 2019).

No que se refere à utilização de biomassa para geração de vapor, o teor de umidade interfere diretamente no poder calorífico útil (PCU) do combustível. Parte da energia que seria direcionada para o processo de geração de vapor é despendida para evaporar a água contida na biomassa, reduzindo assim a eficiência do combustível (KLAVINA; SELEGOVSKIS, 2021; ZANUNCIO et al., 2014). Portanto, quanto menor for o teor de umidade da biomassa, maior será o PCU. Por esse motivo é comum manter pátios de armazenamento de biomassa para diminuir o teor de umidade (BRAND; GIESEL, 2017). A estocagem ao ar livre de toras para energia é eficaz, aumentando a eficiência energética no processo de combustão (BURATTI et al., 2019; RAITILA; TSUPARI, 2020).

Estudos anteriores já validaram a Algaroba como uma espécie promissora para fins energéticos (CARNEIRO-JUNIOR et al., 2021; FONSECA et al., 2020; PEREIRA; LIMA, 2002). Outros trabalhos avaliaram a melhoria da eficiência da biomassa em decorrência do tempo de estocagem das espécies de Pinus (CARVALHO et al., 2020; GUEDES et al., 2020; HERNANDEZ VELASCO; MATTSSON, 2020), Eucalipto (ABREU NETO et al., 2021; MONTEIRO et al., 2022; STRANDGARD et al., 2021), Bracatinga (KLITZKE, 1998), Bambo (CHEN et al., 2021).

Apesar de vários estudos sobre a interferência da estocagem na eficiência energética da biomassa disponíveis na literatura, há elevada variação de dados, resultados e conclusões entre os estudos realizados. É importante destacar a relevância da interferência do clima e condições de armazenamento na velocidade de secagem, pois seria uma possível explicação para essas variações (HOFMANN et al., 2018). Existe, portanto, uma lacuna na literatura científica que esta pesquisa visa preencher, já que ainda não existem estudos direcionados ao comportamento de combustão da Algaroba para intervalos diferentes de estocagem. Essa pesquisa é pioneira na caracterização do comportamento da eficiência da biomassa Algaroba para uma variação de dias de armazenagem, na região Nordeste do Brasil. Sendo relevante, pois a Algaroba é uma

alternativa disponível na região do semiárido brasileiro. Tendo potencial de gerar vapor para as indústrias localizadas na região, sendo uma alternativa renovável e limpa de geração de energia.

Reconhecendo a importância do armazenamento e secagem da biomassa para geração de energia, o objetivo deste estudo é investigar a interferência do tempo de estocagem ao ar livre da lenha de Algaroba na eficiência do processo de geração de vapor em uma caldeira de biomassa à lenha do modelo aquatubular. Este estudo é o primeiro a analisar o tempo de estocagem da espécie Algaroba, espécie que possui pequena exigência em água e comprovada capacidade de se desenvolver em solos de baixa fertilidade. A contribuição desse estudo é melhorar a compreensão do aumento do conteúdo energético em função do tempo de armazenamento da algaroba ao ar livre, em escala industrial. Para auxiliar na utilização racional dos recursos naturais, promovendo maior eficiência no processo de geração de energia proveniente da lenha de Algaroba e contribuindo para a conservação da biomassa e sua utilização sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado na Conpel (Companhia Nordestina de Papel), localizada no Município do Conde, na Paraíba. A indústria fabrica papel reciclado e está presente no mercado desde 1971. No ano de 2019 foi instalada uma caldeira aquatubular de biomassa à lenha, para alimentar a demanda de vapor de aproximadamente 200 t/dia em seu processo industrial. Este foi um estudo de caso realizado em escala industrial, sendo utilizados parâmetros de consumo real da empresa.

2.1. Caracterização da biomassa e dos pátios de secagem do estudo.

A biomassa que compôs esta pesquisa é da espécie Algaroba, possui uma variação de diâmetro de 5 cm a 50 cm. O comprimento das toras da lenha varia entre 1 m a 1,30 m. As amostras do experimento são provenientes de várias regiões, localizadas

no interior de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

A lenha é transportada dos locais de extração até a indústria, por caminhões que carregam em média 20 t por viagem. Todo o ciclo de manejo e extração da biomassa é realizado manualmente. O tempo aproximado do corte da árvore até a biomassa chegar ao destino final é de 7 dias. Diariamente chegam 80 t de lenha de Algaroba através de vários pequenos fornecedores (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Ciclo de manejo da Algaroba.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

O estudo foi realizado no município do Conde, localizado no estado da Paraíba, com coordenadas geográficas de latitude: -7.26069, longitude: -34.9083 7° 15' 38 ' Sul, 34° 54' 30 ' Oeste . Altitude de 128m e clima de Monção (Classificação climática de Köppen-Geiger: Am). A pesquisa ocorreu no período de junho a setembro de 2021. O período de chuvas na região do Conde ocorre entre março a julho, e o período de seca entre agosto a fevereiro, a umidade relativa do ar média durante o período do experimento foi de 81%, temperatura média de 24.3 °C, pluviosidade média de 97 mm e média de horas de sol de 6,1 diariamente (CLIMATE-DATA, 2021).

Como este estudo teve o objetivo de avaliar os parâmetros em escala de consumo real, foi necessária a criação de uma metodologia que permitisse o controle exato do volume de lenha armazenado em cada pátio de secagem e o controle do tempo que a biomassa permaneceu estocada, antes de ser inserida na caldeira para combustão. Por este motivo, a lenha que compôs esse experimento, foi organizada e empilhada em 5 pátios dimensionados para seu armazenamento. Cada pátio de estocagem foi identificado por cores, com o objetivo de controlar a logística de entrada de 80 t de lenha por dia e manter o controle do local de armazenamento das amostras (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Distribuição dos pátios de secagem.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

As pilhas de lenha contidas em cada um dos pátios, foram feitas com espaçamento de 60 cm, para ocorrer a circulação do ar e promover a secagem das amostras (ZANUNCIO et al., 2014). A altura das pilhas atingiram 3m e o comprimento variava de acordo com o espaço disponível em cada pátio.

Com o intuito de minimizar a interferência de dias de armazenamento da lenha na floresta, para definir o coeficiente específico de lenha para o tempo 0 dias de

estocagem. Foi selecionada uma carga que não excedeu o tempo de 15 dias para chegar na indústria. Para esta carga foi atribuída a nomenclatura “pátio branco”. Esta seleção é importante, pois no manejo de lenha da Algaroba, existem cargas que são cortadas e ficam até 30 dias na floresta, antes de serem enviadas para indústria (DIAS, 2021).

2.2. Avaliação dos parâmetros de eficiência energética.

Para avaliar a variação do rendimento da biomassa em função do tempo de estocagem, foi utilizada a caldeira de geração de vapor da indústria. A biomassa foi inserida para combustão na caldeira aquatubular (Figura 2.3), fabricada por Dedine em 1979. Esta caldeira trabalha com vapor saturado a pressão de 13,5 kg/cm², com capacidade de 15 t de vapor/hora.

Figura 2.3 - Caldeira de biomassa utilizada no experimento.



Fonte: Autoras, 2022.

Para o cálculo do coeficiente específico de lenha de cada pátio, foi inserido na caldeira o volume de lenha armazenado em cada pátio de secagem. Por meio do medidor de vazão de vapor verificou-se a quantidade de vapor gerada no intervalo de tempo durante o qual a lenha estava sendo queimada. A Equação 2.1 determina o coeficiente específico de lenha (N).

$$N = \frac{T_V}{T_L} \quad (2.1)$$

T_V é a quantidade de vapor produzida pela caldeira (t) e T_L é a quantidade de lenha inserida na caldeira (t). Os valores de T_V e T_L são levantados na mesma janela de tempo.

Para determinação do coeficiente específico de lenha do pátio branco foi inserida uma carga recém-chegada na fábrica, diretamente na caldeira de geração de vapor, seguindo o mesmo procedimento para determinação do coeficiente específico de lenha.

2.1. Determinação da economia de recursos naturais e financeiros.

Para determinar a economia de recursos naturais gerada com o armazenamento da lenha foi utilizado o coeficiente específico (N) para avaliar como seria o consumo nas diferentes condições de armazenamento. Considerando que cada hectare de terra pode produzir até 27 toneladas de Algaroba, (ZAKIA et al., 1991), esta análise adotou esse valor máximo (melhor rendimento de madeira por hectare). A análise foi realizada para um horizonte temporal de 3 anos, sendo o tempo necessário para o ciclo de crescimento da Algaroba para fins energéticos (LIMA, 2006).

Para mensurar a economia de recursos financeiros que a indústria obtém com o armazenamento da biomassa, utilizou-se a tarifa paga pela empresa por tonelada de lenha de Algaroba, R \$340/t. A análise ocorreu para todas as condições de estocagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dados obtidos após combustão.

Após a lenha estocada em cada pátio ser inserida na caldeira de biomassa para combustão, foi mensurada a eficiência em cada um dos arranjos. Foi apurado o tempo de armazenamento em dias para cada pátio de lenha, a massa correspondente de lenha em cada pátio, a quantidade de vapor gerada durante a combustão de cada pátio e o coeficiente específico de lenha (N) para cada condição de armazenamento da biomassa (Tabela 2.1).

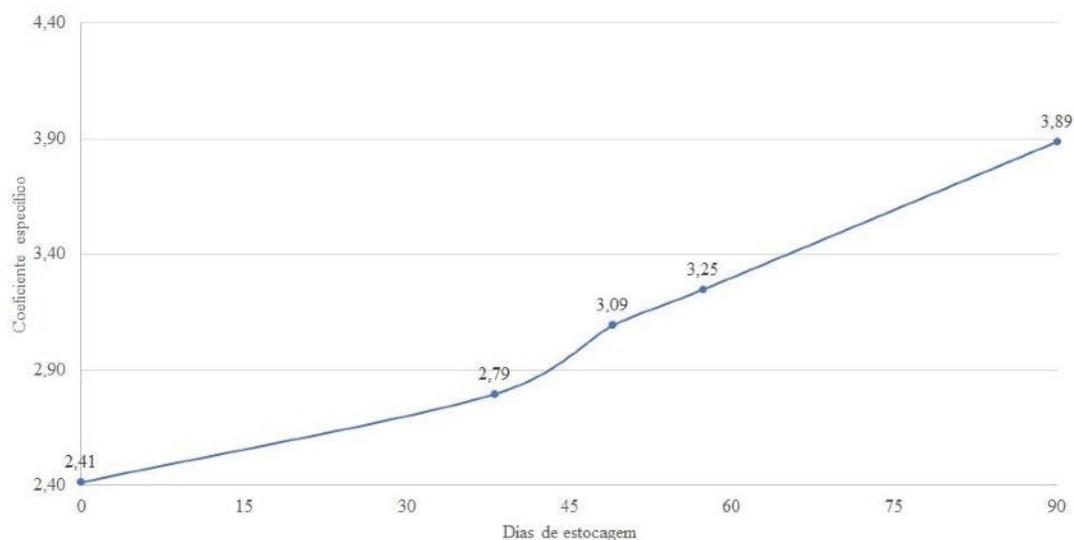
Tabela 2.1 - Parâmetros dos pátios de estocagem.

Pátio	Dias de Esticagem	Lenha (t)	Vapor (t)	N
Branco	0	27	65	2,41
Cinza	38	581	1624	2,80
Verde	49	487	1506	3,09
Azul	57	235	763	3,25
Rosa	90	23	90	3,89

Fonte: dados das autoras, 2022.

A Figura 2.4. demonstra a variação da eficiência energética da biomassa em função dos dias de armazenagem no pátio de secagem. Foi evidenciado um aumento expressivo da eficiência da biomassa, com o passar dos dias que permanece armazenada.

Figura 2.4. Gráfico do aumento da eficiência do combustível.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

Nos primeiros 38 dias de estocagem, o aumento da eficiência energética do combustível é pequena, apenas 16%, em comparação ao pátio branco (sem estocar). A partir de 40 dias é perceptível a mudança expressiva na inclinação da reta, aumentando a eficiência energética da lenha em 35% para 60 dias de estocagem. Sturion e Tomaselli, (1990) estudaram a espécie Bracatinga e encontraram um comportamento de eficiência muito similar, com aumento expressivo de eficiência após 30 dias de estocagem. Um dos fatores que pode explicar essa semelhança é o fato das espécies serem parecidas anatomicamente.

Zen et al. (2019) em seu estudo com a espécie de Eucalipto, encontrou valores que divergem dos resultados apontados neste trabalho. O aumento da eficiência em relação ao tempo de estocagem ocorreu de maneira uniforme, não tendo uma variação expressiva próxima de 30 dias.

Resende et al. (2018) abordou a influência das características anatômicas de cada espécie, no comportamento e na velocidade de secagem da madeira. A densidade básica do Eucalipto é em torno de 450 kg/m³ e teor de umidade inicial 110% na base seca. A Algaroba, no entanto, tem densidade básica em torno de 980 kg/m³ e umidade inicial 61% na base seca. Estas propriedades podem ter influenciado na variação dos resultados encontrados, o Eucalipto com linearidade na secagem e a Algaroba com

variação na inclinação da reta. A espécie de Pinus abordada no estudo de Tomczak e Jelonek (2020) atingiu um comportamento semelhante ao encontrado nas espécies de Eucalipto, ambas obtiveram uma curva de secagem linear e constante, provavelmente a semelhança anatômica das espécies influenciou nesse resultado.

Foi comprovada a interferência positiva do tempo de estocagem na eficiência energética do combustível. Neste estudo foi observado que quanto maior for o período estocado, maior será a eficiência energética da biomassa. Isso ocorre porque a lenha armazenada ao ar livre perde umidade, e quanto menor sua umidade no momento da combustão, maior será seu poder calorífico.

Um fato importante observado durante o período de armazenamento da lenha foi a perda de massa que iniciou com cerca de 45 dias de estocagem. Na Figura 2.5. é possível observar o ataque de agentes xilófagos na lenha. Esse fato deve ser levado em consideração para dimensionar o tempo ideal de estocagem do material.

Figura 2.5 - Ataque dos agentes xilófagos.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

Portanto a variável perda de massa também deve ser levada em consideração para entender e definir um tempo ótimo de secagem, visando a melhor eficiência do processo. Considerando que espécies da caatinga foram avaliadas quanto ao ataque de agentes xilófagos em 3 meses foram observadas perdas de massa inferiores a 10%

(CARLOS; DIODATO; CASTRO, 2021).

3.2. Economia de recursos naturais e financeiros.

Com o aumento da eficiência do combustível foi possível mensurar o ganho com a conservação dos recursos naturais. Ocorreu a conservação dos recursos naturais em função do armazenamento de Algaroba (Tabela 2.3), antes de sua combustão em caldeira.

Tabela 2.3 - Redução de exploração da biomassa de Algaroba.

N	2,41	2,80	3,09	3,25	3,89
Lenha (t) mensal*	2.697	2.322	2.104	2.000	1.671
Custo anual (R\$)	32.365	27.857	25.243	24.000	20.051
Custo 3 anos (R\$)	97.095	83.571	75.728	72.000	60.154
Redução Custo (%)	3.596	3.095	2.805	2.667	2.228
Redução Custo (R\$)	0%	-14%	-22%	-26%	-38%

Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

*demanda 6500 t vapor. ** 27 t de lenha/hectare

Para gerar a demanda mensal de vapor da empresa (6500 t), ao atingir um N = 3,89 com o armazenamento da lenha, é possível economizar 1368 hectares de Algaroba no ciclo de crescimento (3596 – 2228, referentes a N = 2,41 e N = 3,89).

Portanto, ao armazenar a lenha por um período de 90 dias, ocorre uma conservação de 38% de hectares de Algaroba durante o ciclo de 3 anos de crescimento. Além da redução na extração de lenha, que contribui para o uso sustentável dos recursos naturais, ocorre a redução dos custos com a geração de vapor por meio de biomassa. A Tabela 2.4 apresenta a relação do custo da lenha para gerar a mesma quantidade de vapor (6500 t/mês) em função do N.

Tabela 2.4 - Redução de custos financeiros em função do coeficiente específico de lenha

N	2,41	2,80	3,09	3,25	3,89
Custo mensal (R\$)	943.983	812.500	736.246	700.000	584.833
Custo anual (R\$)	11.327.801	9.750.000	8.834.951	8.400.000	7.017.995
Custo 3 anos (R\$)	33.983.402	29.250.000	26.504.854	25.200.000	21.053.985
Redução Custo (%)	0%	-14%	-22%	-26%	-38%
Redução Custo (R\$)		-4.733.402	-7.478.548	-8.783.402	-12.929.418

Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

Para gerar a demanda mensal de vapor da empresa (6500 t), ao atingir um N = 3,89 com o armazenamento da lenha, é possível economizar 1368 hectares de Algaroba no ciclo de crescimento (3596 – 2228, referentes a N = 2,41 e N = 3,89). Portanto, ao armazenar a lenha por um período de 90 dias, ocorre uma conservação de 38% de hectares de Algaroba durante o ciclo de 3 anos de crescimento.

Para um tempo de secagem de 90 dias ocorreu uma redução de 38% do consumo de biomassa necessária para gerar o vapor do processo produtivo na indústria. Isso acarreta uma economia de recursos financeiros expressiva, considerando uma geração de vapor de cerca de 6.500 toneladas por mês, totalizando R\$ 359.150,00.

Esta redução de custo financeiro com a utilização mais eficiente da biomassa fomenta a utilização de caldeiras a biomassa. Considerando que ao armazenar a lenha por 90 dias, durante um ano, obtém-se uma economia anual de recursos financeiros de R\$ 4.309.806 e ao longo de três anos, totaliza cerca de 13 milhões de reais.

Neste estudo de caso foi evidenciado que o tempo de estocagem da lenha nos pátios aumenta a eficiência da Algaroba no processo de combustão. Reduzindo assim a quantidade de biomassa necessária para gerar o vapor demandado pelo processo produtivo da indústria, além de contribuir para a conservação dos recursos naturais.

4. CONCLUSÕES

Armazenar a lenha de Algaroba é uma maneira de aumentar a eficiência energética no processo de combustão em caldeira de biomassa. Ao estocar a lenha, ocorre um aumento expressivo na eficiência energética do processo de geração de vapor. O melhor cenário ficou compreendido em 90 dias de armazenamento. A partir de 45 dias de estocagem da lenha de Algaroba ao ar livre, foi possível dobrar a eficiência de combustão da biomassa.

Apesar de ser observado o ataque de agentes xilófagos a partir de 45 dias de estocagem, o tempo de 90 dias ainda é vantajoso. Mesmo com a perda de massa observada nas pilhas de secagem, houve um aumento do rendimento da lenha na caldeira.

Para atender a demanda mensal de vapor da indústria, o tempo de armazenamento de 90 dias foi o mais vantajoso para melhor sustentabilidade da lenha de Algaroba. Neste intervalo de armazenamento, obteve-se a melhor economia de recursos naturais e financeiros.

Ficou evidenciado que o tempo de estocagem da lenha nos pátios aumenta a eficiência da Algaroba no processo de combustão. Reduzindo a quantidade de biomassa necessária para gerar o vapor demandado pelo processo produtivo da indústria e contribuindo para a conservação dos recursos naturais.

Uma sugestão para trabalhos futuros é avaliar a influência da perda de massa ao longo do período de estocagem. Avaliar se ocorre alguma influência das diferentes estações na eficiência do período de estocagem.

5. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a empresa CONPEL por permitir o estudo em seu processo industrial. Agradecemos por disponibilizar os equipamentos, mão de obra, espaço físico e equipe interna. Os quais foram fundamentais para o sucesso da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABREU NETO, R. D.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M. A technical note on the effect of log length on the drying of *Eucalyptus urophylla*. **Australian Forestry**, 84, n. 4, p. 175-181, 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/00049158.2021.1975907>.
- ARAÚJO, Y. R. V.; DE GÓIS, M. L.; JUNIOR, L. M. C.; CARVALHO, M. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. **Environmental Science and Pollution Research**, 25, n. 2, p. 1863-1868, 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0613-y>.
- BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Energia na Agricultura**, 32, n. 2, p. 132-140, 2017. DOI:<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n2p132-140>.
- BURATTI, C. *et al.* Impact of storage on energy performance of lario pine wood chips: A case study in Italy. **Industrial Crops and Products**, 131, p. 301-306, May 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.066>.
- BURNETT, A. DESENVOLVIMENTO REGIONAL: O CASO DA TECNOLOGIA DA ALGAROBA NO SEMIÁRIDO. **Revista Ambivalências**, 6, n. 11, p. 268-291, 2018. DOI:<https://doi.org/10.21665/2318-3888.v6n11p268-291>.
- CARLOS, L. K. C.; DIODATO, M. A.; CASTRO, V. G. Durabilidade natural de cinco espécies madeireiras da Caatinga em ensaio de deterioração em campo aberto e natural. **Advances in Forestry Science**, 8, n. 3, p. 1527-1534, 2021. DOI:<https://doi.org/10.34062/afs.v8i3.12631>.
- CARNEIRO-JUNIOR, J. A. D. M. *et al.* Valorization of *prosopis juliflora* woody biomass in northeast brazilian through dry torrefaction. **Energies**, 14, n. 12, p. 3465, 2021. DOI:<https://doi.org/10.3390/en14123465>.
- CARVALHO, D. E.; SCHROEDER, F.; FRANÇA, R. F.; SIVA, D. D. A. Qualidade energética de cavacos de *Pinus* spp. em diferentes condições de armazenamento. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, 35, n. 2, p. 236-245, 2020. DOI:<https://doi.org/10.17224/>

EnergAgric.2020v35n2p236-245.

CARVALHO, M.; DA SILVA, J. A. M. Second law assessment of a Hoffmann kiln for the red ceramics industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 40, n. 11, 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1444-6>.

CHEN, D. *et al.* Insight into a new phenolic-leaching pretreatment on bamboo pyrolysis: Release characteristics of pyrolytic volatiles, upgradation of three phase products, migration of elements, and energy yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 136, p. 110444, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110444>.

CIRILO, N. R. M. *et al.* Caracterização da madeira de *Prosopis juliflora* utilizada na indústria de cerâmica vermelha no semi-árido brasileiro. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, 16, n. 4, p. 178-182, 2021. DOI:<https://doi.org/10.30969/acsa.v16i4.1303>.

CLIMATE-DATA. Clima: Conde. Elaborado por AM ONLINE PROJECTS - ALEXANDER MERKEL 2021.

DIAS, J. E. **Entrevista**. 04/06/2022 2021.

EPE, E. D. P. E.-. Mudanças climáticas e Transição energética. ABCDEnergia. 2021.

FIDELIS, M. A. B. Modelo de mercado brasileiro de gás natural: gradações de poder de mercado no lado da oferta. 2021. - Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/31496>.

FONSECA, C. M. B. D. *et al.* Potencial energético do carvão do *Ziziphus joazeiro* (Martius) e da *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. **Ciência Florestal**, 30, p. 613-619, 2020. DOI:<https://doi.org/10.5902/198050985070>.

FREITAS, G. P. D. **Avaliação regional da exploração de lenha e seu uso na indústria de cerâmica vermelha na Paraíba**. 2019. -, Uiversiade Federal da Paraíba Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18915>.

GUEDES, T. O.; SILVA, J. R. M. D.; HEIN, P. R. G.; FERREIRA, S. C. Cutting energy required during the mechanical processing of wood species at different drying stages. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 22, n. 4, p. 477-482, 2020. DOI:<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000406>.

HERNANDEZ VELASCO, M.; MATTSSON, A. Light shock stress after outdoor

sunlight exposure in seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. And *Pinus sylvestris* L. pre-cultivated under LEDs—possible mitigation treatments and their energy consumption. **Forests**, 11, n. 3, p. 354, 2020. DOI:<https://doi.org/10.3390/f11030354>.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

KLAVINA, A.; SELEGOVSKIS, R., 2021, Influence of wood chip quality on boiler house efficiency. Latvia University of Life Sciences and Technologies.

KLITZKE, R. J. **Avaliação do carvão da bracatinga (*Mimosa scabrella bentham*) em função da idade, do teor de umidade da madeira e da temperatura final de carbonização. 1998, 137 p.** 1998. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)—Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1998

LIMA, P. C. F. Manejo de áreas individuais de algaroba: plano de manejo. **Embrapa Semiárido-Outras publicações científicas (ALICE)**, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 292p.

MOHANRAJ, R.; PRASATH, R. V. A.; RAJASEKARAN, A. Assessment of vegetation, soil nutrient dynamics and heavy metals in the *Prosopis juliflora* invaded lands at semi-arid regions of Southern India. **Catena**, 216, p. 11, Sep 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106374>.

MONTEIRO, T. C. *et al.* Drying kinetics in *Eucalyptus urophylla* wood: analysis of anisotropy and region of the stem. **Drying Technology**, 40, n. 10, p. 2046-2057, 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1918145>.

MOREIRA, J.; MORALES, M.; MICHETTI, M.; BUSCHINELLI, C. D. A. Viabilidade econômica do modal de sistema de produção de eucalipto para energia, na região médio-norte de Mato Grosso. **Embrapa Florestas-Documents (INFOTECA-E)**, 2021.

MOURA, J. E. A.; DE SOUSA, E. P. Análise multidimensional do desenvolvimento rural nos municípios cearenses e pernambucanos. **Geosul**, 35, n. 76, p. 706-730, 2020. DOI:<https://doi.org/10.5007/2177-5230.2020v35n76p706>.

NASCIMENTO, C. E. D. *et al.* Seed germination and early seedling survival of the invasive species *Prosopis juliflora* (Fabaceae) depend on habitat and seed dispersal mode in the Caatinga dry forest. **Peerj**, 8, p. 25, Sep 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.7717/peerj.9607>.

PACHECO, J. M. **Aproveitamento de resíduos de colheita florestal para cogeração de energia em uma empresa localizada no estado do Paraná**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

PEREIRA, J. C. D.; LIMA, P. C. F. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. 2002. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/152661>

PERERA, A.; NIK, V. M.; CHEN, D.; SCARTEZZINI, J.-L.; HONG, T. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. **Nature Energy**, 5, n. 2, p. 150-159, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>.

RAITILA, J.; TSUPARI, E. Feasibility of solar-enhanced drying of woody biomass. **BioEnergy research**, 13, n. 1, p. 210-221, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1007/s12155-019-10048-z>.

RESENDE, R. T. *et al.* Air-drying of eucalypts logs: genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, 124, p. 316-324, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.002>.

RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R. D.; NASCIMENTO, C. D. S. Algaroba (*Prosopis juliflora*): árvore de uso múltiplo para a região semiárida brasileira. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2009.

SAMPAIO, E. V.; MARIA DO SOCORRO, B. A.; SAMPAIO, Y. S. Propensão à desertificação no semi-árido brasileiro. **Revista de Geografia (Recife)**, 22, n. 2, p. 59-76, 2008.

STRANDGARD, M.; ACUNA, M.; TURNER, P.; MIROWSKI, L. Use of modelling to compare the impact of roadside drying of *Pinus radiata* D. Don logs and logging residues on delivered costs using high capacity trucks in Australia. **Biomass and Bioenergy**, 147, p. 106000, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106000>.

STURION, J. A.; TOMASELLI, I. Influência do tempo de estocagem de lenha de bracinga na produção de energia. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado**

(ALICE), 1990.

TOMCZAK, K.; TOMCZAK, A.; JELONEK, T. Effect of Natural Drying Methods on Moisture Content and Mass Change of Scots Pine Roundwood. **Forests**, 11, n. 6, p. 668, 2020. DOI:<https://doi.org/10.3390/f11060668>.

ZAKIA, M.; PAREYN, F.; BURKART, R.; ISAIA, E. **Incremento médio anual de algarobais no Seridó-RN**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Natal (Brail), 1991. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF19950037695>

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, F. S. Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, 21, p. 401-408, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.028713>.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 7, n. 2, p. 291-298, 2019. DOI:<https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n2.zen>.

CAPÍTULO 3 ARTIGO 2: INFLUÊNCIA DAS ESTAÇÕES DO ANO NA CURVA DE SECAGEM DA LENHA DE ALGAROBA

**Anna Beatriz Bencke Brandão¹, Marta Célia Dantas², Rogério Santana Peruchi³,
Monica Carvalho²**

¹ Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

² Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

³ Departamento de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

RESUMO

A umidade é uma das variáveis condicionantes no processo de geração de vapor em caldeiras de biomassa. No entanto, elevados custos financeiros e limitação de espaço para armazenamento da biomassa são fatores limitantes para a existência e manutenção de pátios de secagem. O clima na região Nordeste do Brasil é tropical, caracterizado pela estação seca e chuvosa. Como a maioria dos processos de secagem ocorrem ao ar livre, é importante identificar a influência das estações e determinar o tempo ideal de estocagem da biomassa. O objetivo deste estudo é mensurar a influência dos períodos de chuva e de seca no processo de secagem ao ar livre da lenha da espécie *Prosopis Juliflora*, conhecida como Algaroba. Foram selecionadas duas localidades no Nordeste, com a finalidade de avaliar o efeito de micro climas diferentes no processo de secagem nas diferentes estações. Pátios de secagem foram montados por três meses, nas duas estações do ano, simultaneamente em ambas localidades. Os resultados evidenciaram que durante a estação chuvosa houve umidade inicial maior (40%) e uma taxa de secagem mais lenta. Já a estação de seca foi caracterizada por umidade inicial menor (35%) da Algaroba, com taxa de secagem mais rápida. Foi identificado a necessidade de tempos diferentes de secagem para obter a umidade ideal, nas estações avaliadas nesta pesquisa.

Palavras-chave: Biomassa, Curva de Secagem, Secagem ao ar Livre, Eficiência Energética, *Prosopis Juliflora*.

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética aumenta a cada ano e o apelo ambiental cresce de maneira simultânea. Diante deste cenário, a utilização de recursos renováveis de energia ganha espaço no cenário energético mundial (ROQUETTE, 2018). A biomassa florestal é uma fonte de energia renovável com potencial para diminuir o consumo de combustíveis fósseis e emissões de gases de efeito estufa (ACUNA et al., 2019). Com o aumento da demanda por biomassa para geração de energia, a otimização do processo como um todo passa a ser uma premissa para garantir a sustentabilidade (DONG et al., 2022; PARAMATI; SHAHZAD; DOGAN, 2022; SHARMA et al., 2021). Gerar a mesma quantidade de energia com menor quantidade de biomassa é um desafio, com esforços de pesquisa direcionados para este foco.

A *Prosopis Juliflora* (Algaroba) é uma espécie nativa do México, utilizada inicialmente para conservação de solo, possuindo rápido crescimento e características energéticas favoráveis (ABDULAHY; UTE; REGASA, 2017; BANDARA et al., 2022). A Algaroba ganhou espaço como fonte de energia de biomassa no nordeste brasileiro, e vem sendo utilizada por indústrias para geração de energia térmica em caldeiras de biomassa (BURNETT, 2018; CIRILO et al., 2021).

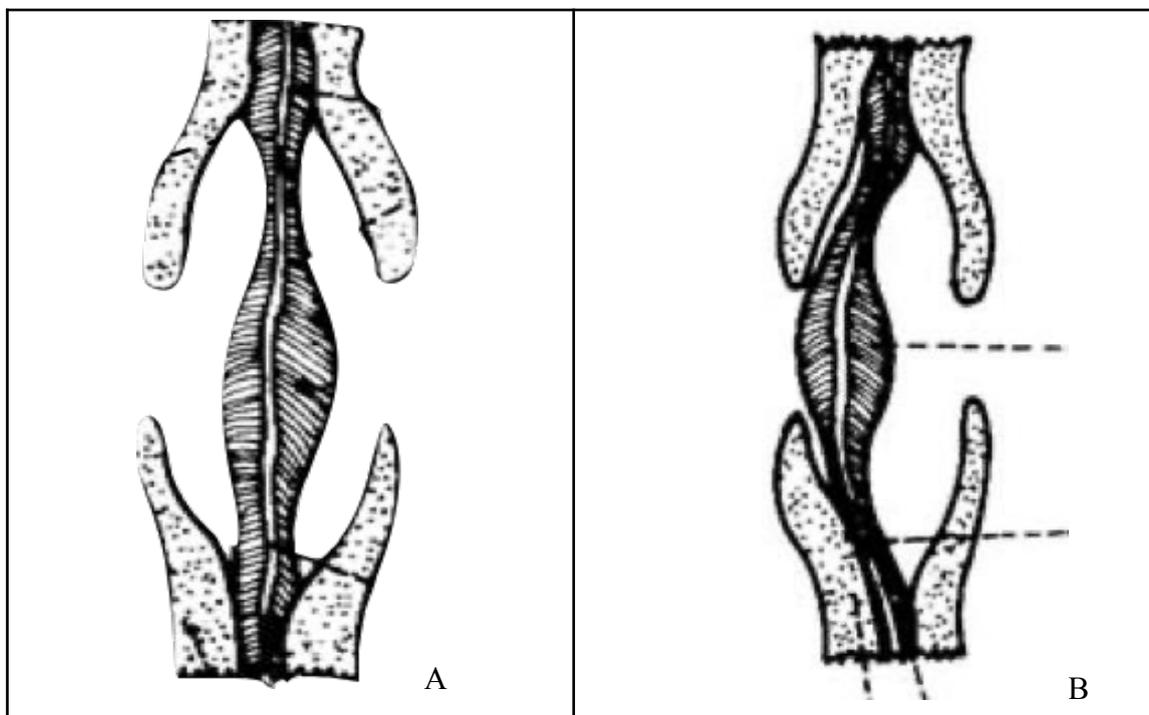
O teor de umidade possui grande influência no processo de geração de vapor: quanto menor a umidade da biomassa, maior é a eficiência do combustível na cadeia (EUFRADE-JUNIOR, 2019; EUFRADE-JUNIOR et al., 2021; RESENDE et al., 2018). O processo de secagem ao ar livre contribui para a redução do teor de umidade das toras, aumentando o poder calorífico útil do combustível e propiciando um maior rendimento na caldeira de biomassa (SANTOS et al., 2022; ZANUNCIO et al., 2014).

A madeira é anisotrópica e essa propriedade, juntamente com a anatomia do material, contribuem para que sua secagem não ocorra de maneira gradativa (DACKERMANN et al., 2016). Existem três tipos de água no interior da madeira: a água livre, a água de adesão, e a água de constituição. A água livre presente no lúmen das células começa a sair logo após o corte da árvore, saindo de maneira mais fácil por evaporação (PENVERN et al., 2020). A água de adesão, ou água do ponto de saturação

das fibras (PSF), está presente na parede celular e sai pelo processo de difusão, simultaneamente com a água livre. Diferente da água livre, a água do PSF necessita de uma condição mais agressiva para que a secagem ocorra mais rapidamente (HILL; ALTGEN; RAUTKARI, 2021; SANTOS et al., 2022; SILVA et al., 2018). A saída da água de constituição ocorre abaixo do ponto de equilíbrio, sendo atingida apenas em estufas de secagem artificial (THERASME; EISENBIES; VOLK, 2019; ZEN et al., 2019).

Propriedades anatômicas da madeira influenciam no processo de secagem, sem as pontuações, o movimento da água na árvore não seria possível. As pontuações são aberturas na parede celular, entre células vizinhas (Sjostron, 2013). Quando o processo de secagem ocorre abruptamente, pode ocorrer a aspiração das pontuações, que consiste no deslocamento da pontuação, reduzindo a permeabilidade da madeira em até 10 vezes (Silva, 2007). Na Figura 3.1 é possível observar este fenômeno.

Figura 3.1 - Fenômeno de aspiração das pontuações. Figura A, pontuação no seu estado normal. Figura B, pontuação aspirada, bloqueando a passagem de líquidos.



Fonte: Silva, 2007 (adaptado).

As condições climáticas influenciam diretamente no processo de secagem da

madeira ao ar livre, e temperaturas elevadas contribuem para a saída rápida da água livre (COCUSSE et al., 2022; KILIÇ AK et al., 2021). Como a água do PSF permanece saindo até que atinja a umidade de equilíbrio com o ambiente, quanto mais baixa for a umidade relativa do ar, menor será a umidade atingida com a secagem ao ar livre (BERGMAN, 2021; KLEMENT et al., 2019).

A velocidade do vento também interfere diretamente no processo de secagem, e quando a velocidade do vento que incide sobre a madeira é mais elevada, a taxa de secagem do material aumenta (GROSSE et al., 2008; LUHR et al., 2021). Quanto mais baixa for a umidade relativa do ar, mais alta a temperatura ambiente e a velocidade do vento, mais elevada será a taxa de secagem (KLEMENT et al., 2020). Sabe-se que diferenças anatômicas intrínsecas a diferentes espécies florestais interferem diretamente no comportamento de secagem (BRAND; GIESEL, 2017; MANZONE, 2018), e não foram encontrados estudos sobre a Algaroba.

Este estudo é o primeiro a ser realizado com a Algaroba, e tem como objetivo avaliar a influência das estações do ano e do microclima no processo de secagem da madeira ao ar livre na região Nordeste do Brasil, para determinar o tempo e o local ideal de estocagem da madeira em cada estação. Para tanto, duas localidades foram selecionadas: Pendências-RN e Conde-PB. Este estudo visa contribuir para o entendimento do comportamento de secagem da Algaroba e assim tornar seu uso mais sustentável para energia de biomassa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de armazenamento e dados meteorológicos

Este estudo de armazenamento foi realizado em duas localidades do Nordeste do Brasil, a primeira fica no Município de Pendências no Rio Grande do Norte, com latitude: 5° 15' 36" Sul e longitude: 36° 43' 20" Oeste. O clima da localidade é estepe local, classificação do clima BSh segundo Köppen e Geiger. A temperatura média é 25,7 °C com pluviosidade média anual 619 mm. Desta localidade originaram-se as amostras de Algaroba.

A segunda localidade está situada no estado da Paraíba, no município do Conde (latitude 7° 15' 38" Sul e longitude 34° 54' 30" Oeste). Durante o inverno a pluviosidade é mais intensa que no verão. A classificação do clima é Aw segundo Köppen e Geiger, clima de monção tropical. Possui temperatura média anual de 25.6 °C e pluviosidade média anual de 914 mm.

Para determinar o período de secas e o período chuvoso em ambas as regiões, foi realizada uma pesquisa dos dados de 2012 a 2022 (CLIMATE-DATA, 2022). Foi determinado o intervalo que caracteriza ambas as estações, levando em consideração a variável precipitação e atribuiu-se o intervalo de 3 meses para cada uma das estações. A estação chuvosa ficou compreendida entre 10/02/22 a 20/05/22, e a estação seca de 01/10/22 a 02/02/23. Para levantamento da temperatura média, precipitação acumulada, velocidade do vento e umidade relativa do ar foi realizada pesquisa no banco de dados meteorológicos de cada período do experimento (INMET, 2022).

2.2. Caracterização das amostras e dos pátios de secagem.

As amostras foram extraídas de uma floresta energética, localizada no município de Pendências-RN. Todas as amostras são da espécie *Prosopis Juliflora*, e possuem variação de diâmetro de 10 cm a 15 cm e foram cortadas com 1,20 m de comprimento.

Para o experimento foi confeccionado um pátio de secagem para cada localidade (Pendências, e Conde), durante estação seca e chuvosa (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Pátios de secagem do experimento. Foto superior: pátio no Conde PB. Foto inferior: pátio em Pendências RN.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

Cada pátio de secagem foi composto por 4 pilhas de lenha de Algaroba, com 1 m de altura e 2 m de comprimento. Entre cada uma das quatro pilhas, existiu um espaçamento de 60 cm para promover a circulação de ar entre as pilhas, a fim de manter uma taxa de secagem homogênea (EUFRADE-JUNIOR et al., 2021; LIMA et al., 2021).

2.3. Monitoramento da variação da umidade

Para aferir e monitorar a variação da umidade da lenha de Algaroba foi utilizado o equipamento portátil UmiLog M65, da Marrari Automação Industrial (AIELLO et al., 2020). Esse equipamento é específico para medição de toras de madeira e foi calibrado pela empresa Marrari, a fim de ter uma precisão de (+-5%). O equipamento funciona

pelo método dielétrico de princípio capacitivo, onde o sensor na ponta da haste do medidor transmite informações a respeito da umidade quando entra em contato com o cerne da lenha. O método dielétrico consiste no efeito da água sobre as características dielétricas da madeira (PALMA; STEIGER, 2020). Uma das vantagens sobre o método gravimétrico é a medição rápida e segura, pois trabalha com baixa potência (KING, 2000).

A metodologia seguiu o indicado pelo manual do fabricante do UmiLog M65: foram realizados três furos com furadeira, de 14 mm de diâmetro e 5 cm de profundidade em cada amostra (NASCIMENTO, 2022). Após a realização dos furos, o equipamento UmiLog M65 foi inserido com movimento de giro de 180 graus por 10 segundos. A medida da umidade em base úmida é dada no display após o sinal sonoro (Figura 3.3).

Figura 3.3. Medidor de umidade portátil UmiLog M65.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

Com o intuito de obter a umidade da árvore de Algaroba ainda em pé, foram realizadas medições do teor de umidade na árvore antes do corte. Para tanto, foi selecionada uma amostragem aleatória de uma parte da floresta energética, foram marcados os indivíduos com tinta spray, e após a aferição do teor de umidade com o equipamento UmiLog M65, foram cortados para comporem o experimento (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Medição da umidade da árvore antes do corte.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

A mesma metodologia foi adotada em ambas as estações do ano, seguindo rigorosamente o procedimento para ambas localidades que compuseram o experimento.

2.4. Análise estatística

Para análise estatística dos dados utilizou-se o software Minitab® Statistical Software (MINITAB, 2023). Os dados foram submetidos primeiramente ao teste de normalidade de Anderson Darling, o qual teve o objetivo de determinar se ocorreu alguma não normalidade nas caudas da distribuição. Este teste faz uma avaliação da normalidade, calculando a correlação dos dados e as contagens normais dos dados (SULEWSKI, 2019).

Com o resultado do teste de normalidade de Anderson Darling gerando uma distribuição gaussiana, foi possível optar por testes estatísticos paramétricos. Os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson para medir o grau de relação linear entre as variáveis. Os valores de correlação variam entre -1 a +1, para variáveis diretamente proporcionais o valor da correlação é positivo e para variáveis inversamente proporcional o valor da correlação é negativo (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009). Valores entre 0,7 à 1 representam uma correlação forte, valores entre 0,4 à 0,6 correlação moderada e de 0,1 a 0,3 correlação fraca (DANCEY; REIDY, 2018). Esta análise é importante, pois só é possível realizar teste de regressão linear, se existe uma correlação entre as variáveis.

As variáveis que apresentaram correlação foram submetidas ao teste de regressão linear. Foi gerado o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, este gráfico mostra os valores absolutos dos efeitos em ordem decrescente e aborda a representação gráfica da linha de referência indicando os efeitos que apresentam significância estatística. O gráfico de pareto foi gerado com o intuito de determinar a magnitude e a importância dos efeitos. Gerou-se o gráfico normal de resíduos para examinar a pressuposição de que os resíduos são dispostos normalmente. O histograma foi gerado para avaliar a ocorrência de outliers ou a simetria dos dados, o histograma dos resíduos apresenta a distribuição dos resíduos para todas as observações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dados meteorológicos

A Tabela 3.1 apresenta os dados climáticos médios para as estações seca e chuvosa de ambas localidades. A remoção total da umidade em (%) ao longo do experimento foi obtida pela subtração da umidade atingida com 90 dias da umidade com 0 dias e definida como (ΔU).

Tabela 3.1 - Variáveis Meteorológicas.

Local	Estação	Precipitação Acumulada (mm)	Umidade Relativa média (%)	Temperatura média (°C)	Velocidade do vento média (m/s)	ΔU (%)
Conde	Chuvosa	714,8	75,9	27,6	1,0	8,2
	Seca	173,6	70,9	27,3	1,2	8,4
Pendências	Chuvosa	188,4	67,7	30,4	2,2	14,1
	Seca	39,8	54,7	31,7	3,5	9,4

Fonte: Construída a partir de dados do INMET (2022).

No período chuvoso, a temperatura média e velocidade do vento na região do Conde foram 11% e 38% mais baixas, respectivamente, que na região de Pendências. Sabe-se que ao aumentar a temperatura e velocidade do vento, ocorre uma aceleração na taxa de secagem (LUHR et al., 2021; SILVA et al., 2021). A umidade relativa média foi 12% mais alta na região do Conde para o mesmo período analisado. A umidade relativa do ambiente mais baixa favorece a secagem da biomassa (REZENDE et al., 2010). Durante o período de chuvas as condições climáticas na região de Pendências foram mais favoráveis para a secagem da biomassa, em comparação com a região do Conde.

O período da estação seca apresentou alteração das variáveis meteorológicas nas diferentes regiões, havendo um destaque para a velocidade do vento e umidade relativa do ar. Em Pendências essas variáveis foram mais favoráveis para promover a secagem mais rápida da biomassa. Pendências obteve velocidade do vento 36% mais elevada que o Conde e a umidade relativa do ar 30% mais baixa. Estas duas variáveis possuem interferência direta no processo de secagem (BRAZ et al., 2015).

A temperatura é outro fator que interfere na secagem ao ar livre, no entanto para as localidades e estações estudadas, essa variável não teve uma alteração significativa. A variação de temperatura ficou abaixo de 3% em todos os cenários avaliados nesta pesquisa. O estudo de Hofmann et al. (2018), desenvolvido na Alemanha, abordou a influência de baixas temperaturas no processo de secagem natural. O estudo verificou que a secagem ao ar livre depende fortemente das condições climáticas, e para toras de Eucalipto durante o verão ocorreu uma secagem de 25,5% e no inverno 5,5%.

Locais com incidência de neve possuem uma taxa de secagem muito baixa (JAKUBOWSKI; PRACZYK, 2022). Já conforme esperado, em locais com temperaturas mais elevadas, ocorre uma secagem mais acelerada: por exemplo, para a secagem do Eucalipto na Itália, Finlândia, e Escócia, a melhor taxa de secagem foi registrada no verão da Itália, que registrou as temperaturas mais altas (ROSER et al., 2011).

3.2. Análise do monitoramento da umidade.

As medições de umidade para 0, 30, 60, e 90 dias estão dispostas na Tabela 3.2, para as localidades de Conde e Pendências, nas estações chuvosa e seca.

Tabela 3.2 - Variação do teor de umidade no Conde e em Pendências, nas estações chuvosa e seca, para 0, 30, 60, e 90 dias de armazenamento.

Local	Estação	Teor Umidade 0 dias (%)	Teor Umidade 30 dias (%)	Teor Umidade 60 dias (%)	Teor Umidade 90 dias (%)
Conde	Chuvosa	38,40	33,12	31,10	30,20
	Seca	34,50	31,40	29,70	26,10
Pendências	Chuvosa	40,50	35,20	31,90	26,90
	Seca	35,30	31,30	29,80	25,90

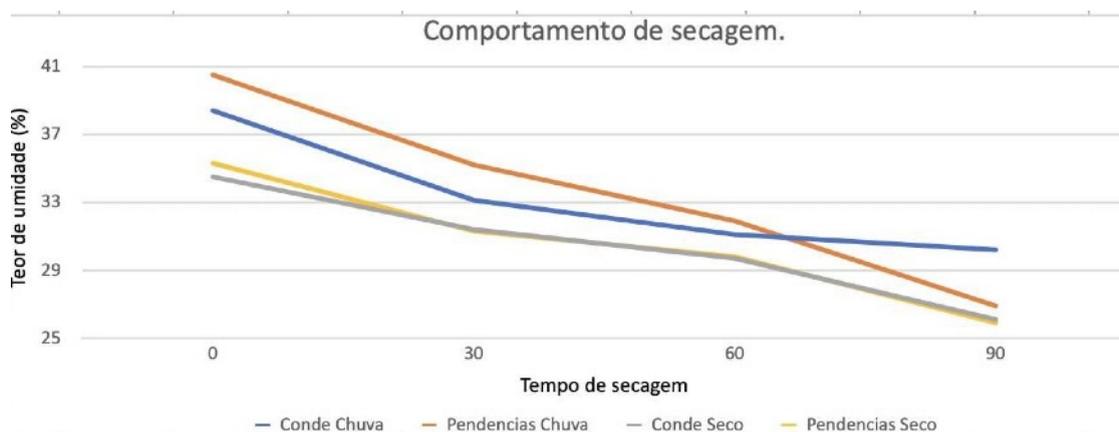
Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

Analisando o comportamento de secagem no período chuvoso é possível identificar a influência que o microclima teve no processo de secagem ao ar livre da

biomassa de Algaroba. Nos primeiros 30 dias de secagem, no Conde e em Pendências, houve o decréscimo mais significativo na umidade, de 5,28% e 5,30%, respectivamente. Isso ocorre devido a saída da água livre contida no lúmen das células, durante o primeiro estágio da secagem. Resultados semelhantes foram encontrados para espécies de eucalipto (REZENDE et al., 2010; NETO et al., 2021); Pinus (ROSER et al., 2011; VISSER et al., 2014) e Carvalho (ERBER et al., 2017; JAKUBOWSKI; PRACZYK, 2022). A taxa de secagem para estas espécies foi mais elevada que da Algaroba, devido a umidade inicial da Algaroba ser em torno de 40% e as espécies dos estudos, em torno de 70% base úmida.

No período seco em ambas as regiões, não ocorreu uma secagem tão acentuada como no período chuvoso, mas ainda sim houve razoável diminuição na umidade inicial após 30 dias, com reduções de 3,1 e 4% para o Conde e Pendências, respectivamente. Um dos fatores que pode ter influenciado este comportamento é a umidade inicial ser menor, tendo média de 34,9% no período seco e 39,5% no período chuvoso. A Figura 3.5 mostra o gráfico do comportamento da umidade da Algaroba em função do tempo de armazenagem a céu aberto.

Figura 3.5 - Gráfico do comportamento de secagem das etapas do experimento.



Fonte: Autoras, 2023.

No intervalo de 30 a 60 dias, para todas as configurações ocorre uma desaceleração do percentual de secagem. Provavelmente seja a faixa de umidade que inicia a saída do PSF, a água retirada por difusão contida na parede celular. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos com a espécie de Eucalipto; no Brasil em

Minas Gerais (ZANUNCIO et al., 2014) e em Roma na Itália por (PARI et al., 2020), em ambos os estudos a desaceleração ocorre e matem a partir de 30 dias de secagem. Um estudo realizado com amostras cúbicas de Algaroba no Sri Lanka encontrou o PSF próximo a 15% de teor de umidade base úmida (BANDARA et al., 2022).

No Conde, durante a estação chuvosa, e para Pendências em ambas as estações, a maior taxa de secagem ocorreu nos primeiros 30 dias. Resultados semelhantes foram encontrados para estudo com toras de Eucalipto com casca (OLIVEIRA, 2015; ZEN et al., 2019). Outros estudos obtiveram a maior remoção de umidade entre 30 e 60 dias,, reduzindo a partir deste ponto (ABREU NETO et al., 2021; SANTOS et al., 2022).

Em todas as condições da pesquisa observou-se que após 30 dias, a variação na redução na umidade tornou-se menor. Uma possível explicação para a redução da secagem a partir do segundo mês, é o início da saída da água de adesão que está presente nas paredes celulares. Este comportamento foi observado nesta pesquisa no Conde e em Pendências, para ambas estações, e foi encontrado em outras espécies também, como no caso do Álamo (MANZONE, 2018), Eucalipto (HOFMANN et al., 2018), e Castanheira (SANTOS et al., 2022). Resultados diferentes foram encontrados para as espécies de Teca e Acacia, onde a taxa de secagem permaneceu elevada no segundo mês (BRAZ et al., 2015).

Entre 60 e 90 dias de estocagem, com exceção do Conde na estação chuvosa, houve um incremento na redução de umidade. Este efeito divergiu de alguns comportamentos de secagem disponíveis na literatura, após 60 dias ocorreram reduções e posterior estabilização da taxa de secagem (EUFRADE-JUNIOR et al., 2021; ABREU NETO et al., 2021). Uma pesquisa realizada em Nova York com a espécie Eucalipto e classe climática Köppen-Geiger Dfb (neve, totalmente úmido, verão quente), obteve resultados semelhantes, onde a taxa de secagem voltou a aumentar após 60 dias de secagem ao ar livre (STRANDGARD; TURNER; SHILLABEER, 2022).

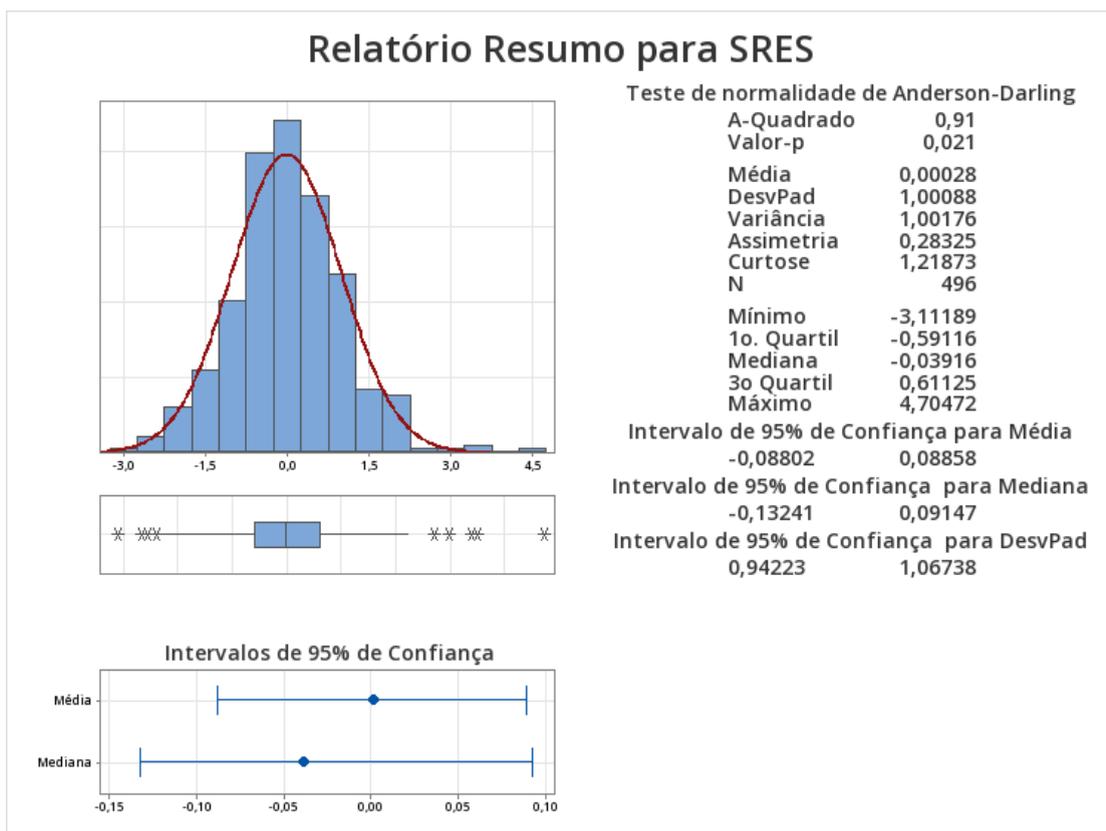
No Conde, durante o período chuvoso, após 60 dias ocorreu uma redução significativa da secagem. Dados semelhantes a este resultado foram encontrados para a espécie de Gafanhoto Preto (MANZONE, 2018). Para o Conde, na estação chuvosa, obteve-se a pior configuração de secagem da Algaroba ao ar livre. Provavelmente foi resultado das condições climáticas durante o ciclo de armazenamento, onde obteve-se o

maior índice pluviométrico e maior umidade relativa do ar, juntamente com a menor temperatura e velocidade do vento.

3.3. Análise estatística dos dados - Influência da estação, período de armazenamento, e do microclima na variação do teor de umidade.

Após a realização do teste de normalidade no software Minitab® Structural, foi possível interpretar que os dados são confiáveis e foram bem coletados. Conforme observa-se na Figura 3.6, a dispersão das barras do histograma segue a tendência da linha gaussiana, apontando uma distribuição normal dos dados coletados durante o experimento. O valor-p de 0,021 sendo menor que 0,05 indica que o modelo matemático é confiável.

Figura 3.6 - Teste de Normalidade de Anderson Darling.



Fonte: Minitab Structural, 2023.

O software Minitab® Structural (MINITAB, 2023) forneceu equações para prever o teor de umidade em função das variáveis: estação, local e período de armazenamento,

(Tabela 3.4). O modelo apresentou um R^2 de 70,23%, que indica um índice satisfatório de confiabilidade para o modelo.

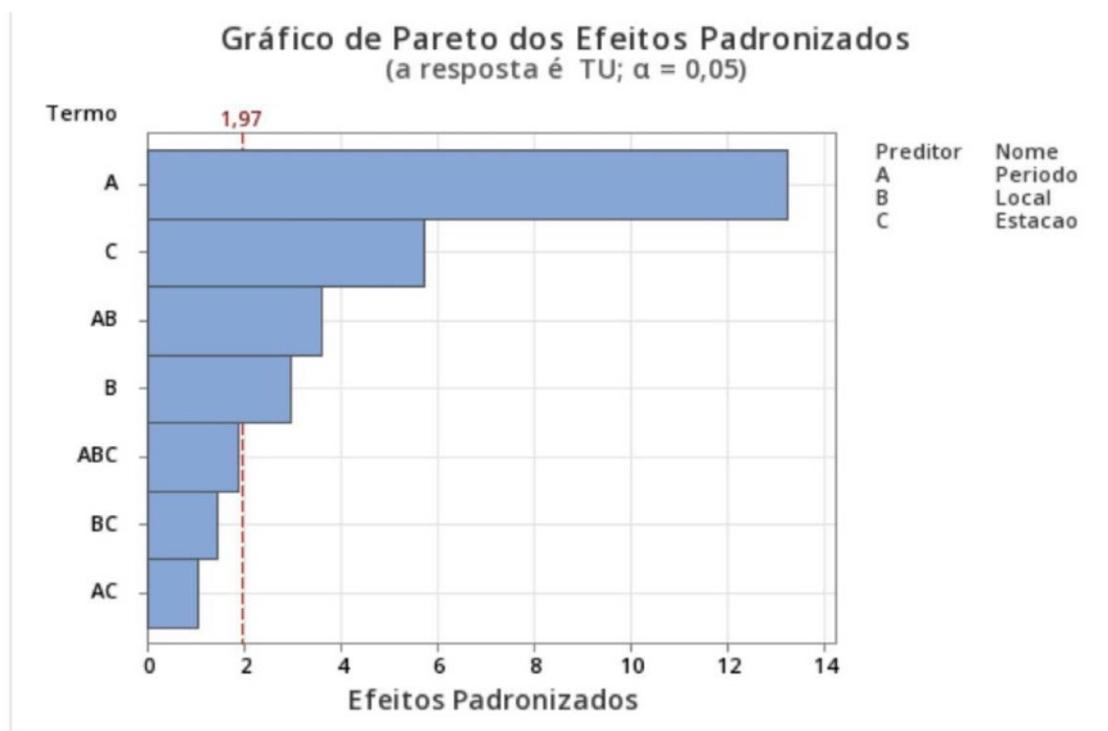
Tabela 3.4 - Equações de Regressão Linear.

Estação	Local	Equação de Regressão Linear
Chuvoso	Conde	$TU = 37,836 - 0,09956 \text{ Período}$
	Pendências	$TU = 40,229 - 0,14823 \text{ Período}$
Seca	Conde	$TU = 34,374 - 0,08602 \text{ Período}$
	Pendências	$TU = 35,005 - 0,09892 \text{ Período}$

Fonte: Minitab Structural, 2023.

Foram realizados testes de correlação entre as variáveis e obteve-se o coeficiente de correlação entre o teor de umidade e período de armazenamento de -0,74, indicando uma correlação forte e inversamente proporcional entre as variáveis. Quanto maior o período de armazenamento, menor o teor de umidade. Os dados coletados foram submetidos à análise de regressão linear, e então foram gerados os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados (Figura 3.7) e o gráfico dos resíduos do teor de umidade (Figura 3.7).

Figura 3.7. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados.

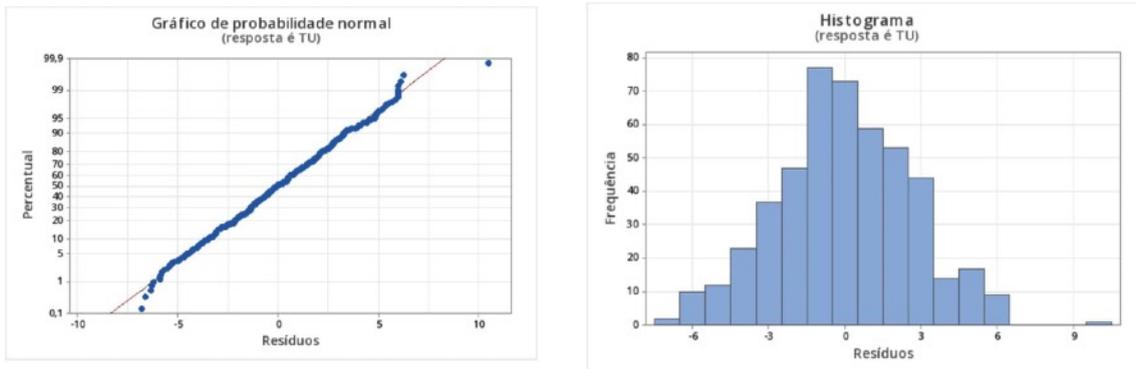


Fonte: Minitab Structural, 2023.

É possível perceber através do gráfico de Pareto (Figura 3.6) que as três variáveis são estatisticamente significativas; o período de armazenamento (quantidade de dias que a Algaroba permanece secando) a estação do ano (seca ou chuvosa) e o local de armazenamento (microclima). A interação de segunda ordem entre o período de armazenamento e a estação também foram estatisticamente significativas, pois estas variáveis cruzam a linha de referência 1,97. Já a interação de terceira ordem das três variáveis e a interação de segunda ordem do local de armazenamento (microclima) com as outras duas variáveis (estação e período) não apresentaram significância estatística. Estas variáveis permaneceram antes da linha de referência 1,97.

Esses resultados demonstram que o período de armazenamento possui maior influência no desempenho de secagem da Algaroba. A estação do ano (seca ou chuvosa) e a interação do período de armazenamento com o local (microclima) também influenciam significativamente no comportamento de secagem. Estes resultados concordam com os encontrados por (BRANDA et al., 2012; EUFRADE-JUNIOR et al., 2021; ROUTA; BRÄNNSTRÖM; LAITILA, 2020).

Figura 3.8 - Gráfico de resíduos de teor de umidade; (A) gráfico de probabilidade normal, (B) histograma.



(A)

(B)

Fonte: Minitab Structural, 2023.

Ao analisar o gráfico de probabilidade normal (Figura 3.8a) é possível observar que a grande maioria dos dados estão distribuídos sobre a uma linha reta, o que indica uma distribuição normal dos dados. Alguns pontos estão fora da linha, os quais sugerem uma distribuição com outliers. No gráfico do histograma (Figura 3.8b) é possível observar que há uma ocorrência de outliers, expressos pela barra desagrupada. Os demais dados ocorrem simetria. As variáveis ruídos extrativos e anatomia da madeira podem explicar o surgimento de alguns outliers. Alguns autores evidenciam a interferência dos extrativos (FERREIRA et al., 2015; JANKOWSKA et al., 2017) e da anatomia intrínseca de cada espécie na variação do teor de umidade (GASPAR et al., 2020; REVA et al., 2015).

Como esperado, a melhor condição de secagem ocorreu na estação seca. Apesar de ocorrer variação dos dados meteorológicos, não existiu variação significativa nos comportamentos de secagem no Conde e em Pendências durante o período seco. Uma possível explicação é que a secagem tenha atingido o PSF (ponto obtido após remoção de toda a água livre da madeira). Outra possibilidade seria a ocorrência de aspirações das pontuações, durante o período de secas em pendências. Nesse caso, a Algaroba exposta a condições ambientais que provocaram uma secagem mais pronunciada (Pendências seco) manteve o mesmo índice de secagem da outra região (Conde seco). A anatomia peculiar a cada espécie interfere no comportamento de secagem, por isso é importante estudar cada espécie individualmente. Não é possível tratar a biomassa

florestal de forma genérica (KILIÇ AK et al., 2021).

Já para a estação chuvosa, houve diferenças significativas no processo de secagem da Algaroba, com comportamentos de secagem distintos entre as duas localidades estudadas. Pendências obteve maior índice de remoção de umidade que o Conde. A precipitação e a umidade relativa do ar apresentaram maior variação. No Conde, choveu 279% a mais que em Pendências e a umidade relativa foi 12% maior. Em consonância com estudos anteriores, a precipitação e a umidade relativa do ar interferiram diretamente no comportamento de secagem (AHMADINIA et al., 2022; PARI et al., 2020; ZEN et al., 2019). Provavelmente a redução da secagem após 60 dias no Conde durante a estação chuvosa seja proveniente da umidade da biomassa ter atingido a umidade de equilíbrio com o ambiente.

As condições de precipitação e umidade relativa do ar elevadas no cenário de estudo do Conde no período chuvoso, alteraram a umidade de equilíbrio do ambiente. O estudo realizado por Silva (2006) afirma que há uma diferença significativa na umidade de equilíbrio entre os estados do Brasil e esta diferença interfere diretamente no processo de secagem ao ar livre. Este fator meteorológico contribuiu com o comportamento de secagem distinto deste cenário com os demais.

Apesar do microclima apresentar pouca interferência no comportamento de secagem, durante a estação chuvosa, esta variável foi relevante. Ficou evidenciado neste estudo que a secagem da Algaroba após 60 dias, durante a estação chuvosa, não é vantajosa. No intervalo de 60 - 90 dias a biomassa secou apenas 1,1%. Para o período de chuvas torna-se mais vantajoso secar a biomassa de Algaroba em Pendências e posteriormente transportá-la para a indústria. Estudos comprovam as vantagens econômicas em transportar madeira após a secagem (MALLADI; SOWLATI, 2018; STRANDGARD; TURNER; SHILLABEER, 2022).

Nas últimas décadas aumentou a necessidade de desenvolver estudos específicos visando um melhor conhecimento dos sistemas energéticos, para seu uso racional e melhor desempenho. Apesar de existirem pesquisas similares com outras espécies, a Algaroba ainda não havia sido contemplada num estudo deste tipo. Por meio dos resultados apresentados e discutidos, verifica-se que existe margem de melhoria para a secagem da biomassa de Algaroba ao controlar variáveis como tempo de secagem, local

e condição de armazenamento. Ressalta-se que este é o primeiro estudo realizado com Algaroba, com o intuito de incentivar e promover estudos subsequentes. À escassez de pesquisas associa-se a falta de dados primários e também a fragilidade das metodologias adotadas para suprir as necessidades. Esta pesquisa – a qual deve ser considerada, analisada e devolvida às indústrias que se utilizam de biomassa de Algaroba – procurou contribuir no sentido de potencializar a utilização da Algaroba.

4. CONCLUSÕES

Esse trabalho analisou o comportamento da secagem da biomassa de Algaroba em função da estação do ano, microclima e condições de armazenamento. Após a secagem da Algaroba por 90 dias em cada uma das conjunturas do experimento, foi traçado um desempenho de secagem em função das variáveis investigadas.

As estações do ano nas regiões do estudo interferiram no comportamento de secagem. O melhor cenário de secagem ocorreu na estação seca, tanto em Pendências-RN, como no Conde-PB. Com relação ao microclima durante a estação seca, não ocorreu variação significativa no comportamento de secagem, apesar das variáveis meteorológicas terem apresentado uma diferença expressiva nas duas regiões.

O comportamento de secagem durante a estação seca, nas duas localidades, e durante a estação chuvosa na região de Pendência tiveram o mesmo padrão. A secagem foi mais intensa na faixa de 0-30 dias, desacelerando na faixa de 30-60 dias e intensificando no período 60-90 dias. Este comportamento é incomum nos processos de secagem ao ar livre. Para ser melhor compreendido, é importante correlacionar propriedades anatômicas intrínsecas da espécie e condições climáticas de armazenamento. Para estes três cenários de secagem a desaceleração ocorreu por volta de 32% de teor de umidade base úmida, indicando o atingimento do ponto de saturação das fibras da espécie.

Durante a estação chuvosa na região do Conde, ocorreu um comportamento de secagem diferente. A aceleração do processo de secagem ocorreu de 0 - 60 dias, a partir de 60 dias iniciou-se uma redução expressiva da secagem e ocorreu a estabilização entre 60 - 90 dias. Esse cenário indica que nessa condição ocorre o teor de umidade de

equilíbrio entre a biomassa e o ambiente. Este cenário obteve a condição de secagem ao ar livre menos favorável.

Para as condições desta pesquisa durante o período de chuvas no Conde o tempo ideal de secagem da Algaroba para fins energéticos é de 60 dias. Nos outros três cenários o tempo ideal para obter o melhor processo de secagem é de 90 dias.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se uma investigação do comportamento de secagem da Algaroba em função das variáveis meteorológicas; a fim de obter equações que permitam prever o teor de umidade para diferentes condições de armazenamento ao ar livre. Propõe-se também a realização de diferentes metodologias de aferição do teor de umidade, comparando o método gravimétrico, peso de balança experimental in loco e medição com medidor portátil Umilog M65; tracando a interferência do sistema de medição de umidade, nos resultados obtidos. Sugere-se uma pesquisa realizada em um intervalo de tempo anual, contemplando todas as condições climáticas ao longo do ano.

3.5 AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a empresa Reflorestar Nordeste pelo apoio através do empréstimo do equipamento UmiLog M65 para a realização das medições de umidade da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABDULAH, M. M.; UTE, J. A.; REGASA, T. *Prosopis juliflora* L: distribution, impacts and available control methods in Ethiopia. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, 20, n. 1, p. 75-89, 2017. ISSN 1870-0462 Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93950595002>
- ABREU NETO, R. D.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M. A technical note on the effect of log length on the drying of *Eucalyptus urophylla*. **Australian Forestry**, 84, n. 4, p. 175-181, 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/00049158.2021.1975907>.
- ACUNA, M. *et al.* Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. **Current Forestry Reports**, 5, n. 3, p. 124-141, Sep 2019. Review. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40725-019-00093-4>.
- AHMADINIA, S. *et al.* Forest chip drying in self-heating piles during storage as affected by temperature and relative humidity conditions. **Fuel**, 324, p. 11, Sep 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124419>.
- AIELLO, R. G. *et al.* Avaliação de medidor portátil de umidade para toras segundo três classes de diâmetro. **In: IX JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**. 2020. ISSN 2318-536X
- BANDARA, W.; RANASINGHE, O.; PERERA, P.; VLOSKY, R.; KIZHA, A. R. Potential to use invasive plants in biomass energy production: A case study *Prosopis juliflora* in coastal wetlands of Sri Lanka. **Trees Forests and People**, 10, p. 9, Dec 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100330>.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. QUALIDADE DA SECAGEM CONVENCIONAL CONJUNTA DA MADEIRA DE CLONES DE TRÊS ESPÉCIES DE *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 711-719, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.046613>
- BERGMAN, R. Drying and control of moisture content and dimensional changes. **Chapter 13 in FPL-GTR-282**, p. 13-11, 2021. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1MFWzQXN-xrZ3Z7FmkSVH4zyuczViWiDh/view>

BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Energia na Agricultura**, 32, n. 2, p. 132-140, 2017. DOI:<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n2p132-140>.

BRANDA, M. A.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F.; DE MUÑIZ, G. I. B. Influence of the storage season over the quality of wood fuel. **Floresta**, 42, n. 2, p. 369-380, 2012. Article. DOI:<https://doi.org/10.5380/rf.v42i2.17597>.

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, 22, p. 117-123, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1590/2179-8087.037913>

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Characteristic air drying curve for *Tectona grandis* and *Acacia mangium* lumber. **Floresta e Ambiente**, 22, n. 1, p. 117-123, 2015. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/2179-8087.037913>.

COCUSSE, M. *et al.* Two-step diffusion in cellular hygroscopic (vascular plant-like) materials. **Science Advances**, 8, n. 19, p. 16, May 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7830>.

DACKERMANN, U.; ELSENER, R.; LI, J.; CREWS, K. A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. **Construction and Building Materials**, 102, p. 963-976, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia-7**. Penso Editora, 2018. ISBN 9781292128856. Disponível: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TSZzDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Estat%C3%ADstica+Sem+Matemática+para+Psicologia-7.&ots=Pb_t3dJfbv&sig=UIGNuG2XqLuqbmMw2hrMGi4zRLw#v=onepage&q=Estat%C3%ADstica%20Sem%20Matemática%20para%20Psicologia-7.&f=false

DONG, F. *et al.* How green technology innovation affects carbon emission efficiency: evidence from developed countries proposing carbon neutrality targets. **Environmental**

Science and Pollution Research, 29, n. 24, p. 35780-35799, 2022. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s11356-022-18581-9>.

ERBER, G.; HOLZLEITNER, F.; KASTNER, M.; STAMPFER, K. Impact of Different Time Interval Bases on the Accuracy of Meteorological Data Based Drying Models for Oak (*Quercus L.*) Logs Stored in Piles for Energy Purposes. **Croatian Journal of Forest Engineering**, 38, n. 1, p. 1-9, Jan 2017. Article. ISSN 1845-5719

EUFRADE-JUNIOR, H. D. J. **Predição e controle da umidade da madeira para otimização da cadeia produtiva de energia de eucalipto**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Unesp, Sao Paulo, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/182137>

EUFRADE-JUNIOR, H. D. J. *et al.* Impact of rainy and dry seasons on eucalypt fuelwood quality logs stored in piles: a case study in Brazil. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, 42, n. 2, p. 291-300, 2021. DOI:<https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.776>.

FERREIRA, I. T.; SCHIRMER, W. N.; DE OLIVEIRA MACHADO, G.; GUERI, M. V. D. Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 3, n. 4, 2014. DOI:<https://doi.org/10.5380/rber.v3i4.38618>.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, 18, n. 1, p. 115-146, 2009. Disponível em: http://dirin.s3.amazonaws.com/drive_materias/1666287394.pdf

GASPAR, M. C. *et al.* Impact of the pinewood nematode on naturally-emitted volatiles and scCO₂ extracts from *Pinus pinaster* branches: a comparison with *P. pinea*. **Journal of Supercritical Fluids**, 159, p. 12, May 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104784>.

GROSSE, W.; LANDGRAF, D.; SCHOLZ, V.; BRUMMACK, J. Ernte und Aufbereitung von Plantagenholz| Harvesting and conditioning of wood from short-rotation plantations. **Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen**, 159, n. 6, p. 140-145, 2008. DOI:<https://doi.org/10.3188/szf.2008.0140>.

HILL, C.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. **Journal of Materials Science**, 56, p. 6581-6614, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.

HOFMANN, N. *et al.* Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. **Biomass and Bioenergy**, 111, p. 196-205, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.022>.

INMET. tabela estacoes. inmet. METEREOLOGIA, I. N. D. 2022.

JAKUBOWSKI, M.; PRACZYK, M. Weight loss of logwood piles stored under winter conditions in Poland. **Baltic Forestry**, 28, n. 1, p. 8, 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.46490/bf576>.

JANKOWSKA, A.; DROZDZEK, M.; SARNOWSKI, P.; HORODENSKI, J. Effect of Extractives on the Equilibrium Moisture Content and Shrinkage of Selected Tropical Wood Species. **Bioresources**, 12, n. 1, p. 597-607, 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.15376/biores.12.1.597-607>.

KILIÇ AK, A.; BEKTAŞ, İ.; ÇIÇEKLER, M.; TUTUŞ, A. Influences of different drying climates on Eucalyptus camaldulensis wood properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 23, 2021. DOI:<https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100452>.

KING, R. On-line Industrial Applications of Microwave Moisture Sensors. **Sensors update**, 7, n. 1, p. 109-170, 2000. DOI:[https://doi.org/10.1002/1616-8984\(200001\)7](https://doi.org/10.1002/1616-8984(200001)7).

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; BARANSKI, J.; KONOPKA, A. The impact of drying and steaming processes on surface color changes of tension and normal beech wood. **Drying Technology**, 37, n. 12, p. 1490-1497, Sep 2019. DOI:<https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1509219>.

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; UHRIN, M.; BARANSKI, J.; KONOPKA, A. Impact of high temperature drying process on beech wood containing tension wood. **Open Engineering**, 9, n. 1, p. 428-433, Aug 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1515/eng-2019-0047>.

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; VILKOVSKY, P.; HYSEK, S. Structural Differences between Reaction Wood and Opposite Wood with Different Drying Temperatures. **Bioresources**, 15, n. 2, p. 4407-4416, May 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4407-4416>.

LIMA, J. V. *et al.* SECAGEM DA MADEIRA EM TORA DE EUCALYPTUS SPP. PARA FINS ENERGÉTICOS. MADEIRAS NATIVAS E PLANTADAS DO BRASIL: QUALIDADE, PESQUISAS E ATUALIDADES, 1, n. 1, p. 420-435, 2021.

DOI:<https://doi.org/10.37885/210504636>.

LUHR, C.; PECENKA, R.; LENZ, H.; HOFFMANN, T. Cold air ventilation for cooling and drying of poplar wood chips from short rotation coppice in outdoor storage piles in Germany. **Biomass & Bioenergy**, 146, p. 13, Mar 2021. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105976>.

MALLADI, K. T.; SOWLATI, T. Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 94, p. 587-599, Oct 2018. Review.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>.

MANZONE, M. Performance evaluation of different techniques for firewood storage in Southern Europe. **Biomass & Bioenergy**, 119, p. 22-30, Dec 2018. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.004>.

MINITAB: Minitab® Statistical Software, Minitab 21.4.0. EUA, 2023. Disponível em:

<<https://www.minitab.com/pt-br/products/minitab/>> Acesso em 14 abril 2023.

NASCIMENTO, R. A. **Avaliação do medidor portátil de teor de umidade pelo método dielétrico em madeira roliça de Eucalyptus sp.** 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/30367>.

OLIVEIRA, A. C. **Secagem de toras de eucalipto.** 2015. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/6848>.

PALMA, P.; STEIGER, R. Structural health monitoring of timber structures—Review of available methods and case studies. **Construction and Building Materials**, 248, p. 118528, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>.

PARAMATI, S. R.; SHAHZAD, U.; DOGAN, B. The role of environmental technology for energy demand and energy efficiency: Evidence from OECD countries. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 153, p. 9, Jan 2022. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111735>.

PARI, L. *et al.* Medium Rotation Eucalyptus Plant: A Comparison of Storage Systems. **Energies**, 13, n. 11, p. 10, Jun 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/en13112915>.

PENVERN, H. *et al.* How Bound Water Regulates Wood Drying. **Physical Review**

Applied, 14, n. 5, p. 20, Nov 2020. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.054051>.

RESENDE, R. T. *et al.* Air-drying of eucalypts logs: genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, 124, p. 316-324, 2018.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.002>.

REVA, V. *et al.* Basic density, extractive content and moisture sorption properties of *Pinus pinaster* wood infected with the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. **Journal of Forestry Research**, 26, n. 1, p. 233-240, Mar 2015. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-015-0024-1>.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; DE RAMOS, L. E.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, 16, p. 41-47, 2010. ISSN 0104-7760 Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74459381005>

ROQUETTE, J. G. Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono. **Ciência Florestal**, 28, p. 1350-1363, 2018.

DOI:<https://doi.org/10.5902/1980509833354>.

ROSER, D. *et al.* Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. **Biomass & Bioenergy**, 35, n. 10, p. 4238-4247, Oct 2011. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.011>.

ROUTA, J.; BRÄNNSTRÖM, H.; LAITILA, J. Effects of storage on dry matter, energy content and amount of extractives in Norway spruce bark. **Biomass and bioenergy**, 143, p. 105821, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105821>.

SANTOS, C. L. D. *et al.* SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA DE *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.(CASTANHEIRA). **BIOFIX Scientific Journal**, 7, n. 2, p. 143-149, 2022. DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v7i2.84430>.

SHARMA, S.; SHARMA, M.; MUDGAL, D.; BHOWMICK, H. Adoption of strategies for clean combustion of biomass in boilers. **Corrosion Reviews**, 39, n. 5, p. 387-408, Oct 2021. [10.1515/correv-2020-0095](https://doi.org/10.1515/correv-2020-0095).

SILVA, G. D. Estimate of the equilibrium moisture content of wood panels. **Scientia Forestalis (Brazil)**, 2006. ISSN 1413-9324 Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2006003051>

SILVA, M. A. J. D. *et al.* Secagem de toras de clones de *Eucalyptus urograndis* em estufa solar. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 9, n. 4, p. 377-383, 2021. DOI:<https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v9n4.josedasilva>.

SILVA, M. R.. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo 2007. DOI: 10.11606/D.88.2007.tde-16022009-143508

SILVA, O.; SANTANA, L.; STEVENS, T.; SOUZA, D.; FINOTI, A. C. Curva de secagem em madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Agrarian Academy**, 5, n. 09, 2018. DOI:https://doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a14.

SJOSTROM, Eero. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. Elsevier, 2013. ISBN 012647481-8

STRANDGARD, M.; TURNER, P.; SHILLABEER, A. Optimizing Operational-Level Forest Biomass Logistic Costs for Storage, Chipping and Transportation through Roadside Drying. **Forests**, 13, n. 2, p. 14, Feb 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/f13020138>.

SULEWSKI, P. Modification of Anderson-Darling goodness-of-fit test for normality. **Afinidad**, 76, n. 588, p. 270-277, Oct-Dec 2019. Article.

THERASME, O.; EISENBIES, M. H.; VOLK, T. A. Overhead protection increases fuel quality and natural drying of leaf-on woody biomass storage piles. **Forests**, 10, n. 5, p. 390, 2019. DOI:<https://doi.org/10.3390/f10050390>.

VISSER, R.; BERKETT, H.; SPINELLI, R. Determining the effect of storage conditions on the natural drying of radiata pine logs for energy use. **New Zealand Journal of Forestry Science**, 44, p. 8, Jan 2014. Article. DOI:<https://doi.org/10.1186/1179-5395-44-3>.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, F. S. Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, 21, p. 401-408, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.028713>.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 7, n. 2, p. 291-298, 2019. DOI:<https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n2.zen>.

CAPÍTULO 4 - ARTIGO 3: INTERFERÊNCIA DO DIÂMETRO DA LENHA NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA ESPÉCIE *PROSOPIS JULIFLORA*

Anna Beatriz Bencke Brandão¹, Marta Célia Dantas², Monica Carvalho²

¹ Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

² Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Universidade Federal da Paraíba, Campus I, Cidade Universitária, s/n – Castelo Branco - João Pessoa – Paraíba – CEP 58051-970

RESUMO

O uso eficiente de fontes de energia é uma premissa para o desenvolvimento sustentável. A necessidade de aproveitamento máximo do insumo disponível, para garantir a sustentabilidade energética, não deixa espaço para desperdícios e ineficiência. Com relação a biomassa florestal para energia, o foco é obter o máximo rendimento, aproveitando toda a extensão da árvore. A espécie Algaroba possui grande variação de diâmetro ao longo da extensão da árvore. É relevante definir quanto essa variação de diâmetro interfere nas propriedades energéticas da biomassa, para garantir sua utilização eficiente. Esse estudo teve o objetivo de avaliar as propriedades energéticas de três classes de diâmetros de Algaroba: 5, 25 e 45 cm. Foi realizado um arranjo fatorial de mistura para avaliar a influência do diâmetro no poder calorífico superior. Para análise química imediata foram realizadas análises individuais com cada classe de diâmetro. O poder calorífico superior e carbono fixo não apresentaram variação significativa dos resultados (6% e 9%), no entanto, o melhor resultado foi encontrado na mistura de 67% diâmetro menor com 17% do diâmetro médio e 17% do maior. As análises de material volátil e carbono fixo tiveram resultados próximos para as três classes de diâmetros. O teor de cinzas apresentou variação significativa, onde o maior percentual foi da classe de 5cm com 11,8%, o diâmetro de 25 cm apresentou 7,1 % e o diâmetro de 45 cm obteve 6,1%. Ficou evidenciado que toda a extensão da árvore de Algaroba pode ser utilizada para fins energéticos, com ressalva de uma remoção de cinzas mais efetiva ao utilizar a biomassa de diâmetros menores.

Palavras-chave: Algaroba. Teor de cinzas. Carbono fixo. Material volátil. Poder calorífico. Eficiência energética.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa de origem florestal é uma excelente alternativa de fonte de energia limpa em caldeiras de geração de vapor. Em seu ciclo de crescimento a árvore é capaz de retirar CO₂ da atmosfera, contribuindo para redução dos gases de efeito estufa (KHAN et al., 2022; MAKSIMUK et al., 2021). Com o crescente aumento da demanda energética não basta apenas focar em usar fontes renováveis. Mas é primordial utilizar de maneira eficiente e sustentável os recursos renováveis disponíveis, para garantir a sustentabilidade energética (BURSZTYN, 2018; RAY, 2019; ZHANG; KONG, 2022).

Para a utilização eficiente da biomassa é fundamental conhecer as características das propriedades energéticas inerentes à espécie utilizada. Estudos revelam que características anatômicas distintas, implicam na alteração das propriedades energéticas, (CIRILO et al., 2021; ERBER et al., 2014; KLEMENT et al., 2020). Existe um percentual diferente de cerne e alburno presente com a variação do diâmetro ao longo da árvore, o qual acarreta em mudança das características anatômicas em função do diâmetro (CÂMARA et al., 2020; ESTEVES et al., 2022; MIRANDA et al., 2017).

A espécie Algaroba surgiu como uma excelente alternativa de fonte de biomassa para energia em locais com condições de clima e solo desfavoráveis para o cultivo agrícola (CAVALCANTI et al., 2020). As características anatômicas da espécie, como espinhos, tronco sinuoso e ramificado, atribuem a Algaroba grande variação de diâmetro ao longo da árvore (CIRILO et al., 2021; LIMA, 2006). Diâmetros menores implicam em densidade mais baixa e alto índice de alburno, já diâmetros maiores conferem a biomassa uma densidade maior e um índice de cerne elevado (CÂMARA et al., 2020).

As propriedades químicas que interferem diretamente na eficiência energética da biomassa são: poder calorífico, carbono fixo (CF), teor de cinzas e teor de material volátil (LOPES et al., 2022; VIDAURRE et al., 2012). O poder calorífico é a propriedade que expressa a quantidade de energia liberada após a combustão da massa em forma de calor (QUIRINO et al., 2005). O poder calorífico superior (PCS) é dado com o teor de umidade a 0% e o poder calorífico útil (PCU) é a energia efetiva disponível por unidade de massa, considerado o teor de umidade da biomassa no

momento da combustão (PROTÁSIO et al., 2011). O carbono fixo (CF) representa o que não entra em combustão na ausência de ar, quando mais elevado for o percentual de carbono fixo, maior o potencial energético da biomassa (RÓZ et al., 2015).

Teor de cinzas é todo material inorgânico que não entra em combustão, quanto menor for essa variável, melhora a eficiência energética da biomassa (VENEGA et al., 2023). O teor de material volátil é a propriedade que auxilia na ignição da biomassa e está ligada de maneira inversamente proporcional ao teor de cinzas, logo teor de voláteis elevados são favoráveis para fins energéticos (SOARES et al., 2015).

Na literatura científica, estudos indicam que quanto maior o diâmetro da espécie, mais elevado é o PCS e CF na biomassa da espécie Eucalipto (CARNEIRO et al., 2014; NONES et al., 2014). Já outros autores não encontraram diferença significativa nas espécies de Eucalipto e Pinus quando se analisou PCS e CF em função do diâmetro (BRITO et al., 2020). O estudo conduzido por Bandara et al. (2022) investigou a interferência do diâmetro nas propriedades energéticas da Algaroba, e encontrou pequena variação das propriedades entre as classes de diâmetros de 10 cm a 39 cm.

Estudos recentes têm buscado uma maneira de explorar espécies florestais subutilizada como fonte de energia limpa, onde plantas invasoras passam a ser protagonistas de bioenergia (AHMED et al., 2020; NUNES et al., 2021; PÉREZ et al., 2021; TREASURE et al., 2019). A Algaroba é considerada uma espécie invasora e possui propriedades favoráveis para energia, tem densidade em torno de 980 kg/m³, rápido crescimento e ótima adaptação a solos pouco férteis (ABDULAH; UTE; REGASA, 2017; CARNEIRO-JUNIOR et al., 2021; RAVHUHALI et al., 2021). Especialmente na região Nordeste do Brasil, a Algaroba tem sido utilizada para geração de energia em caldeiras de biomassa, principalmente em indústrias cerâmica e de papel (BURNETT, 2018).

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência das classes de diâmetro da espécie Algaroba, na variação das principais propriedades energéticas que interferem na eficiência do processo de geração de vapor. Esta pesquisa teve o intuito de utilizar uma metodologia inovadora de experimento fatorial de misturas, para avaliar a influência da mistura de diâmetros no PCS. O propósito é investigar se a variação de diâmetro e da mistura dos diâmetros, influenciam no poder calorífico, teor de cinzas, materiais voláteis,

e percentual de carbono fixo. Esta pesquisa é a primeira a ser realizada com a espécie Algaroba no Brasil, tendo caráter pioneiro na utilização da metodologia de misturas de diâmetros. Visa abrir novos horizontes de investigação dos materiais lignocelulósicos e contribuir para uma utilização mais eficiente da biomassa de Algaroba, colaborando para seu uso sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização e preparação da biomassa.

A biomassa utilizada nesta pesquisa foi da espécie *Prosopis Juliflora*, extraída de florestas plantadas situadas no município de Carnaubais-RN. A área está localizada a 48 m de altitude e com coordenadas geográficas de Latitude: 5° 20' 20" Sul, Longitude: 36° 50' 16" Oeste. O clima da região de acordo com a Köppen e Geiger é BSh, clima de estepe local. A temperatura média anual é de 28 °C e a pluviosidade média anual é de 404 mm (CLIMATE-DATA, 2021).

As amostras utilizadas nesse estudo tinham idade variando de 3 a 10 anos. As amostras foram divididas em três classes de diâmetros; o diâmetro pequeno ficou compreendido entre 5 a 7 cm, o diâmetro médio entre 25 a 27 cm e o diâmetro grande entre 45 a 47 cm, (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Seleção das amostras por classe de diâmetro. Imagem A - Amostras de 5 cm; Imagem B - Amostras de 25 cm; Imagem C - Amostras de 45 cm.



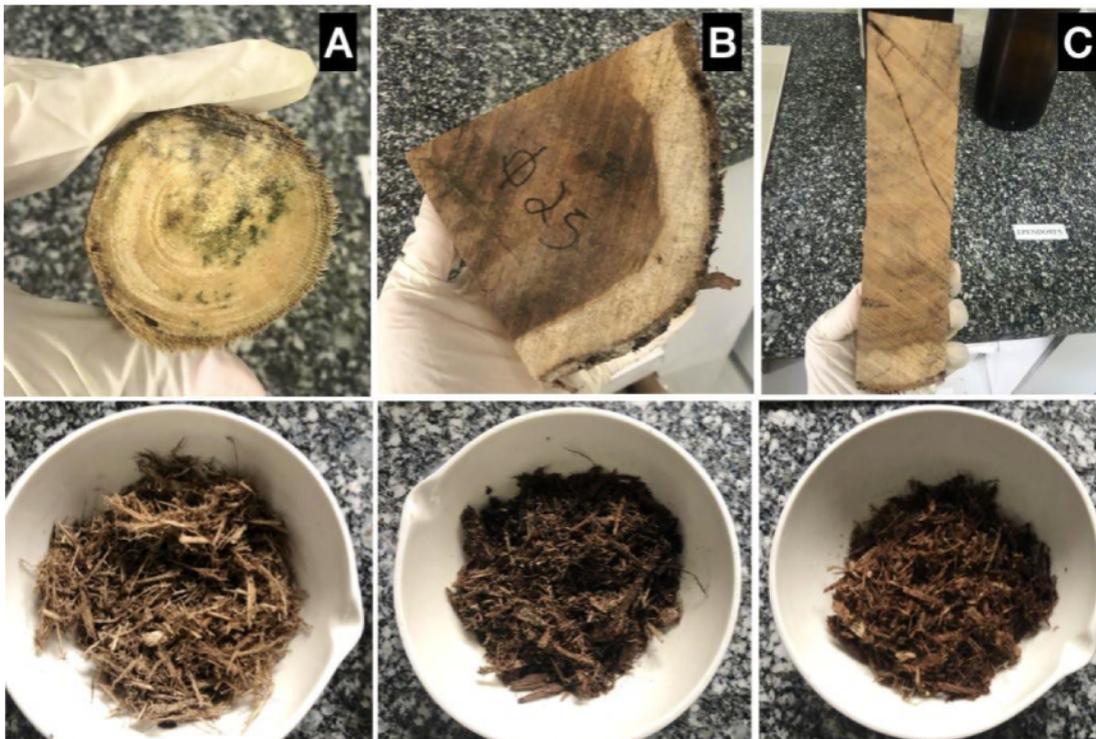
Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2022.

A seleção das amostras de lenha de Algaroba ocorreu sobre uma carga de biomassa

comercializada para energia, em uma indústria de papel reciclado no município do Conde- PB. Não foi possível determinar se as amostras pertenciam à mesma árvore.

As amostras foram levadas ao Laboratório de Fabricação Digital - FABLAB da Universidade Federal da Paraíba - UFPB para serem serradas. As toras com diâmetro de 25 cm e 45 cm precisam passar por essa preparação para reduzir suas dimensões em torno de 5 cm. Posteriormente as amostras foram levadas ao Laboratório de Carvão Ativado - LCA da UFPB para moagem, no moinho de facas. Utilizou-se o moinho WEG modelo D560585. O moinho foi devidamente limpo a cada troca de classe de diâmetro, para evitar a contaminação do material. As amostras foram separadas por classe de diâmetros (5 cm, 25 cm e 45 cm) e armazenadas individualmente em recipientes hermeticamente fechados, (figura 4.2).

Figura 4.2 - Preparo das amostras para análise das propriedades energéticas. Coluna A - amostras diâmetro 5 cm; Coluna B - amostras diâmetro 25 cm; Coluna C - amostras diâmetro 45 cm.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

Para a realização da análise química imediata, as amostras foram levadas ao Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LABMAQ) - UFPB. As amostras foram secas, trituradas em liquidificador industrial, e por fim peneiradas em uma malha de 100

mesh deixando o material adequado para a realização das análises de acordo com a norma ASTM D1762/ 84 (ASTM, 2007).

2.2. Determinação do poder calorífico superior (PCS)

Para o planejamento do experimento foi utilizado o software Minitab Strutural o qual foi realizado um experimento fatorial de misturas. Para determinação do PCS, as amostras foram secas em estufa 105 °C por 24 h até atingir peso constante, seguindo a norma NBR 14929 (ABNT, 2003). Ao trabalhar com biomassa de origem lignocelulósica, esta etapa é muito importante para garantir o teor de umidade 0% (FURTADO et al., 2012).

O PCS foi determinado por meio da bomba calorimétrica IKA-Werner modelo C200, do laboratório LABMAQ - UFPB, aderindo à norma ASTM D5865/98, (ASTM, 2013). Com o intuito de investigar o maior número de arranjos, para a análise de PCS, optou-se por realizar um arranjo de mistura entre os diâmetros investigados na pesquisa, com três repetições, (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Planejamento do experimento fatorial - Arranjo de Mistura PCS.

StdOrder	RunOrder	PfType	Blocks	Menor	Intermediário	Maior	PCS(kcal/kg)
1	1	1	1	100%	0%	0%	
2	2	2	1	67%	33%	0%	
3	3	2	1	67%	0%	33%	
4	4	2	1	33%	67%	0%	
5	5	0	1	33%	33%	33%	
6	6	2	1	33%	0%	67%	
7	7	1	1	0%	100%	0%	
8	8	2	1	0%	67%	33%	
9	9	2	1	0%	33%	67%	
10	10	1	1	0%	0%	100%	
11	11	-1	1	67%	17%	17%	
12	12	-1	1	17%	67%	17%	
13	13	-1	1	17%	17%	67%	

Fonte: Arquivo gerado pelas autoras, através do software MiniTab, 2023.

2.3. Análise química imediata

Para a análise química imediata, foram seguidas as orientações das normas ASTM E1755/2001 (ASTM, 2007) para determinação de teor de cinzas CZ e ASTM E872/1982 (ASTM, 2006), para materiais voláteis CV. Foram realizadas três repetições e utilizado 100% de cada diâmetro nas análises. Não foi aplicado o arranjo de misturas para essa etapa.

O teor de cinzas (CZ) representa o material que será removido da caldeira de biomassa, tudo que não entra em combustão. O carbono fixo (CF) é o resíduo da biomassa que permanece após a saída do material volátil. O material volátil é responsável pela ignição da biomassa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Poder calorífico superior (PCS)

A Tabela 4.2 apresenta os dados obtidos após a execução do experimento de poder calorífico. É possível constatar que ocorre uma variação do PCS para as diferentes configurações de mistura.

Tabela 4.2 - Dados de poder calorífico superior (PCS) do experimento de mistura.

StdOrder	Pequeno	Médio	Grande	Código da Mistura	PCS (KJ/kg)
11	67%	17%	17%	P67%; M17%; G17%	20.976
9	0%	33%	67%	M33%; G67%	20.801
7	0%	100%	0%	M100%	20.785
5	33%	33%	33%	P33%; M33%; G33%	20.378
4	33%	67%	0%	P33%; M67%	20.300
8	0%	67%	33%	M67%; G33%	20.206
13	17%	17%	67%	P17%; M17%; G67%	20.175

10	0%	0%	100%	G100%	19.976
12	17%	67%	17%	P17%; M67%; G17%	19.882
2	67%	33%	0%	P67%; M33%	19.803
6	33%	0%	67%	P33%; G67%	19.644
1	100%	0%	0%	P100%	19.561
3	67%	0%	33%	P67%; G33%	19.508

Fonte: Dados das Autoras, 2022.

Os três maiores resultados para PCS, foram encontrados nas misturas em negrito da Tabela 4.2: (67% do diâmetro pequeno, 17% do diâmetro médio, 17% do diâmetro grande); (33% do diâmetro médio, 67% do diâmetro grande) e (100% do diâmetro médio). O PCS mais alto foi obtido na mistura dos três diâmetros.

Estudos realizados com Eucalipto (CARNEIRO et al., 2014; ELOY et al., 2016), encontraram o melhor resultado de PCS nos diâmetros menores. Resquin et al. (2020) ao avaliar a variação das propriedades energéticas do Eucalipto em função do aumento do diâmetro (idade da árvore), em dois locais distintos, encontrou uma aumento proporcional do PCS com o diâmetro.

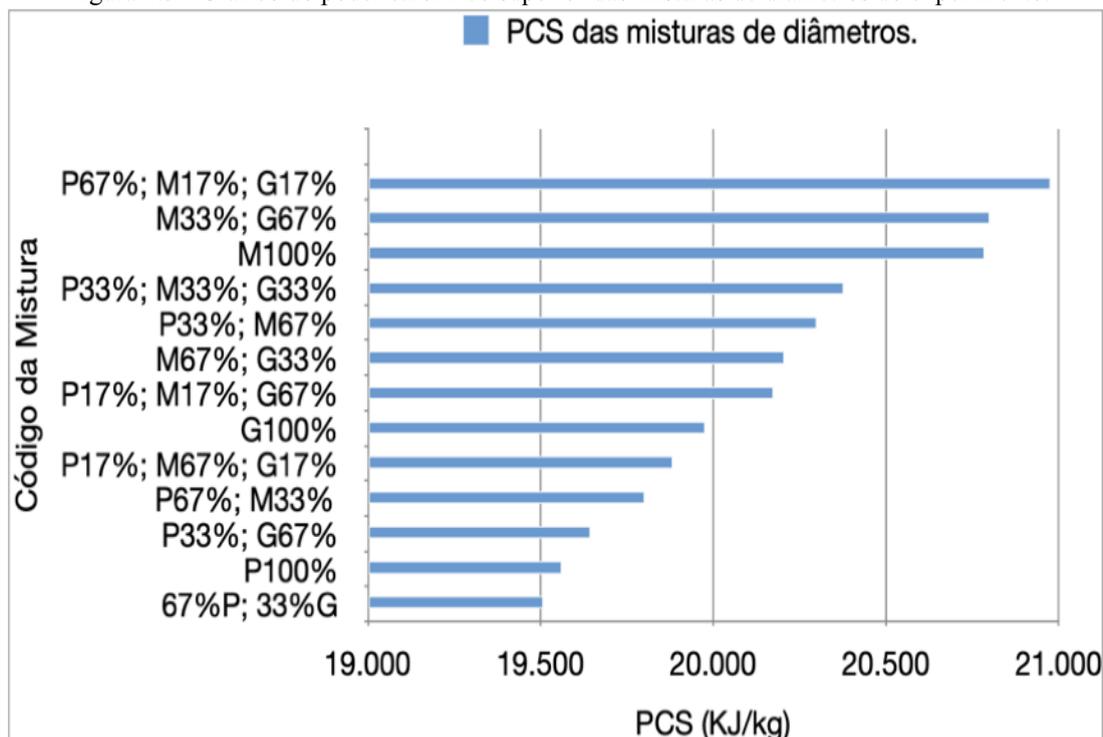
Um fato interessante deste estudo foi um aumento distinto para a mesma espécie nas diferentes regiões. Isso indica que as condições climáticas afetam a atividade fisiológica das árvores e estas atividades afetam as propriedades energéticas, corroborando as observações de Soares et al. (2014).

A interação da mistura dos diâmetros interferiu nos resultados de PCS, é possível que propriedades químicas presentes nas diferentes características anatômicas da espécie Algaroba e o teor de extrativos tenham contribuído para estes resultados. Outros autores evidenciaram a relação entre as propriedades energéticas e a anatomia de cada espécie (BRITO; BARRICHELO, 1977; SANTOS et al., 2016). Como este estudo é pioneiro em tratar da interação entre as classes de diâmetros, é importante levar em consideração estes aspectos para interpretação dos resultados

Os menores resultados de PCS ficaram compreendido nas misturas: (67% do diâmetro pequeno, 33% do diâmetro grande); (100% do diâmetro pequeno) e (33% do diâmetro pequeno e 67% do diâmetro grande) (Figura 4.3). Este resultado é semelhante

ao encontrado por (RESQUIN et al., 2020) com a espécie Eucalipto e com a espécie Pinus (FERREIRA et al., 2016) onde o menor resultado de PCS foi para os menores diâmetros. É possível perceber que há uma interação negativa ao misturar diâmetros pequenos com diâmetros grandes, com os dois menores resultados de PCS evidenciados nestas misturas.

Figura 4.3 - Gráfico do poder calorífico superior das misturas de diâmetros do experimento.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

A literatura científica atual contempla estudos a respeito da variação do PCS em função de diferentes diâmetros (idades), avaliando cada classe de diâmetro individualmente. Estudos realizados com o Pinus (FURTADO et al., 2012), com a espécie Eucalipto (ELOY et al., 2016; SOARES et al., 2014), com a Acácia e Bracatinga (ELOY et al., 2018), e também com a Algaroba (BANDARA et al., 2022) encontram o maior resultado de PCS para o diâmetro pequeno, reduzindo para o diâmetro médio e aumentando o valor de PCS para o diâmetro grande. Outros autores encontraram uma variação diretamente proporcional de aumento do PCS com o aumento do diâmetro para Eucalipto (VENEGA et al., 2023) e Pinus (FERREIRA et al., 2016). No estudo com a espécie Acácia (COSTA et al., 2021) encontrou-se uma relação inversamente

proporcional do aumento do diâmetro em relação ao PCS.

Neste estudo a variação encontrada do PCS em função do diâmetro foi menor para o pequeno, maior para o médio, e menor para o grande. Estudos realizados com Eucalipto no estado do Paraná (BENIN et al., 2021) e em Minas Gerais (CARNEIRO et al., 2014), encontraram o mesmo comportamento desta pesquisa, para variação do PCS em função do diâmetro (Tabela 4.3 e Figura 4.4).

Tabela 4.3 - Estudos que avaliam o comportamento da variação do PCS em função do diâmetro.

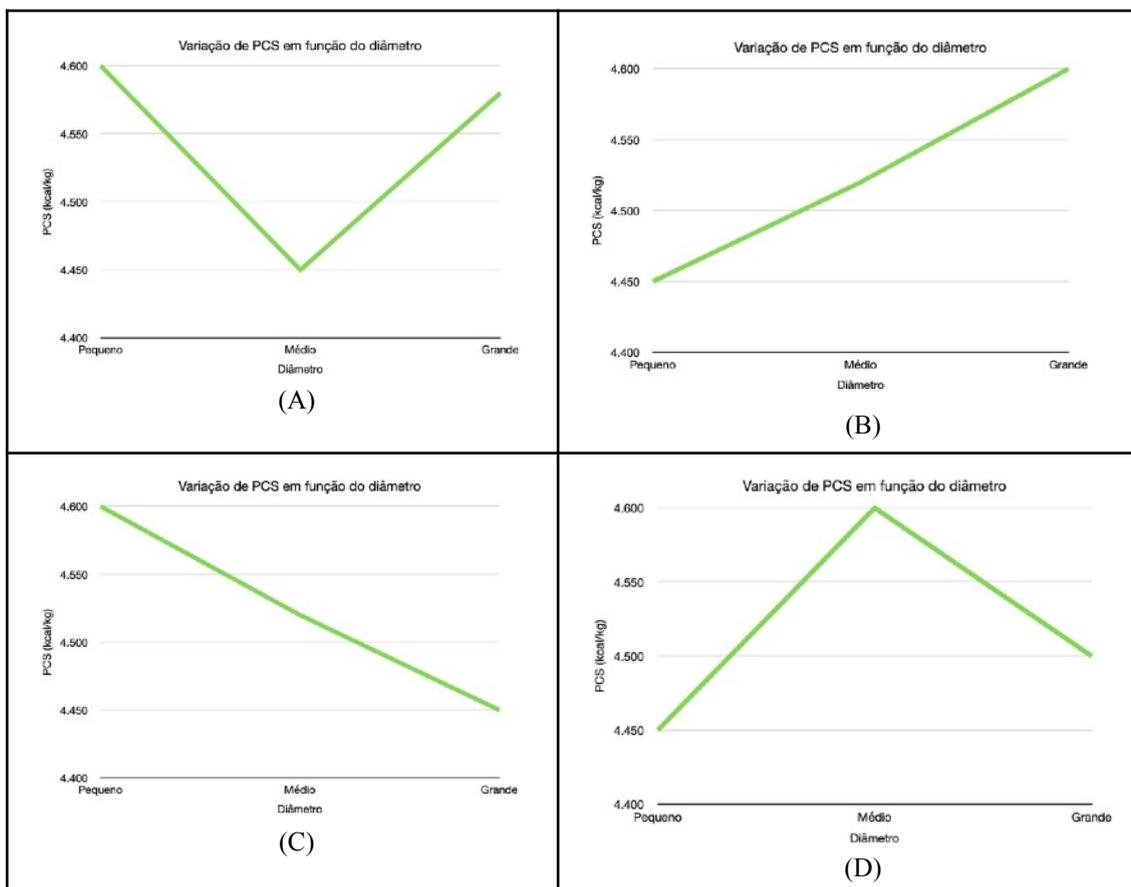
Grupo	Autor	Diâmetro	Gráfico (D x PCS)
1	Pinus (FURTADO et al., 2012). Eucalipto (ELOY et al., 2016; SOARES et al., 2014), Acácia e Bracatinga (ELOY et al., 2018) Algaroba (BANDARA et al., 2022)	D-Pequeno = PCS - Maior D-Médio = PCS - Menor D-Grande = PCS - Maior	A
2	Eucalipto (VENEGA et al., 2023) Pinus (FERREIRA et al., 2016)	D-Grande = PCS - Maior Relação diretamente proporcional entre D e PCS	B
3	Acacia (COSTA et al., 2021)	D-Pequeno = PCS - Maior Relação inversamente proporcional entre D e PCS	C
4	Algaroba (Autoras, 2023) Eucalipto (BENIN et al., 2021) Eucalipto (CARNEIRO et al., 2021)	D-Pequeno = PCS - Menor D-Médio = PCS - Maior D-Grande = PCS - Menor	D

Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

Analisando a Tabela 4.3, é possível verificar que para a mesma espécie, existem interações distintas entre PCS e diâmetro. A espécie Algaroba é um exemplo desta diferença. A interação encontrada por Bandara et al. (2022) está no grupo 1, onde o diâmetro pequeno obteve PCS maior (18.645 KJ/kg), o diâmetro médio obteve o PCS menor (18.638 KJ/kg) e o diâmetro grande o PCS aumentou novamente (18.660 KJ/kg), (Figura 4.4.A). A interação encontrada aqui neste estudo entre PCS e diâmetro obteve o comportamento do grupo 4. O diâmetro menor apresentou o menor resultado para PCS (19.561 KJ/kg), o diâmetro médio teve o maior resultado de PCS (20.785 KJ/kg) e para o diâmetro grande o PCS voltou a reduzir (19.976 KJ/kg) (Figura 4.4.D). Três comportamentos distintos foram encontrados para a espécie Eucalipto (grupo 1, 2 e 4 da Tabela 4.3), e para o Pinus, encontraram-se duas interações distintas entre o PCS e o diâmetro (grupo 1 e 2 Tabela 4.3).

A figura 4.4 ilustra os diferentes comportamentos de variação do PCS em função do diâmetro, que foram apontados na Tabela 4.3.

Figura 4.4 - Variação do PCS em função do diâmetro de diferentes espécies (tabela 4.3). Grupo 1 (A). Grupo 2 (B). Grupo 3 (C). Grupo 4 (D).



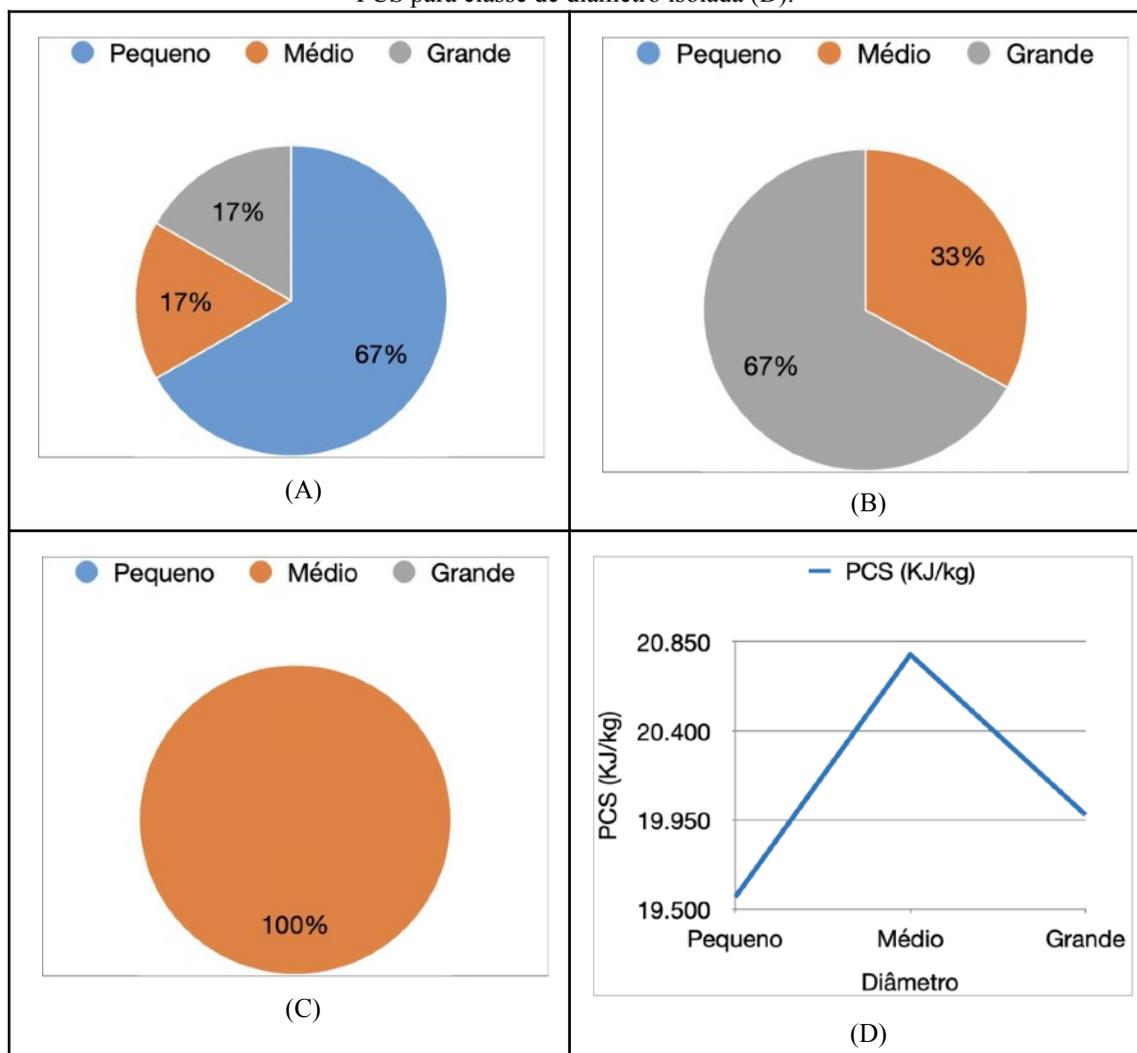
Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

Na literatura científica há grande divergência sobre como varia o PCS de acordo com o diâmetro (Figura 4.4). Uma possível explicação para a discordância de resultados entre a mesma espécie é a interferência do meio o qual a árvore se desenvolve. O estudo realizado por (VENEGA et al., 2023) avalia a variação do poder calorífico para a mesma espécie e em locais distintos. Os autores encontraram variação dos resultados, evidenciando que o local de crescimento da árvore, também influencia nas propriedades energéticas, pois alteram sua composição química. Ao comparar variações de PCS em função do diâmetro, entre espécies distintas, as propriedades anatômicas intrínsecas a cada espécie influenciam nas propriedades energéticas (COUTO et al., 2023; DELGADO et al., 2021).

O teor de extrativos, a quantidade de lignina, quantidade de cerne e alborno, os anéis de crescimento, todos esses fatores influenciam diretamente nas propriedades energéticas (RESENDE et al., 2018). Santos et al. (2016) afirmam que maiores teores de lignina confere à biomassa um aumento do PCS. Lima et al. (2021) apontam que o teor de lignina varia de acordo com o teor de cerne e alborno, e essa variação é diferente nas classes de diâmetro entre diferentes espécies.

A Figura 4.5 ilustra as três melhores condições do experimento para o resultado de PCS, juntamente com a variação do PCS para as classes de diâmetros isoladas.

Figura 4.5 - Configurações de mistura com os maiores resultados de PCS. Melhor Configuração de mistura (A). Segunda melhor configuração de mistura (B). Terceira melhor configuração de mistura (C). PCS para classe de diâmetro isolada (D).



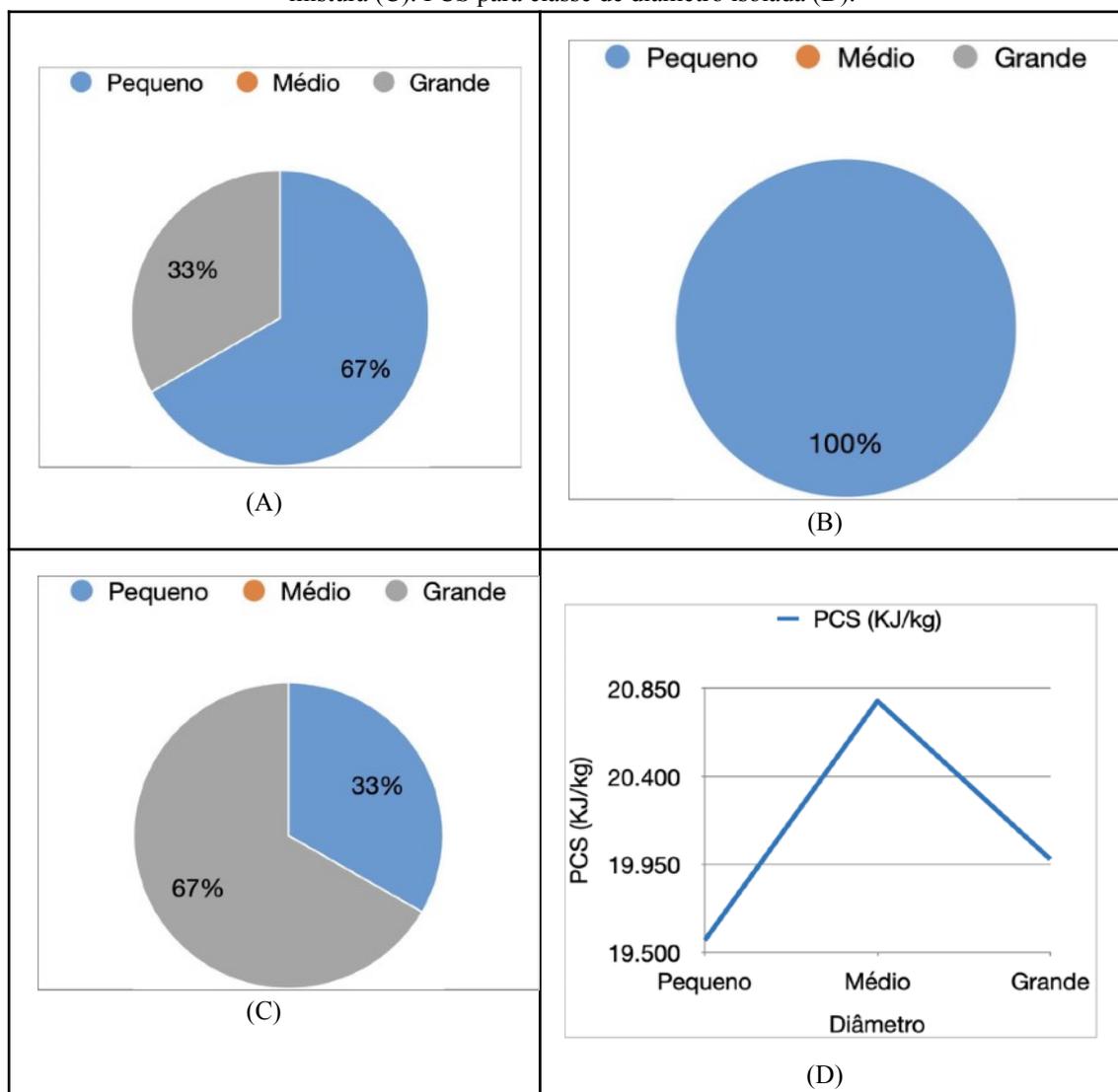
Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

As três melhores condições do experimento para o PCS (Figura 4.5 A, B e C)

tiveram variação de 1%, 0,3% e 0,3%, respectivamente. Para os diâmetros isolados o melhor resultado de PCS foi para a classe de diâmetro médio (25 cm). Realizando um paralelo entre o resultado das misturas com o diâmetro isolado é possível verificar que a mistura (DP 0% DM 100% DG 0%) está entre os três melhores resultados, assim como o DM 100% (diâmetro médio) foi o melhor resultado de PCS entre as classes isoladas (Figura 4.5 D).

Nas misturas dos diâmetros é possível avaliar que ocorre alguma interação entre as classes de diâmetro, a qual altera o resultado do PCS. O valor mais elevado de PCS foi encontrado na mistura (DP 67%, DM 17% DG 17%) (Figura 4.5 D). Alguns autores afirmam que a elevação do PCS nos diâmetros menores é atribuída ao elevado teor de lignina. Nos primeiros anos de vida da árvore a alta atividade fisiológica do indivíduo, é responsável por elevar o teor de lignina, e altos teores de lignina elevam o PCS (ELOY et al., 2018). Outros estudos discordam desta linha, afirmando que o teor de lignina não influencia no PCS (DONATO et al., 2020). As propriedades anatômicas e químicas alteram com a variação do diâmetro (SANTOS et al., 2016). Nesse estudo ficou evidenciado que a interação entre essa variação afeta o PCS. A Figura 4.6 ilustra os três resultados mais baixos de PCS para a interação das misturas.

Figura 4.6. Configurações de mistura com os resultados mais baixos de PCS. Configuração de mistura com menor PCS (A). Segundo menor resultado de PCS mistura (B). Terceira menor resultado de PCS mistura (C). PCS para classe de diâmetro isolada (D).



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

A variação dos resultados de PCS que obtiveram os resultados mais baixos variaram de 0,3%, 0,1% e 0,4% para as misturas (A, B e C) respectivamente, (Figura 4.6 A, B e C). Os resultados mais baixos ocorreram com 100% do diâmetro menor e com a interação das proporções entre os diâmetros pequeno e grande. O resultado indica alguma interação negativa quando utiliza uma mistura de diâmetros de 5 cm com 45 cm da biomassa de Algaroba. Ao avaliar o comportamento dos diâmetros isolados, o menor

resultado de PCS foi para o diâmetro menor (5 cm), concordando com o resultado encontrado no experimento de misturas. O diâmetro menor ficou entre os três resultados mais baixos de PCS. Na literatura, resultados semelhantes foram encontrados por (BENIN et al., 2021; CARNEIRO et al., 2014; VENEGA et al., 2023), onde estudaram a espécie Eucalipto e encontraram os menores valores de PCS nos diâmetros menores.

Apesar de ocorrer variação de PCS em função do diâmetro, essa variação foi pequena, o menor resultado (19.561 KJ/kg) variou 5,9% do maior (20.785 KJ/kg). Parte dos estudos presentes na literatura encontraram resultados semelhantes, com a espécie Acacia no Brasil, (ELOY et al., 2017) obteve variação de 5,6% entre os resultados de PCS e na Etiópia encontrou 6,4% (ASMARE et al., 2022). Para estudo com Eucalipto no Brasil foi encontrado 4% de amplitude entre os resultados (VENEGA et al., 2023). Para a espécie de Pinus na China a variação do PCS entre os diâmetros foi de 8,7 % (ZENG et al., 2014). Outras pesquisas encontraram valores ainda mais baixos para a espécie Eucalipto, no Uruguai 2,4% (RESQUIN et al., 2020), no Brasil 3,7% ((ELOY; DA SILVA; CARON, 2022). Para a espécie Algaroba no Sri Lanka a variação do PCS ficou em 0,1% entre os diâmetros (BANDARA et al., 2022). Alguns autores encontraram valores mais elevados de variação dos resultados de PCS entre diferentes diâmetros. Um estudo realizado na Uganda, para a espécie Eucalipto encontrou 14% de variação (SSEREMBA et al., 2021). Outro estudo realizado na Costa Rica para a espécie Gmelina Arborea obteve 19,5% (MOYA; TENORIO, 2013).

Há uma grande variação de comportamento do PCS disponível na literatura científica atual. Aspectos intrínsecos a propriedades químicas da espécie, do local de crescimento parecem justificar a essa variação. Diferentes metodologias empregadas para realização do PCS, também podem interferir nos resultados. A etapa de secagem é uma parte muito relevante que deve ser levada em consideração no momento de determinar o PCS de uma biomassa lignocelulósica.

3.2. Análise química imediata

Os resultados de teor de cinzas, teor de materiais voláteis, e teor de carbono fixo

estão dispostos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultado da análise química imediata para as classes de diâmetros.

Diâmetro	CZ - Cinzas (%)	CV - Voláteis (%)	CF - Carbono Fixo (%)	PCS (KJ/kg)	Desvio Padrão
Pequeno (5 cm)	11,68	27,29	61,02	19.56 1	138
Médio (25 cm)	7,07 ¹	27,48 ¹	65,45	20.78 5	184
Grande (45 cm)	6,12 ¹	26,92 ¹	66,96	19.97 6	499

Fonte: Dados das Autoras, 2022.

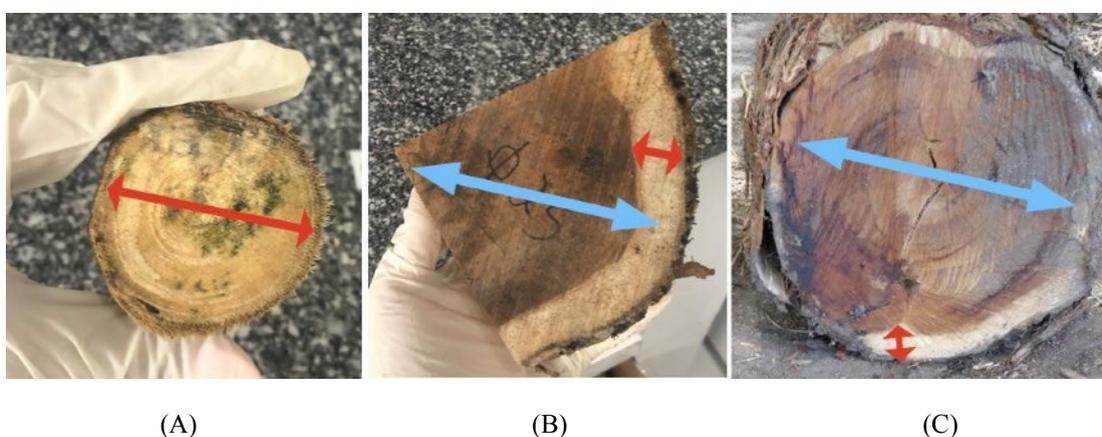
O resultado do CZ foi inversamente proporcional à variação do diâmetro. Para o menor diâmetro, obteve-se o maior resultado do CZ. Esta variável foi a que apresentou maior disparidade em relação a todas as propriedades analisadas. Variou os resultados 47,6% entre as classes diamétricas. O teor de cinzas acima de 9% é considerado elevado para biomassa proveniente da madeira, pois aumenta a quantidade de paradas para limpeza da caldeira de biomassa, (ACUNA et al., 2019; KLAVINA; SELEGOVSKIS, 2021), concordam com essa premissa. Quando o teor de cinzas é elevado ocorre a redução da eficiência do combustível. As cinzas não entram em combustão e dificultam as trocas térmicas no interior da caldeira, aumento a quantidade de resíduos sobre o grelhado da caldeira, gerando paradas mais frequentes para limpeza nas caldeiras que não possuem remoção automatizada das cinzas (KHAN et al., 2022; RIBEIRO, 2012; SHARMA et al., 2021).

Estudos realizados com a espécie Pinus (BONAZZA et al., 2022; CARVALHO et al., 2020), Eucalipto (BRITO et al., 2020; CARNEIRO et al., 2014); Acacia (COSTA et al., 2021; TONINI et al., 2018) e Algaroba (BANDARA et al., 2022), obtiveram os mesmos resultados desta pesquisa. Os maiores teores de cinzas foram encontrados nas amostras com os diâmetros menores. Soares et al. (2015) afirmam que nos primeiros anos de vida ocorre uma alta atividade fisiológica na árvore, a qual é responsável pelo aumento do teor de cinzas nos diâmetros menores. Os autores explicam que ao atingir a

maturidade (diâmetros maiores) há uma redução drástica da atividade fisiológica, esse fato explica a redução do teor de cinzas encontrado nos diâmetros maiores.

Outro aspecto relevante é a quantidade de cerne e albúrnio presente com a variação de diâmetro. As amostras com diâmetro menor (5 cm) eram na sua totalidade constituídas por albúrnio. As amostras de diâmetro médio (25 cm) e grande (45 cm), apresentaram a quantidade de cerne mais expressiva que a de albúrnio (Figura 4.7). Segundo Fonte et al. (2017) o albúrnio tem maior teor de cinzas, que o cerne, os autores encontraram 54% a mais de cinzas no cerne da espécie *Cryptomeria Japonica*. Cavalcante et al. (2021) avaliando as propriedades químicas do cerne e albúrnio da espécie Pau Brasil encontrou 17% a mais de cinzas no albúrnio. Benouadah et al. (2019) estudando a espécie *Pinus* encontrou uma variação de 16,7% a mais de cinzas no albúrnio. Li et al. (2019) ao estudarem a relação das propriedades químicas entre cerne e albúrnio, encontraram 42% a mais de cinzas no cerne para a espécie *Cunninghamia lanceolata*.

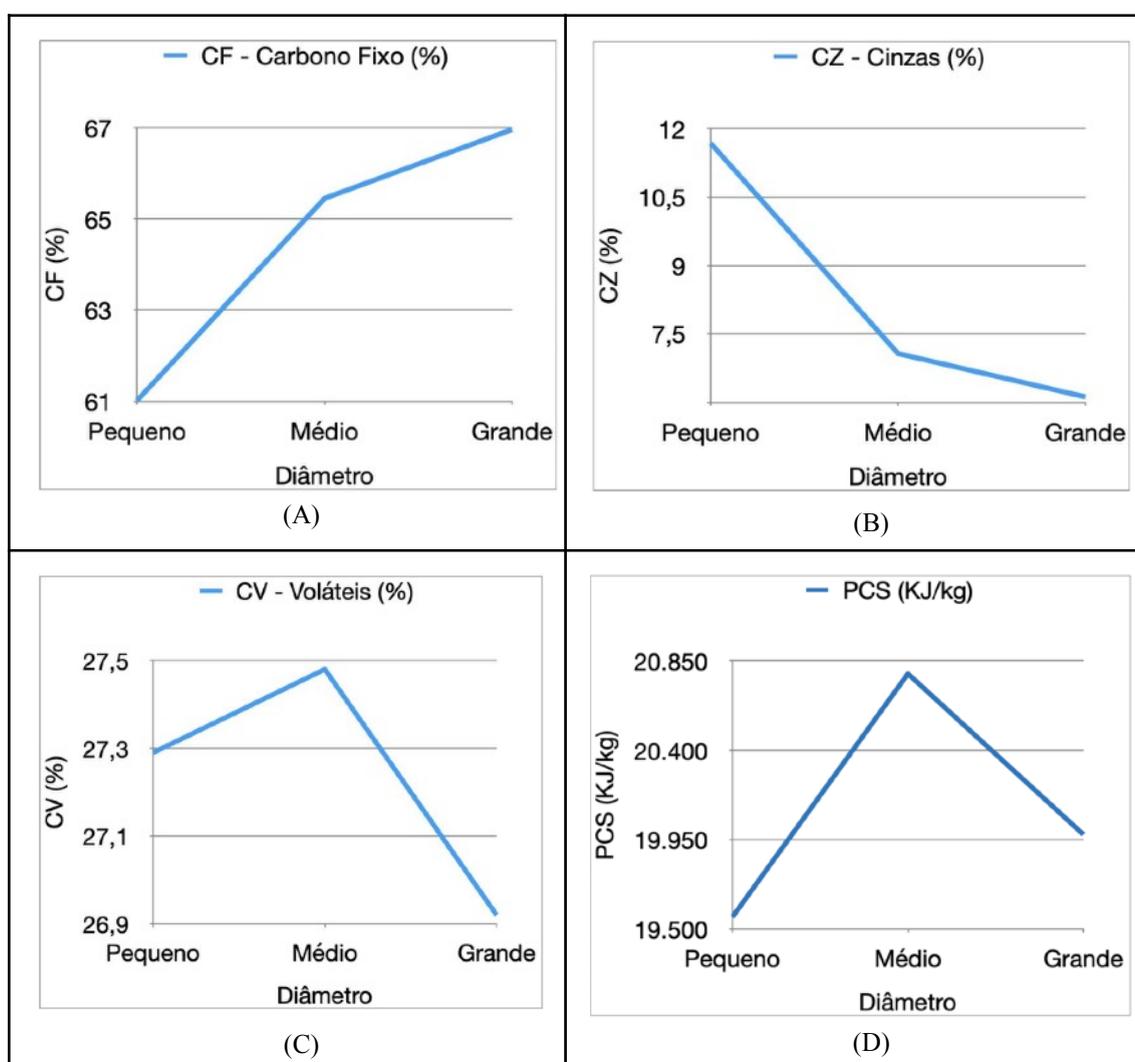
Figura 4.7 - Quantidade de cerne e albúrnio presente em cada amostra. Figura (A) amostra de diâmetro pequeno (5 cm); figura (B) amostra diâmetro médio (25 cm); figura (C) amostra diâmetro grande (45 cm).



Na Figura 4.7 é possível perceber a disparidade de albúrnio (representado pela seta vermelha) e de cerne (representada pela seta azul), que constituem as diferentes classes de diâmetros. As classes de diâmetro pequeno é totalmente composta por albúrnio, as outras duas (média e grande) tem o cerne como a principal parte de sua constituição.

É possível que essa discrepância de percentual de cerne e albarno entre as classes de diâmetros, tenha contribuído para o percentual elevado de CZ encontrado nos diâmetros menores. O diâmetro pequeno teve 44% a mais de CZ que a média dos outros. Os resultados encontrados nesta pesquisa para CZ e CF apresentaram uma relação inversamente proporcional (Figura 4.8).

Figura 4.8 - Interação entre a análise química imediata de cada classe de diâmetro, com o PCS. (A) Variação do CF em função do diâmetro. (B) Variação do CZ em função do diâmetro. (C) Variação do (CV) em função do diâmetro. (D) Variação do PCS em função do diâmetro.



Fonte: Elaborado pelas Autoras, 2023.

É possível observar a correlação inversa entre CF e CZ. O percentual de carbono fixo aumentou 6,8% do diâmetro pequeno (5 cm) para o diâmetro médio (25 cm), e seguiu aumentando em 2,1% até o diâmetro grande (45 cm). Já o teor de cinzas reduziu com o aumento do diâmetro, diminuiu 39,5% do diâmetro pequeno para o diâmetro médio, seguindo com uma redução de 8,1% do diâmetro médio para o diâmetro grande.

A variação mais expressiva ocorre entre as classes de diâmetros pequeno e médio, para o carbono fixo (CF) e cinzas (CZ). A variação dos resultados entre as classes de diâmetro médio e grande é pequena, comparando com a primeira alteração. Eucalipto obedeceu o mesmo padrão para o CZ e CF diverge (relação diretamente proporcional) (SOARES et al., 2015). Acácia para o CZ teve a mesma relação da pesquisa e CF (aumentou, reduziu e aumentou), discordando dos resultados desta pesquisa (COSTA et al., 2021). Para a espécie Algaroba, Bandara et al. (2022) encontraram valores de CZ para o diâmetro pequeno 1,72%, médio 1,51% e grande 1,37% - o comportamento foi o mesmo encontrado nessa pesquisa, variando de maneira inversa com o diâmetro. Para o CF, obteve-se um comportamento divergente, para o diâmetro pequeno 20,5%, médio 21,4% e grande 15,1%, tendo o menor resultado de CF no maior diâmetro (BANDARA et al., 2022).

Os resultados desta pesquisa indicam haver uma relação entre a redução do teor de cinzas (CZ), com o aumento do percentual de carbono fixo (CF). Quando ocorre o aumento do teor de material inorgânico, representado pelas cinzas, simultaneamente ocorre a redução do CF. Alguns autores sinalizam haver uma relação direta entre o carbono fixo e o poder calorífico (ESTEVES et al., 2022; KUMAR et al., 2011; TONINI et al., 2018). Neste estudo esta relação não foi completamente evidenciada. O PCS aumentou juntamente com o CF do diâmetro menor para o médio e do diâmetro médio para o grande ocorreu uma redução do PCS e aumento do CF (figura 4.8 (A) e (D)). Para a relação entre CZ e PCS alguns autores afirmam ter uma interação inversamente proporcional (DELGADO et al., 2021; GASPAR et al., 2020). Neste estudo foi inversamente proporcional apenas para o diâmetro pequeno e o diâmetro médio (figura 4.7 (B) e (D)). Ao variar o diâmetro médio para o grande a interação foi diretamente proporcional entre CZ e PCS.

A menor discrepância encontrada foi para o teor de materiais voláteis (CV), a variação foi de 0,7% do diâmetro pequeno para o médio e de 2% do médio para o grande. Bandara et al. (2022) estudando a Algaroba identificou encontrou média de variação de CV de 2,2% do diâmetro menor para o diâmetro médio e 8,7% do diâmetro médio para o diâmetro grande. A tendência de variação do CV foi a mesma tendência do PCS em função do diâmetro (menor, maior e menor), (Figura 4.8 C e D). Esse comportamento sinaliza a correlação entre essas duas propriedades.

Estudos afirmam que o CV interfere de maneira positiva no PCS da biomassa (BANDARA et al., 2022; COSTA et al., 2021; ELOY et al., 2017). Estes autores encontraram uma relação direta entre o teor de voláteis e poder calorífico superior, concordando com os resultados desta pesquisa. Outros estudos divergiram dos resultados encontrados nesta pesquisa. Esteves et al. (2022) avaliaram em Portugal a espécie *P. Tomentosa* e Kumar et al. (2011) ao estudar clones de Eucalipto e Acácia não encontraram uma relação direta entre PCS e CV. esses autores asseguram que o aumento do CF ido CV atribuem uma combustão mais efetiva na caldeira de biomassa. Avaliando os resultados obtidos com esta pesquisa, foi possível verificar que há grande divergência de comportamento das propriedades energéticas com a variação dos diâmetros.

Este estudo ao avaliar as propriedades energéticas das misturas de diferentes diâmetros, pode trazer um novo horizonte de investigação. Ficou evidenciado que a interação entre as misturas de diâmetros provocam um comportamento não previsto pela literatura. Isso ocorre provavelmente por interações químicas entre essas misturas, as quais ainda são desconhecidas no meio científico e precisam ser investigadas. Ao investigar misturas de diâmetros, este estudo simulou as condições reais de processos industriais que utilizam energia de biomassa. Essa pesquisa contribuiu com o avanço tecnológico e utilização mais eficiente e sustentável da biomassa de Algaroba, buscando trazer um retorno para a sociedade.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou as propriedades energéticas de misturas de diferentes classes de diâmetro, (pequeno, médio e grande). Foi realizado um experimento de mistura para avaliar o poder calorífico superior (PCS) das interações. Foi realizada a análise química elementar, a qual avaliou o PCS, teor de cinzas (CZ), material volátil (CM) e carbono fixo (CF) dos três diâmetros.

O melhor resultado de PCS do experimento foi encontrado na mistura dos três diâmetros, sendo $\frac{2}{3}$ do diâmetro pequeno misturado com $\frac{1}{3}$ dos outros dois diâmetros, (50% médio e 50% grande). Ocorreu uma interação positiva na mistura dos 3 diâmetros. O resultado mais baixo de PCS foi apresentado na mistura entre o diâmetro pequeno e grande, sendo $\frac{1}{3}$ do pequeno com $\frac{2}{3}$ do diâmetro grande. Ocorreu uma interação negativa na mistura do diâmetro pequeno com o grande.

O teor de voláteis (CV) foi a única propriedade que apresentou uma correlação direta com o PCS. Ambas obedeceram a mesma tendência de variação em função dos diâmetros isolados. O diâmetro pequeno teve o menor resultado, o médio obteve o maior resultado e o diâmetro grande voltou a reduzir o valor, este comportamento ocorreu para as duas variáveis CV e PCS. A amplitude entre os resultados para as duas variáveis foram baixas 5,9% para o PCS e 2,7% para o CV.

O teor de cinzas (CZ) foi a variável com maior discrepância dos resultados entre as classes de diâmetros, 47,6% de variação entre os valores. Ocorreu uma correlação entre CZ e o CF para a maneira como ocorreu a variação dos resultados entre os diâmetros. A interação entre essa variável foi inversamente proporcional. O CZ apresentou o maior resultado para o diâmetro pequeno, reduzindo com o aumento do diâmetro. O CF teve um comportamento inverso, o maior resultado foi encontrado para o maior diâmetro, reduzindo os valores achados com a redução do diâmetro.

Ao avaliar o comportamento do PCS para os diâmetros individuais, foi possível identificar resultados de PCS distintos com a interação das misturas dos diâmetros. Ocorre algum tipo de interação das propriedades químicas entre as classes diamétricas que interferem na tendência dos resultados de PCS obtidos com os diâmetros individuais.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se realizar um experimento de misturas para a análise química imediata, e averiguar se ocorrem interferências dos resultados ao misturar os diâmetros. Sugere-se também investigar quais são as interações químicas ou outros fatores que acarretam na alteração da tendência do PCS, quando avaliado somente as classes de diâmetros individuais. Esse estudo teve caráter precursor em avaliar a interação de misturas de diâmetros nas propriedades energéticas da Algaroba. Novas pesquisas para a espécie Algaroba e para outras espécies, são relevantes para compreender as interações entre diferentes diâmetros e propriedades energéticas nas biomassas lignocelulósicas.

4.5 AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao Laboratório de Fabricação Digital (FABLAB), Laboratório de Carvão Ativado (LCA), e Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LABMAQ), da Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

REFERÊNCIAS

- ABDULAH, M. M.; UTE, J. A.; REGASA, T. Prosopis juliflora L: distribution, impacts and available control methods in Ethiopia. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, 20, n. 1, p. 75-89, 2017. ISSN 1870-0462 Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93950595002>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929 - Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.
- ACUNA, M. *et al.* Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. **Current Forestry Reports**, 5, n. 3, p. 124-141, Sep 2019. Review. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40725-019-00093-4>.
- AHMED, A. *et al.* Valorization of underutilized waste biomass from invasive species to produce biochar for energy and other value-added applications. **Environmental Research**, 186, p. 11, Jul 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109596>.
- ASMARE, B. M.; TESEMMA, M. N.; GEBREMARIAM, S. N.; ENDALAMAW, T. B. Comparison of calorific values and physico-chemical properties among three age groups and height positions of Acacia decurrens (Willd). **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 10, 2022. Article; Early Access. DOI:<https://doi.org/10.1007/s13399-021-02242-x>.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard D-1762, 1984 (2007)**. Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard D5865, 1998 (2013)**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard E872, 1982 (2006)**, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard**

BURSZTYN, M. A difícil sustentabilidade: política energética e conflitos ambientais. Editora Garamond, 2018. ISSN:8586435597.

CÂMARA, A. P.; VIDAURRE, G. B.; MOULIN, J. C.; DOS SANTOS BOBADILHA, G. **A relação cerne e alburno na madeira de eucalipto**. 2020. 70 p. (Graziela Baptista Vidaurre João Gabriel Missia da Silva Jordão Cabral Moulin. ISSN:978-65-88077-04-7.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Potential energy of Eucalyptus sp. wood according to age and different genetic materials. **Revista Arvore**, 38, n. 2, p. 375-381, 2014. Article DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.

CARNEIRO-JUNIOR, J. A. D. M. *et al.* Valorization of prosopis juliflora woody biomass in northeast brazilian through dry torrefaction. **Energies**, 14, n. 12, p. 3465, 2021. DOI:<https://doi.org/10.3390/en14123465>.

CARVALHO, D. E.; SCHROEDER, F.; FRANÇA, R. F.; SIVA, D. D. A. Qualidade energética de cavacos de Pinus spp. em diferentes condições de armazenamento. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, 35, n. 2, p. 236-245, 2020. DOI:<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n2p236-245>.

CARVALHO, M.; ARAÚJO, Y. R. V.; DE GÓIS, M. L.; JUNIOR, L. M. C. Urban pruning waste: Carbon footprint associated with energy generation and prospects for clean development mechanisms. **Revista Arvore**, 43, n. 4, 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400005>.

CAVALCANTE, F. P. *et al.* PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE PAU-BRASIL (PAUBRASILIA ECHINATA). **MADEIRAS NATIVAS E PLANTADAS DO BRASIL: QUALIDADE, PESQUISAS E ATUALIDADES**, 1, n. 1, p. 42-61, 2021. DOI:<https://doi.org/10.37885/210303813>.

CAVALCANTI, I. L. R.; MOURA, I. A. A. D.; CRUZ, A. D. D.; SILVA, M. C. D.; LOPES, R. M. B. P. Caracterização química do resíduo da biomassa da algaroba para fins de estudos energéticos. **Brazilian Journal of Development**, 6, n. 1, p. 872-881, 2020. DOI:<https://doi.org/10.34117/bjdvn1-061>.

CIRILO, N. R. M. *et al.* Caracterização da madeira de Prosopis juliflora utilizada na indústria de cerâmica vermelha no semi-árido brasileiro. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, 16, n. 4, p. 178-182, 2021.

DOI:<https://doi.org/10.30969/acsa.v16i4.1303>.

CLIMATE-DATA. Clima: Conde. Elaborado por AM ONLINE PROJECTS - ALEXANDER MERKEL 2021.

COSTA, S. *et al.* Energy properties of the biomass of *Acacia mearnsii* De Wild. in different ages and sites of cultivation. **Scientia Forestalis**, 49, n. 131, p. 15, Sep 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.04>.

COUTO, A. M. *et al.* Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, 34, n. 2, p. 531-538, 2023/04/01 2023. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-022-01462-9>.

DELGADO, O. T. *et al.* CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E SUAS INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA: UM REFERENCIAL TEÓRICO. **MADEIRAS NATIVAS E PLANTADAS DO BRASIL: QUALIDADE, PESQUISAS E ATUALIDADES-VOLUME 2**, 2, n. 1, p. 14-31, 2021. DOI:<https://doi.org/10.37885/211006363>.

DONATO, D. B. *et al.* Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, 11, n. 2, 2020. DOI:<https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p63-73>.

ELOY, E.; DA SILVA, D. A.; CARON, B. O. Produção e qualidade da biomassa de florestas energéticas no norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **FLORESTA**, 52, n. 3, p. 457-465, 2022. DOI:<https://doi.org/10.5380/ufv.v52i3.86799>.

ELOY, E.; DA SILVA, D. A.; CARON, B. O.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F. Age and tree spacing and their effects on energy properties of *Ateleia glazioviana*. **Ciência Rural**, 47, n. 9, p. 9, 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160378>.

ELOY, E. *et al.* EFFECT OF PLANTING AGE AND SPACING ON ENERGY PROPERTIES OF *Eucalyptus grandis* W. Hill EX Maiden. **Revista Arvore**, 40, n. 4, p. 749-758, Jul-Aug 2016. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400019>.

ELOY, E.; SILVA, D. A. D.; CARON, B. O.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, 42, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1590/1806-90882018000200014>.

ERBER, G. *et al.* Comparing Two Different Approaches in Modeling Small Diameter Energy Wood Drying in Logwood Piles. **Croatian Journal of Forest Engineering**, 35, n. 1, p. 15-22, Mar 2014. Article. ISSN:1845-5719

ESTEVEZ, B. *et al.* The Influence of Age on the Wood Properties of *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud. **Forests**, 13, n. 5, p. 12, May 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/f13050700>.

EUFRADE-JUNIOR, H. D. J. *et al.* Impact of rainy and dry seasons on eucalypt fuelwood quality logs stored in piles: a case study in Brazil. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, 42, n. 2, p. 291-300, 2021. DOI:<https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.776>.

FERREIRA, J. C.; STÄHELIN, T. S. F.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; DE MUÑIZ, G. I. B. Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Floresta**, 46, n. 2, p. 269-276, 2016. DOI:<https://doi.org/10.5380/ufv.v46i2.41208>.

FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; ANJOS, R. A. M. D. Physical and chemical properties of heartwood and sapwood of *Cryptomeria japonica*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 16, n. 3, p. 277-285, 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.5965/223811711632017277>.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, 36, p. 577-582, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300020>.

GASPAR, M. C. *et al.* Impact of the pinewood nematode on naturally-emitted volatiles and scCO₂ extracts from *Pinus pinaster* branches: a comparison with *P. pinea*. **Journal of Supercritical Fluids**, 159, p. 12, May 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104784>.

KHAN, I.; ZAKARI, A.; AHMAD, M.; IRFAN, M.; HOU, F. J. Linking energy transitions, energy consumption, and environmental sustainability in OECD countries. **Gondwana Research**, 103, p. 445-457, Mar 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.10.026>.

KLAVINA, A.; SELEGOVSKIS, R. Influence of wood chip quality on boiler house efficiency. *Latvia University of Life Sciences and Technologies*. 202. DOI:<https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF082>

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; VILKOVSKY, P.; HYSEK, S. Structural Differences between Reaction Wood and Opposite Wood with Different Drying Temperatures. **Bioresources**, 15, n. 2, p. 4407-4416, May 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4407-4416>.

KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, Acacia auriculaeformis and Casuarina equisetifolia. **Biomass & Bioenergy**, 35, n. 3, p. 1339-1344, Mar 2011. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.031>.

LI, Y. F. *et al.* Chemical Characteristics of Heartwood and Sapwood of Red-Heart Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*). **Forest Products Journal**, 69, n. 2, p. 103-109, 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.13073/fpj-d-18-00042>.

LIMA, J. V. *et al.* SECAGEM DA MADEIRA EM TORA DE EUCALYPTUS SPP. PARA FINS ENERGÉTICOS. MADEIRAS NATIVAS E PLANTADAS DO BRASIL: QUALIDADE, PESQUISAS E ATUALIDADES, 1, n. 1, p. 420-435, 2021. DOI:<https://doi.org/10.37885/210504636>.

LIMA, P. C. F. Manejo de áreas individuais de algaroba: plano de manejo. **Embrapa Semiárido- Outras publicações científicas (ALICE)**, 2006.

LOPES, E. D. *et al.* Potencial energético da madeira de clones de Eucalyptus e Corymbia em diferentes espaçamentos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 17, n. 3, p. e1278-e1278, 2022. DOI:<https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a1278>.

MAKSIMUK, Y.; ANTONAVA, Z.; KROUK, V.; KORSAKOVA, A.; KURSEVICH, V. Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. **Fuel**, 299, p. 7, Sep 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120860>.

MIRANDA, D. L. C. *et al.* Porcentagem de cerne, alborno e casca de cinco espécies madeireiras da Amazônia. **Nativa**, 5, p. 619-627, 2017. DOI:<https://doi.org/10.31413/nativa.v5i7.4788>.

MONTEIRO, T. C. *et al.* Drying kinetics in Eucalyptus urophylla wood: analysis of anisotropy and region of the stem. **Drying Technology**, 40, n. 10, p. 2046-2057, 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1918145>.

MOYA, R.; TENORIO, C. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. **Biomass & Bioenergy**, 56, p. 14-21, Sep 2013. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.013>.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; DA CUNHA, A. B.; DE CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, 45, n. 1, p. 57-64, 2014.
DOI:<https://doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157>.

NUNES, L. J. R.; RODRIGUES, A. M.; LOUREIRO, L.; SA, L. C. R.; MATIAS, J. C. O. Energy Recovery from Invasive Species: Creation of Value Chains to Promote Control and Eradication. **Recycling**, 6, n. 1, p. 18, Mar 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/recycling6010021>.

PÉREZ, A.; RUIZ, B.; FUENTE, E.; CALVO, L. F.; PANIAGUA, S. Pyrolysis technology for *Cortaderia selloana* invasive species. Prospects in the biomass energy sector. **Renewable Energy**, 169, p. 178-190, 2021.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.015>.

PROTÁSIO, T. D. P. *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 31, n. 66, p. 113-113, 2011. DOI:<https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>.

RAVHUHALI, K. E.; MUDAU, H. S.; MOYO, B.; HAWU, O.; MSIZA, N. H. *Prosopis* Species-An Invasive Species and a Potential Source of Browse for Livestock in Semi-Arid Areas of South Africa. **Sustainability**, 13, n. 13, p. 13, Jul 2021. Review. DOI:<https://doi.org/10.3390/su13137369>.

RAY, P. Renewable energy and sustainability. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 21, n. 8, p. 1517-1533, Oct 2019. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s10098-019-01739-4>.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; RACHID-CASNATI, C. Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. **New Forests**, 51, n. 4, p. 631-655, Jul 2020. Article. DOI:[10.1007/s11056-019-09749-2](https://doi.org/10.1007/s11056-019-09749-2).
RIBEIRO, P. E. A. Aglomeração de Cinzas numa Caldeira a Pellets: Influência da Temperatura e do Fluxo de ar. 2012. - Disponível em: <https://hdl.handle.net/>

[1822/22600](#).

RÓZ, A. L. D.; RICARDO, J. F.; NAKASHIMA, G. T.; SANTOS, L. R.; YAMAJI, F. M. Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19, p. 810-814, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p810-814>.

SANTOS, R. C. D. *et al.* Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, 26, p. 657-669, 2016. DOI:<https://doi.org/10.5902/1980509822765>.

SHARMA, S.; SHARMA, M.; MUDGAL, D.; BHOWMICK, H. Adoption of strategies for clean combustion of biomass in boilers. **Corrosion Reviews**, 39, n. 5, p. 387-408, Oct 2021. DOI:<https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0095>.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, 21, p. 191-197, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, 38, p. 543-549, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.

SSEREMBA, O. E.; MUGABI, P.; BANANA, A. Y.; WESSELS, B. C.; PLESSIS, M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood. **Journal of Forestry Research**, 32, n. 2, p. 503-512, Apr 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; MAGALHAES, C. A. D.; DE OLIVEIRA, J. M. F. Growth, biomass, and energy quality of *Acacia mangium* timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53, n. 7, p. 791-799, Jul 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000700002>.

TREASURE, A. M.; LE ROUX, P. C.; MASHAU, M. H.; CHOWN, S. L. Species-energy relationships of indigenous and invasive species may arise in different ways - a demonstration using springtails. **Scientific Reports**, 9, p. 12, Sep 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48871-1>.

VENEGA, R. D. *et al.* Energy Quality of Wood and Charcoal from the Stem and Root of Eucalyptus spp. **Floresta E Ambiente**, 30, n. 1, p. 8, 2023. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2022-0031>.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C. D.; VALLE, M. L. A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (Schizolobium amazonicum). **Revista Árvore**, 36, p. 365-371, 2012.

DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200018>.

ZENG, W. S.; TANG, S. Z.; XIAO, Q. H. Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China. **Journal of Forestry Research**, 25, n. 4, p. 779-786, Dec 2014. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-014-0525-3>.

ZHANG, D. Y.; KONG, Q. X. Renewable energy policy, green investment, and sustainability of energy firms. **Renewable Energy**, 192, p. 118-133, Jun 2022. Article.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.092>.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou parâmetros com potencial de interferir na eficiência energética da Algaroba, para ser utilizada como fonte de energia renovável. Eficiência de combustão na caldeira de geração de vapor, comportamento de secagem e propriedades energéticas, foram investigadas. Esta pesquisa foi pioneira em caracterizar o comportamento da Algaroba para fins energéticos sobre condições e solicitações distintas.

Esta pesquisa foi precursora no estudo da eficiência de estocagem da espécie Algaroba. Avaliou-se a influência do tempo de armazenamento da biomassa na eficiência da sua combustão em um processo de geração de vapor. Foi evidenciado que ao reduzir o teor de umidade estocando a biomassa, ocorre um aumento expressivo na eficiência energética do processo de geração de vapor.

Após 45 dias de estocagem iniciou-se o ataque de agentes xilófagos na Algaroba armazenada ao ar livre. Mesmo com a perda de massa observada nas pilhas de secagem, ocorreu um aumento do rendimento da lenha na caldeira. Mostrando que armazenar a lenha é uma possibilidade eficaz para um consumo sustentável da Algaroba como fonte de energia de biomassa. Desta maneira é possível reduzir a demanda de biomassa necessária para o processo produtivo da indústria. Armazenar a Algaroba é uma alternativa efetiva para redução de custo na operação de geração de vapor. A prática de estocar a biomassa de Algaroba contribui para a conservação dos recursos naturais e torna sua utilização mais sustentável.

O segundo estudo foi realizado para investigar o comportamento de secagem da Algaroba em função da estação do ano, microclima e condições de armazenamento. Na literatura científica existem estudos destes parâmetros com outras espécies, porém este foi o primeiro realizado com Algaroba. Após a secagem da biomassa por 90 dias em cada uma das conjunturas do experimento, foi traçado um desempenho de secagem em função das variáveis investigadas. A melhor condição de secagem ficou compreendida

na estação seca, tanto em Pendências-RN, como no Conde-PB. Para as diferentes regiões durante a estação seca, não ocorreu variação estatística significativa. Para a estação seca o microclima é irrelevante, podendo secar a biomassa em qualquer uma das duas regiões, sem prejuízos no processo de secagem.

A principal influência no comportamento de secagem ao ar livre da Algaroba, foi as diferentes estações do ano, seca e chuvosa. A estação seca acarretou uma secagem mais efetiva que a estação chuvosa. A interação do microclima (região de Pendências e Conde) foi distinta nas diferentes estações. O conde obteve uma secagem ao final dos 90 dias 14% melhor na estação seca. Em Pendências a secagem da Algaroba ao ar livre foi 4% melhor na estação seca. Ficou evidenciado que as condições de armazenamento para a secagem ao ar livre (microclima e estações do ano), interferem no comportamento de secagem da Algaroba. Durante o período chuvoso não é vantajoso secar a Algaroba por um período superior a 60 dias na região do conde. Para o período de secas o tempo ideal de secagem ficou em 90 dias tanto no Conde como em Pendências.

No terceiro estudo foi realizada uma metodologia inovadora para investigar a influência do diâmetro da Algaroba, nas propriedades energéticas. Utilizou-se um experimento de misturas de diâmetros para a caracterização das propriedades energéticas da Algaroba em função de três classes de diâmetros (pequeno 5 cm, médio 25 cm e grande 45 cm). Foram feitas análises de PCS e análise química imediata para avaliar a interferência do diâmetro e da mistura dos diâmetros nas variáveis investigadas.

O poder calorífico superior (PCS) foi influenciado pela mistura de diâmetros, sendo o melhor resultado encontrado na mistura (67% diâmetro pequeno, 17% do médio e 17% do diâmetro grande). Para os diâmetros individuais, o diâmetro médio foi o que apresentou o maior resultado de PCS. Indicando uma interação das propriedades químicas ao misturar os diferentes diâmetros, as quais interferem no resultado do PCS. Quanto à análise química imediata, o teor de cinzas foi a propriedade que sofreu maior influência da variação dos diâmetros. O diâmetro pequeno apresentou 44% a mais de teor de cinzas (CZ), que a média dos outros (médio e grande). O CZ obteve correlação inversamente proporcional com o carbono fixo (CF). O CF e o teor de matérias voláteis (CV) tiram pouca variação nas diferentes classes de diâmetros, 8,9% e 2%

respectivamente. O CV apresentou o mesmo comportamento do PCS em função da variação dos diâmetros. A variação de PCS foi pequena de 5,9% entre as diferentes configurações de misturas. Estes resultados indicam que toda a extensão da árvore da espécie Algaroba pode ser utilizada para energia de biomassa na caldeira, sem prejudicar a eficiência do processo. Recomenda-se o planejamento adequado da remoção de cinzas ao utilizar um volume maior dos diâmetros pequenos.

Sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência da perda de massa ao longo do período de estocagem. Determinar o período ótimo de estocagem considerando as variáveis eficiência energética, custo de armazenamento e perda de massa.
- Investigar o comportamento de secagem da Algaroba em função das variáveis meteorológicas; a fim de obter equações que permitam prever o teor de umidade para diferentes condições de armazenamento ao ar livre (em um intervalo de tempo superior ao realizado nesta pesquisa). Propõe-se também a realização de diferentes metodologias de aferição do teor de umidade, comparando o método gravimétrico, peso de balança experimental in loco e medição com medidor portátil Umilog M65. Avaliar a interferência do sistema de medição de umidade, nos resultados obtidos. Sugere-se uma pesquisa realizada em um intervalo de tempo anual, contemplando todas as condições climáticas ao longo do ano.
- Realizar um experimento de misturas para a análise química imediata, e averiguar se ocorrem interferências dos resultados ao misturar os diâmetros. Sugere-se também investigar quais são as interações químicas ou outros fatores que acarretam na alteração da tendência do PCS, comparando com as classes de diâmetros individuais. Esse estudo teve caráter precursor em avaliar a interação de misturas de diâmetros nas propriedades energéticas da Algaroba. Novas pesquisas para a espécie Algaroba e para outras espécies, são relevantes para compreender as interações entre diferentes diâmetros e propriedades energéticas nas biomassas lignocelulósicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO

- ABDULAH, M. M.; UTE, J. A.; REGASA, T. Prosopis juliflora L: distribution, impacts and available control methods in Ethiopia. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, 20, n. 1, p. 75-89, 2017. ISSN 1870-0462 Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93950595002>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929 - Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.
- ABREU NETO, R. D.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M. A technical note on the effect of log length on the drying of Eucalyptus urophylla. **Australian Forestry**, 84, n. 4, p. 175-181, 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/00049158.2021.1975907>.
- ACUNA, M. *et al.* Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. **Current Forestry Reports**, 5, n. 3, p. 124-141, Sep 2019. Review. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40725-019-00093-4>.
- AHMADINIA, S. *et al.* Forest chip drying in self-heating piles during storage as affected by temperature and relative humidity conditions. **Fuel**, 324, p. 11, Sep 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124419>.
- AHMED, A. *et al.* Valorization of underutilized waste biomass from invasive species to produce biochar for energy and other value-added applications. **Environmental Research**, 186, p. 11, Jul 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109596>.
- AIELLO, R. G. *et al.* Avaliação de medidor portátil de umidade para toras segundo três classes de diâmetro. In: **IX JORNACITEC-Jornada Científica e Tecnológica**. 2020. ISSN 2318-536X
- ANERUD, E.; JIRJIS, R.; LARSSON, G.; ELIASSON, L. Fuel quality of stored wood chips – Influence of semi-permeable covering material. **Applied Energy**, 231, p. 628-634, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.157>.

ARAÚJO, Y. R. V.; DE GÓIS, M. L.; JUNIOR, L. M. C.; CARVALHO, M. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. **Environmental Science and Pollution Research**, 25, n. 2, p. 1863-1868, 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0613-y>.

ASMARE, B. M.; TESEMMA, M. N.; GEBREMARIAM, S. N.; ENDALAMAW, T.B. Comparison of calorific values and physico-chemical properties among three age groups and height positions of *Acacia decurrens* (Willd). **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 10, 2022. Article; Early Access. DOI:<https://doi.org/10.1007/s13399-021-02242-x>.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard D-1762, 1984 (2007)**. Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007. 2 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard D5865, 1998 (2013)**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard E872, 1982 (2006)**, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard E1755, 2001 (2007)**, Standard Test Method for Ash in Biomass. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

BANDARA, W.; RANASINGHE, O.; PERERA, P.; VLOSKY, R.; KIZHA, A. R. Potential to use invasive plants in biomass energy production: A case study *Prosopis juliflora* in coastal wetlands of Sri Lanka. **Trees Forests and People**, 10, p. 9, Dec 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100330>.

BATISTA DA FONSECA, C. M. *et al.* Potencial energético do carvão do *Ziziphus joazeiro* (Martius) e da *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. **Ciência Florestal (01039954)**, 30, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050985070>

BENIN, C. C.; LUCIO, D. D.; WATZLAWICK, L. F.; DE LIMA, V. A. Energy properties of *Eucalyptus benthamii* wood based on tree age and region in Guarapuava, Parana state, Brazil. **Southern Forests-a Journal of Forest Science**, 83, n. 4, p. 264-268, Oct 2021. DOI:<https://doi.org/10.2989/20702620.2021.1994340>.

BENOUADAH, N.; ALIOUCHE, D.; PRANOVICH, A.; WILLFOR, S. Chemical characterization of *Pinus halepensis* sapwood and heartwood. **Wood Material Science**

& Engineering, 14, n. 3, p. 157-164, May 2019. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1448436>.

BERGMAN, R. Drying and control of moisture content and dimensional changes.
Chapter 13 in FPL-GTR-282, p. 13-11, 2021. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1MFWzQXN-xrZ3Z7FmkSVH4zyuczViWiDh/view>

BEZAREDIE, D.; TADESSE, Z.; TADESSE, Z. Effects of prosopis juliflora on plant diversity on rangeland in Shilabo District, Somali Regional State, Ethiopia. **Heliyon**, 9, n. 3, 2023. Article. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14049>.

BHATIA, N. P.; ADHOLEYA, A.; SHARMA, A. Biomass production and changes in soil productivity during longterm cultivation of Prosopis juliflora (Swartz) DC inoculated with VA mycorrhiza and Rhizobium spp. in a semi-arid wasteland. **Biology and Fertility of Soils**, 26, n. 3, p. 208-214, Feb 1998. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s003740050369>.

BONAZZA, M.; SAMPIETRO, J. A.; VIVIAN, M. A.; SILVESTRE, R.; MODES, K. S. Efeito da idade, sortimento e tempo de estocagem na densidade verde da madeira de Pinus taeda L. **Ciência Florestal**, 32, p. 735-756, 2022. DOI:<https://doi.org/10.5902/1980509848083>.

BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Energia na Agricultura**, 32, n. 2, p. 132-140, 2017. DOI:<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n2p132-140>.

BRANDA, M. A.; BRITO, J. O.; QUIRINO, W. F.; DE MUÑIZ, G. I. B. Influence of the storage season over the quality of wood fuel. **Floresta**, 42, n. 2, p. 369-380, 2012. Article. DOI:<https://doi.org/10.5380/rf.v42i2.17597>.

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de Tectona grandis e Acacia mangium ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, 22, p. 117-123, 2015.

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Characteristic air drying curve for Tectona grandis and Acacia mangium lumber. **Floresta e Ambiente**, 22, n. 1, p. 117-123, 2015. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/2179-8087.037913>.

BRITO, A. S.; SILVA, J.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F. **Influência da idade nas propriedades da madeira de eucalipto**. 2020. 103-131 p. (VIDAURRE, GB;

SILVA, JGM; MOULIN, JC; CARNEIRO, ACO Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil. Vitória: Ed. EDUFES. ISSN:978-65-88077-04-7.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF, Piracicaba**, 14, n. 14, p. 9-20, 1977.

BURATTI, C. *et al.* Impact of storage on energy performance of laricio pine wood chips: A case study in Italy. **Industrial Crops and Products**, 131, p. 301-306, May 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.066>.

BURNETT, A. DESENVOLVIMENTO REGIONAL: O CASO DA TECNOLOGIA DA ALGAROBA NO SEMIÁRIDO. **Revista Ambivalências**, 6, n. 11, p. 268-291, 2018. DOI:<https://doi.org/10.21665/2318-3888.v6n11p268-291>.

BURSZTYN, M. A difícil sustentabilidade: política energética e conflitos ambientais. Editora Garamond, 2018. ISSN 8586435597.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Fly-ash from biomass burning: Applications and potentialities. **Revista Virtual de Química**, 7, n. 6, p. 2154-2165, 2015. Article. DOI:<https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150127>.

CÂMARA, A. P.; VIDAURRE, G. B.; MOULIN, J. C.; DOS SANTOS BOBADILHA, G. **A relação cerne e alburno na madeira de eucalipto**. 2020. 70 p. (Graziela Baptista Vidaurre João Gabriel Missia da Silva Jordão Cabral Moulin. ISSN:978-65-88077-04-7.

CARLOS, L. K. C.; DIODATO, M. A.; CASTRO, V. G. Durabilidade natural de cinco espécies madeireiras da Caatinga em ensaio de deterioração em campo aberto e natural. **Advances in Forestry Science**, 8, n. 3, p. 1527-1534, 2021. DOI:<https://doi.org/10.34062/afs.v8i3.12631>.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Potential energy of Eucalyptus sp. wood according to age and different genetic materials. **Revista Arvore**, 38, n. 2, p. 375-381, 2014. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.

CARNEIRO-JUNIOR, J. A. D. M. *et al.* Valorization of prosopis juliflora woody biomass in northeast brazilian through dry torrefaction. **Energies**, 14, n. 12, p. 3465, 2021. DOI:<https://doi.org/10.3390/en14123465>.

CARVALHO, D. E.; SCHROEDER, F.; FRANÇA, R. F.; SIVA, D. D. A. Qualidade energética de cavacos de Pinus spp. em diferentes condições de armazenamento.

ENERGIA NA AGRICULTURA, 35, n. 2, p. 236-245, 2020.

DOI:<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n2p236-245>.

CARVALHO, M.; DA SILVA, J. A. M. Second law assessment of a Hoffmann kiln for the red ceramics industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 40, n. 11, 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1444-6>.

CAVALCANTE, A. M. D. *et al.* Study of mesquite grain flour (*Prosopis juliflora* Sw. DC) in hamburger storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, 46, n. 3, p. 11, Mar 2022. Article. DOI:<http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.16377>.

CAVALCANTE, F. P. *et al.* Propriedades Tecnológicas Da Madeira De Cerne E Alburno De Pau-Brasil (*Paubrasilia Echinata*). **Madeiras Nativas E Plantadas Do Brasil: Qualidade, Pesquisas E Atualidades**, 1, n. 1, p. 42-61, 2021.

DOI:<https://doi.org/10.37885/210303813>.

CAVALCANTI, I. L. R.; MOURA, I. A. A. D.; CRUZ, A. D. D.; SILVA, M. C. D.; LOPES, R. M. B. P. Caracterização química do resíduo da biomassa da algaroba para fins de estudos energéticos. **Brazilian Journal of Development**, 6, n. 1, p. 872-881, 2020. DOI:<https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-061>.

CHEN, D. *et al.* Insight into a new phenolic-leaching pretreatment on bamboo pyrolysis: Release characteristics of pyrolytic volatiles, upgradation of three phase products, migration of elements, and energy yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 136, p. 110444, 2021.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110444>.

CHEN, W.; ANNAMALAI, K.; ANSLEY, R. J.; MIRIK, M. Updraft fixed bed gasification of mesquite and juniper wood samples. **Energy**, 41, n. 1, p. 454-461, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.052>.

CIRILO, N. R. M. *et al.* Caracterização da madeira de *Prosopis juliflora* utilizada na indústria de cerâmica vermelha no semi-árido brasileiro. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, 16, n. 4, p. 178-182, 2021.

DOI:<https://doi.org/10.30969/acsa.v16i4.1303>.

CLIMATE-DATA. Clima: Conde. Elaborado por AM ONLINE PROJECTS -

ALEXANDER MERKEL 2021.

COCUSSE, M. *et al.* Two-step diffusion in cellular hygroscopic (vascular plant-like) materials. **Science Advances**, 8, n. 19, p. 16, May 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7830>.

COSTA, S. *et al.* Energy properties of the biomass of *Acacia mearnsii* De Wild. in different ages and sites of cultivation. **Scientia Forestalis**, 49, n. 131, p. 15, Sep 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.04>.

COUTO, A. M. *et al.* Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, 34, n. 2, p. 531-538, 2023/04/01 2023. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-022-01462-9>.

CRUZ, M. L. D.; OLIVEIRA SIQUEIRA, A. M. D.; CAMPOS, J. C. C.; SILVA, C. L. D. Estudo da eficiência energética de uma caldeira flamotubular em uma indústria de laticínios. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 8, n. 2, p. 14015-14001e, 2022. DOI:<https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss2pp14015-01e>.

DACKERMANN, U.; ELSENER, R.; LI, J.; CREWS, K. A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. **Construction and Building Materials**, 102, p. 963-976, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>.

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia-7. Penso Editora, 2018. ISSN:9781292128856.

DELGADO, O. T. *et al.* Características Anatômicas E Suas Influências Nas Propriedades Da Madeira: Um Referencial Teórico. **Madeiras Nativas E Plantadas Do Brasil: Qualidade, Pesquisas E Atualidades-Volume 2**, 2, n. 1, p. 14-31, 2021. DOI:<https://doi.org/10.37885/211006363>.

DIAS, J. E. **Entrevista**. 04/06/2022 2021.

DONATO, D. B. *et al.* Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, 11, n. 2, 2020.10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p63-73.

DONG, F. *et al.* How green technology innovation affects carbon emission efficiency: evidence from developed countries proposing carbon neutrality targets. **Environmental**

Science and Pollution Research, 29, n. 24, p. 35780-35799, 2022.
Article.10.1007/s11356-022-18581-9.

ELOY, E.; DA SILVA, D. A.; CARON, B. O. Produção e qualidade da biomassa de florestas energéticas no norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **FLORESTA**, 52, n. 3, p. 457-465, 2022. DOI:<https://doi.org/10.5380/ufv.v52i3.86799>.

ELOY, E.; DA SILVA, D. A.; CARON, B. O.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F. Age and tree spacing and their effects on energy properties of *Ateleia glazioviana*. **Ciencia Rural**, 47, n. 9, p. 9, 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160378>

ELOY, E. *et al.* Effect Of Planting Age And Spacing On Energy Properties Of *Eucalyptus grandis* W. Hill EX Maiden. **Revista Arvore**, 40, n. 4, p. 749-758, Jul-Aug 2016. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400019>.

ELOY, E.; SILVA, D. A. D.; CARON, B. O.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, 42, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1590/1806-90882018000200014>.

EPE, E. D. P. E.-. Mudanças climáticas e Transição energética. ABCDEnergia. 2021.

ERBER, G.; HOLZLEITNER, F.; KASTNER, M.; STAMPFER, K. Impact of Different Time Interval Bases on the Accuracy of Meteorological Data Based Drying Models for Oak (*Quercus L.*) Logs Stored in Piles for Energy Purposes. **Croatian Journal of Forest Engineering**, 38, n. 1, p. 1-9, Jan 2017. Article.

ERBER, G. *et al.* Comparing Two Different Approaches in Modeling Small Diameter Energy Wood Drying in Logwood Piles. **Croatian Journal of Forest Engineering**, 35, n. 1, p. 15-22, Mar 2014. Article.

ESTEVES, B. *et al.* The Influence of Age on the Wood Properties of *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud. **Forests**, 13, n. 5, p. 12, May 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/f13050700>.

EUFRADE-JUNIOR, H. D. J. **Predição e controle da umidade da madeira para otimização da cadeia produtiva de energia de eucalipto**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Sao Paulo, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/182137> .

EUFRADE-JUNIOR, H. D. J. *et al.* Impact of rainy and dry seasons on eucalypt fuelwood quality logs stored in piles: a case study in Brazil. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, 42, n. 2, p. 291-300, 2021. DOI:<https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.776>.

FERREIRA, I. T.; SCHIRMER, W. N.; DE OLIVEIRA MACHADO, G.; GUERI, M. V. D. Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, 3, n. 4, 2014. DOI:<https://doi.org/10.5380/rber.v3i4.38618>.

FERREIRA, J. C.; STÄHELIN, T. S. F.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; DE MUÑIZ, G. I. B. Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Floresta**, 46, n. 2, p. 269-276, 2016. DOI:<https://doi.org/10.5380/uf.v46i2.41208>

FIDELIS, M. A. B. **Modelo de mercado brasileiro de gás natural: gradações de poder de mercado no lado da oferta**. 2021. Dissertação (Mestrado em Finanças e Economia Empresarial) - Faculdade Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/31496>.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FONSECA, C. M. B. D. *et al.* Potencial energético do carvão do *Ziziphus joazeiro* (Martius) e da *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. **Ciência Florestal**, 30, p. 613-619, 2020. DOI:<https://doi.org/10.5902/198050985070>.

FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; ANJOS, R. A. M. D. Physical and chemical properties of heartwood and sapwood of *Cryptomeria japonica*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 16, n. 3, p. 277-285, 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.5965/223811711632017277>.

FREITAS, G. P. D. **Avaliação regional da exploração de lenha e seu uso na indústria de cerâmica vermelha na Paraíba**. 2019. -, Uiversiade Federal da Paraíba Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18915>.

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, 36, p. 577-582, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300020>.

GASPAR, M. C. *et al.* Impact of the pinewood nematode on naturally-emitted volatiles and scCO₂ extracts from *Pinus pinaster* branches: a comparison with *P. pinea*.

Journal of Supercritical Fluids, 159, p. 12, May 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104784>.

GHAZOUANI, A.; XIA, W.; JEBLI, M. B.; SHAHZAD, U. Exploring the role of carbon taxation policies on co₂ emissions: Contextual evidence from tax implementation and non-implementation european countries. **Sustainability (Switzerland)**, 12, n. 20, p. 1-16, 2020. Article.

DOI:<https://doi.org/10.3390/su12208680>.

GROSSE, W.; LANDGRAF, D.; SCHOLZ, V.; BRUMMACK, J. Ernte und Aufbereitung von Plantagenholz| Harvesting and conditioning of wood from short-rotation plantations. **Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen**, 159, n. 6, p. 140-145, 2008. DOI:<https://doi.org/10.3188/szf.2008.0140>.

GUEDES, T. O.; SILVA, J. R. M. D.; HEIN, P. R. G.; FERREIRA, S. C. Cutting energy required during the mechanical processing of wood species at different drying stages. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 22, n. 4, p. 477-482, 2020.

DOI:<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000406>.

HABIBA, U.; XINBANG, C.; ANWAR, A. Do green technology innovations, financial development, and renewable energy use help to curb carbon emissions? **Renewable Energy**, 2022. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.084>.

HAVILAH, P. R.; SHARMA, P. K.; GOPINATH, M. Combustion characteristics and kinetic parameter estimation of *Lantana camara* by thermogravimetric analysis.

Biofuels, 10, n. 3, p. 365-372, 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1259521>.

HERNANDEZ VELASCO, M.; MATTSSON, A. Light shock stress after outdoor sunlight exposure in seedlings of *Picea abies* (L.) Karst. And *Pinus sylvestris* L. pre-cultivated under LEDs—possible mitigation treatments and their energy consumption.

Forests, 11, n. 3, p. 354, 2020. DOI:<https://doi.org/10.3390/f11030354>.

HILL, C.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L. Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. **Journal of Materials Science**, 56, p. 6581-6614, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>.

HOFMANN, N. *et al.* Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. **Biomass and Bioenergy**, 111, p. 196-205, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.022>.

INMET. tabela estacoes. inmet. METERELOGIA, I. N. D. 2022.

Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

JAKUBOWSKI, M.; PRACZYK, M. Weight loss of logwood piles stored under winter conditions in Poland. **Baltic Forestry**, 28, n. 1, p. 8, 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.46490/bf576>.

JANKOWSKA, A.; DROZDZEK, M.; SARNOWSKI, P.; HORODENSKI, J. Effect of Extractives on the Equilibrium Moisture Content and Shrinkage of Selected Tropical Wood Species. **Bioresources**, 12, n. 1, p. 597-607, 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.15376/biores.12.1.597-607>.

KHAN, I.; ZAKARI, A.; AHMAD, M.; IRFAN, M.; HOU, F. J. Linking energy transitions, energy consumption, and environmental sustainability in OECD countries. **Gondwana Research**, 103, p. 445-457, Mar 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.10.026>.

KILIÇ AK, A.; BEKTAŞ, İ.; ÇIÇEKLER, M.; TUTUŞ, A. Influences of different drying climates on Eucalyptus camaldulensis wood properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, 23, 2021. DOI:<https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100452>.

KING, R. On-line Industrial Applications of Microwave Moisture Sensors. **Sensors update**, 7, n. 1, p. 109-170, 2000. DOI:[https://doi.org/10.1002/1616-8984\(200001\)7](https://doi.org/10.1002/1616-8984(200001)7).

KLAVINA, A.; SELEGOVSKIS, R., 2021, Influence of wood chip quality on boiler house efficiency. Latvia University of Life Sciences and Technologies. DOI:<https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF082>

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; BARANSKI, J.; KONOPKA, A. The impact of drying and steaming processes on surface color changes of tension and normal beech wood. **Drying Technology**, 37, n. 12, p. 1490-1497, Sep 2019. DOI:<https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1509219>.

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; UHRIN, M.; BARANSKI, J.; KONOPKA, A. Impact of high temperature drying process on beech wood containing tension wood. **Open Engineering**, 9, n. 1, p. 428-433, Aug 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1515/eng-2019-0047>.

KLEMENT, I.; VILKOVSKA, T.; VILKOVSKY, P.; HYSEK, S. Structural Differences between Reaction Wood and Opposite Wood with Different Drying Temperatures. **Bioresources**, 15, n. 2, p. 4407-4416, May 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4407-4416>.

KLITZKE, R. J. **Avaliação do carvão da bracinga (*Mimosa scabrella bentham*) em função da idade, do teor de umidade da madeira e da temperatura final de carbonização. 1998, 137 p.** 1998. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1998

KU, N. W.; POPESCU, S. C. A comparison of multiple methods for mapping local-scale mesquite tree aboveground biomass with remotely sensed data. **Biomass and Bioenergy**, 122, p. 270-279, 2019. Article. DOI:

KUMAR, R.; PANDEY, K. K.; CHANDRASHEKAR, N.; MOHAN, S. Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. **Biomass & Bioenergy**, 35, n. 3, p. 1339-1344, Mar 2011. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.031>.

KUMAR, R.; CHANDRASHEKAR, N. Production and characterization of briquettes from invasive forest weeds: *Lantana camara* and *Prosopis juliflora*. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, 17, n. 2, p. 158-164, Dec 2020. Article. DOI:[10.1007/s13196-020-00268-8](https://doi.org/10.1007/s13196-020-00268-8).

LI, Y. F. *et al.* Chemical Characteristics of Heartwood and Sapwood of Red-Heart Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*). **Forest Products Journal**, 69, n. 2, p. 103-109, 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.13073/fpj-d-18-00042>.

LIMA, E. A. D.; ABDALA, E.; WENZEL, A. A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. 2008. ISSN 1517-5030

LIMA, J. V. *et al.* SECAGEM DA MADEIRA EM TORA DE EUCALYPTUS SPP.

PARA FINS ENERGÉTICOS. MADEIRAS NATIVAS E PLANTADAS DO BRASIL: QUALIDADE, PESQUISAS E ATUALIDADES, 1, n. 1, p. 420-435, 2021. DOI:<https://doi.org/10.37885/210504636>.

LIMA, P. C. F. Manejo de áreas individuais de algaroba: plano de manejo. **Embrapa Semiárido-Outras publicações científicas (ALICE)**, 2006.

LOPES, E. D. *et al.* Potencial energético da madeira de clones de Eucalyptus e Corymbia em diferentes espaçamentos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 17, n. 3, p. e1278-e1278, 2022. DOI:<https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a1278>.

LUHR, C.; PECENKA, R.; LENZ, H.; HOFFMANN, T. Cold air ventilation for cooling and drying of poplar wood chips from short rotation coppice in outdoor storage piles in Germany. **Biomass & Bioenergy**, 146, p. 13, Mar 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105976>.

MA, L. *et al.* A novel corner-fired boiler system of improved efficiency and coal flexibility and reduced NO_x emissions. **Applied Energy**, 238, p. 453-465, Mar 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.084>.

MAKSIMUK, Y.; ANTONAVA, Z.; KROUK, V.; KORSAKOVA, A.; KURSEVICH, V. Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. **Fuel**, 299, p. 7, Sep 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120860>.

MALLADI, K. T.; SOWLATI, T. Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 94, p. 587-599, Oct 2018. Review. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>.

MANZONE, M. Performance evaluation of different techniques for firewood storage in Southern Europe. **Biomass & Bioenergy**, 119, p. 22-30, Dec 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.004>.

MCKENDRY, P. Produção de energia a partir de biomassa (parte 1): visão geral da biomassa. **Bioresour Technol**, 83, p. 37-46, 2002.

MELO, M. V. O. O Panorama da pobreza no Brasil de 2016 a 2018. **Diversitas Journal**, 7, n. 1, p. 0356-0374, 2022. DOI:<https://doi.org/10.48017/dj.v7i1.1798>.

MIRANDA, D. L. C. *et al.* Porcentagem de cerne, alburno e casca de cinco espécies

madeireiras da Amazônia. **Nativa**, 5, p. 619-627, 2017.
DOI:<https://doi.org/10.31413/nativa.v5i7.4788>.

MOHANRAJ, R.; PRASATH, R. V. A.; RAJASEKARAN, A. Assessment of vegetation, soil nutrient dynamics and heavy metals in the *Prosopis juliflora* invaded lands at semi-arid regions of Southern India. **Catena**, 216, p. 11, Sep 2022. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106374>.

MONTEIRO, T. C. *et al.* Drying kinetics in *Eucalyptus urophylla* wood: analysis of anisotropy and region of the stem. **Drying Technology**, 40, n. 10, p. 2046-2057, 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1918145>.

MOREIRA, J.; MORALES, M.; MICHETTI, M.; BUSCHINELLI, C. D. A. Viabilidade econômica do modal de sistema de produção de eucalipto para energia, na região médio-norte de Mato Grosso. **Embrapa Florestas-Documentos (INFOTECA-E)**, 2021.

MOURA, J. E. A.; DE SOUSA, E. P. Análise multidimensional do desenvolvimento rural nos municípios cearenses e pernambucanos. **Geosul**, 35, n. 76, p. 706-730, 2020. DOI:<https://doi.org/10.5007/2177-5230.2020v35n76p706>.

MOYA, R.; TENORIO, C. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. **Biomass & Bioenergy**, 56, p. 14-21, Sep 2013. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.013>.

MUKHERJEE, A.; VELANKAR, A. D.; KUMARA, H. N. Invasive *Prosopis juliflora* replacing the Native Floral Community over three decades: a case study of a World Heritage Site, Keoladeo National Park, India. **Biodiversity and Conservation**, 26, n. 12, p. 2839-2856, Nov 2017. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10531-017-1392-y>.

NATARAJAN, P.; SURIAPPARAO, D. V.; VINU, R. Microwave torrefaction of *Prosopis juliflora*: Experimental and modeling study. **Fuel Processing Technology**, 172, p. 86-96, Apr 2018. Article. DOI:[10.1016/j.fuproc.2017.12.007](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.12.007).

NASCIMENTO, C. E. D. *et al.* Seed germination and early seedling survival of the invasive species *Prosopis juliflora* (Fabaceae) depend on habitat and seed dispersal mode in the Caatinga dry forest. **Peerj**, 8, p. 25, Sep 2020. Article.
DOI:<https://doi.org/10.7717/peerj.9607>.

NASCIMENTO, R. A. Avaliação do medidor portátil de teor de umidade pelo método dielétrico em madeira roliça de *Eucalyptus* sp. 2022. -, Universidade Federal de Viçosa Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/30367>.

NEDEL, Tamires et al. Energias renováveis: uma revisão sobre o potencial de utilização da biomassa florestal no Brasil. In: **Congresso Internacional de Bioamassa–CIBIO. Curitiba, PR**. 2018.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; DA CUNHA, A. B.; DE CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, 45, n. 1, p. 57-64, 2014. DOI:<https://doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157>.

NUNES, L. J. R.; RODRIGUES, A. M.; LOUREIRO, L.; SA, L. C. R.; MATIAS, J. C. O. Energy Recovery from Invasive Species: Creation of Value Chains to Promote Control and Eradication. **Recycling**, 6, n. 1, p. 18, Mar 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/recycling6010021>.

OLIVEIRA, A. C. **Secagem de toras de eucalipto**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/6848>.

OLIVEIRA, K. P. D. *et al.* Estudo da eficiência energética de biomassa de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) e cavaco de madeira em caldeira industrial. 2018. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140166>

PACHECO, J. M. **Aproveitamento de resíduos de colheita florestal para cogeração de energia em uma empresa localizada no estado do Paraná**. 2022. Tese (Doutorado em Bioenergia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.105.2022.tde-09052022-164412>

PALMA, P.; STEIGER, R. Structural health monitoring of timber structures—Review of available methods and case studies. **Construction and Building Materials**, 248, p. 118528, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>.

PARAMATI, S. R.; SHAHZAD, U.; DOGAN, B. The role of environmental technology for energy demand and energy efficiency: Evidence from OECD countries. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 153, p. 9, Jan 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111735>.

PARI, L. *et al.* Medium Rotation Eucalyptus Plant: A Comparison of Storage Systems.

Energies, 13, n. 11, p. 10, Jun 2020. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/en13112915>.

PENVERN, H. *et al.* How Bound Water Regulates Wood Drying. **Physical Review Applied**, 14, n. 5, p. 20, Nov 2020. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.054051>.

PEREIRA, J. C. D.; LIMA, P. C. F. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. 2002. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/152661>

PERERA, A.; NIK, V. M.; CHEN, D.; SCARTEZZINI, J.-L.; HONG, T. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. **Nature Energy**, 5, n. 2, p. 150-159, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>.

PÉREZ, A.; RUIZ, B.; FUENTE, E.; CALVO, L. F.; PANIAGUA, S. Pyrolysis technology for Cortaderia selloana invasive species. Prospects in the biomass energy sector. **Renewable Energy**, 169, p. 178-190, 2021.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.015>.

PINHEIRO, A. F.; FILHOII, J. J. P. D. N.; CERETTA, R. P. D. S.; BARROS, D. D. S.; SILVA, S. S. D. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal (01039954)**, 29, n. 3, 2019. DOI:<https://doi.org/10.5902/1980509831639>.

PROTÁSIO, T. D. P. *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 31, n. 66, p. 113-113, 2011. DOI:<https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. D.; ANDRADE, A. D.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. D. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da madeira**, 89, n. 100, p. 100-106, 2005.

RAITILA, J.; TSUPARI, E. Feasibility of solar-enhanced drying of woody biomass. **BioEnergy research**, 13, n. 1, p. 210-221, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1007/s12155-019-10048-z>.

RAVHUHALI, K. E.; MUDAU, H. S.; MOYO, B.; HAWU, O.; MSIZA, N. H. Prosopis Species-An Invasive Species and a Potential Source of Browse for Livestock in Semi-Arid Areas of South Africa. **Sustainability**, 13, n. 13, p. 13, Jul 2021. Review. DOI:<https://doi.org/10.3390/su13137369>.

RAY, P. Renewable energy and sustainability. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 21, n. 8, p. 1517-1533, Oct 2019. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s10098-019-01739-4>.

RESENDE, R. T. *et al.* Air-drying of eucalypts logs: genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, 124, p. 316-324, 2018.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.002>.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; RACHID-CASNATI, C. Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. **New Forests**, 51, n. 4, p. 631-655, Jul 2020. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s11056-019-09749-2>.

REVA, V. *et al.* Basic density, extractive content and moisture sorption properties of *Pinus pinaster* wood infected with the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. **Journal of Forestry Research**, 26, n. 1, p. 233-240, Mar 2015. Article.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-015-0024-1>.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; DE RAMOS, L. E.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. **Cerne**, 16, p. 41-47, 2010. ISSN 0104-7760

RESENDE, R. T. *et al.* Air-drying of eucalypts logs: genetic variations along time and stem profile. **Industrial Crops and Products**, 124, p. 316-324, 2018.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.002>.

RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R. D.; NASCIMENTO, C. D. S. Algaroba (*Prosopis juliflora*): árvore de uso múltiplo para a região semiárida brasileira. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2009.

RIBEIRO, P. E. A. Aglomeração de Cinzas numa Caldeira a Pellets: Influência da Temperatura e do Fluxo de ar. 2012. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/22600>.

ROQUETTE, J. G. Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono. **Ciência Florestal**, 28, p. 1350-1363, 2018.
DOI:<https://doi.org/10.5902/1980509833354>.

ROSER, D. *et al.* Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. **Biomass & Bioenergy**, 35, n. 10, p. 4238-4247, Oct 2011. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.011>.

ROUTA, J.; BRÄNNSTRÖM, H.; LAITILA, J. Effects of storage on dry matter, energy content and amount of extractives in Norway spruce bark. **Biomass and bioenergy**, 143, p. 105821, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105821>.

RÓZ, A. L. D.; RICARDO, J. F.; NAKASHIMA, G. T.; SANTOS, L. R.; YAMAJI, F. M. Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19, p. 810-814, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p810-814>.

SAHOO, A.; KUMAR, S.; KUMAR, J.; BHASKAR, T. A detailed assessment of pyrolysis kinetics of invasive lignocellulosic biomasses (*Prosopis juliflora* and *Lantana camara*) by thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, 319, p. 12, Jan 2021. Article. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124060>.

SAMPAIO, E. V.; MARIA DO SOCORRO, B. A.; SAMPAIO, Y. S. Propensão à desertificação no semi-árido brasileiro. **Revista de Geografia (Recife)**, 22, n. 2, p. 59-76, 2008.

SANTOS, C. L. D. *et al.* SECAGEM AO AR LIVRE DA MADEIRA DE *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.(CASTANHEIRA). **BIOFIX Scientific Journal**, 7, n. 2, p. 143-149, 2022. DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v7i2.84430>.

SANTOS, R. C. D. *et al.* Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, 26, p. 657-669, 2016. DOI:<https://doi.org/10.5902/1980509822765>.

SHARMA, S.; SHARMA, M.; MUDGAL, D.; BHOWMICK, H. Adoption of strategies for clean combustion of biomass in boilers. **Corrosion Reviews**, 39, n. 5, p. 387-408, Oct 2021. DOI:<https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0095>.

SILVA, G. D. Estimate of the equilibrium moisture content of wood panels. **Scientia Forestalis (Brazil)**, 2006. ISSN 413-9324

SILVA, M. A. J. D. *et al.* Secagem de toras de clones de *Eucalyptus urograndis* em

estufa solar. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 9, n. 4, p. 377-383, 2021. DOI:<https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v9n4.josedasilva>.

SILVA, M. R.. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo 2007. DOI: 10.11606/D.88.2007.tde-16022009-143508

SILVA, O.; SANTANA, L.; STEVENS, T.; SOUZA, D.; FINOTI, A. C. Curva de secagem em madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Agrarian Academy**, 5, n. 09, 2018. DOI:https://doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a14.

SJOSTROM, Eero. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. Elsevier, 2013. ISBN 012647481-8

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, 21, p. 191-197, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, 38, p. 543-549, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.

SSEREMBA, O. E.; MUGABI, P.; BANANA, A. Y.; WESSELS, B. C.; PLESSIS, M. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood. **Journal of Forestry Research**, 32, n. 2, p. 503-512, Apr 2021. Article. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>.

STRANDGARD, M.; ACUNA, M.; TURNER, P.; MIROWSKI, L. Use of modelling to compare the impact of roadside drying of *Pinus radiata* D. Don logs and logging residues on delivered costs using high capacity trucks in Australia. **Biomass and Bioenergy**, 147, p. 106000, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106000>.

STRANDGARD, M.; TURNER, P.; SHILLABEER, A. Optimizing Operational-Level Forest Biomass Logistic Costs for Storage, Chipping and Transportation through Roadside Drying. **Forests**, 13, n. 2, p. 14, Feb 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.3390/f13020138>.

STURION, J. A.; TOMASELLI, I. Influência do tempo de estocagem de lenha de bracatinga na produção de energia. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1990.

SUDENE., S. D. D. D. N.-. Oferta e demanda de biomassa no nordeste.

COMUNICAÇÃO, A. D. superintendencia do sedenvolvimento do nordeste 2017.

SULEWSKI, P. Modification of Anderson-Darling goodness-of-fit test for normality.

Afinidad, 76, n. 588, p. 270-277, Oct-Dec 2019.

THERASME, O.; EISENBIES, M. H.; VOLK, T. A. Overhead protection increases fuel quality and natural drying of leaf-on woody biomass storage piles. **Forests**, 10, n. 5, p. 390, 2019. DOI:<https://doi.org/10.3390/f10050390>.

TOMCZAK, K.; TOMCZAK, A.; JELONEK, T. Effect of Natural Drying Methods on Moisture Content and Mass Change of Scots Pine Roundwood. **Forests**, 11, n. 6, p. 668, 2020. DOI:<https://doi.org/10.3390/f11060668>.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; MAGALHAES, C. A. D.; DE OLIVEIRA, J. M. F. Growth, biomass, and energy quality of Acacia mangium timber grown at different spacings. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 53, n. 7, p. 791-799, Jul 2018. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000700002>.

TREASURE, A. M.; LE ROUX, P. C.; MASHAU, M. H.; CHOWN, S. L. Species-energy relationships of indigenous and invasive species may arise in different ways - a demonstration using springtails. **Scientific Reports**, 9, p. 12, Sep 2019. Article. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48871-1>.

VAN DEN OEVER, A.; COSTA, D.; CARDELLINI, G.; MESSAGIE, M. Systematic review on the energy conversion efficiency of biomass-based Fischer-Tropsch plants. **Fuel**, 324, p. 124478, 2022. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124478>.

VENEGA, R. D. *et al.* Energy Quality of Wood and Charcoal from the Stem and Root of Eucalyptus spp. **Floresta E Ambiente**, 30, n. 1, p. 8, 2023. Article. DOI:<https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2022-0031>.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C. D.; VALLE, M. L. A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (Schizolobium amazonicum). **Revista Árvore**, 36, p. 365-371, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200018>.

VISSER, R.; BERKETT, H.; SPINELLI, R. Determining the effect of storage

conditions on the natural drying of radiata pine logs for energy use. **New Zealand Journal of Forestry Science**, 44, p. 8, Jan 2014. Article. DOI:<https://doi.org/10.1186/1179-5395-44-3>.

YAHYA, N. S. M.; NG, L. Y.; ANDIAPPAN, V. Optimisation and planning of biomass supply chain for new and existing power plants based on carbon reduction targets. **Energy**, 237, p. 121488, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121488>.

ZAKIA, M.; PAREYN, F.; BURKART, R.; ISAIA, E. **Incremento médio anual de algarobais no Seridó-RN**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1991.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, F. S. Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. **Floresta e Ambiente**, 21, p. 401-408, 2014. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.028713>.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 7, n. 2, p. 291-298, 2019. DOI:<https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n2.zen>.

ZHANG, D. Y.; KONG, Q. X. Renewable energy policy, green investment, and sustainability of energy firms. **Renewable Energy**, 192, p. 118-133, Jun 2022. Article. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.092>.