

ELAINE CRISTINA ALVES DA SILVA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE CLONES DE *Eucalyptus*  
CULTIVADOS NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

RECIFE

Pernambuco - Brasil

Maio - 2025

ELAINE CRISTINA ALVES DA SILVA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE CLONES DE *Eucalyptus*  
CULTIVADOS NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Doutora em Ciências Florestais.

**Orientador:**

Prof. Dr. Rafael Leite Braz

**Coorientador:**

Profa. Dra. Rute Berger

RECIFE

Pernambuco - Brasil

Maior - 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S586p Silva, Elaine Cristina Alves da.  
Potencial energético da madeira de clones de  
*Eucalyptus* cultivados na zona da mata de Pernambuco / Elaine  
Cristina Alves da Silva. – Recife, 2025.  
94 f.; il.

Orientador(a): Rafael Leite Braz. Co-  
orientador(a): Rute Berger.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Florestais, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Biomassa florestal. 2. Calor - Armazenamento.  
3. Madeira. 4. Carbono 5. Calor. I. Braz, Rafael Leite,  
orient. II. Berger, Rute, coorient. III. Título

CDD 634.9

ELAINE CRISTINA ALVES DA SILVA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE CLONES DE *Eucalyptus*  
CULTIVADOS NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Rafael Leite Braz

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE (Orientador)

---

Profa. Dra. Raquel Marchesan

Universidade Federal de Tocantins – UFT

---

Dra. Tarcila Rosa da Silva Lins

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof. Dr. Thiago Cardoso Silva

Universidade Federal de Rondônia – UNIR

---

Profa. Dra. Rute Berger

Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

RECIFE

Pernambuco - Brasil

Maior - 2025

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder o privilégio de mais uma formação. Pela força e graça concedida nos momentos difíceis.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante uma fase do doutorado.

Aos professores das disciplinas cursadas no doutorado pelos ensinamentos em minha jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Leite Braz, por todo apoio e compreensão, e acima de tudo, pelo indivíduo e profissional exemplar que é. Pela ajuda na coleta e no corte do material, assim como nos direcionamentos da pesquisa. Obrigada por seu comprometimento e, especialmente, por ter acreditado em mim ao longo desses anos.

A todos do Laboratório Tecnologia e Anatomia da Madeira, em especial à técnica Suzana, bem como aos meus “irmãos” de orientação, Irlan Campelo, Natália, Sabrina, Israel Vicente, Giulia, Juliana, Átila. Vocês foram primordiais para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus amigos do doutorado, que devido à pandemia, nos conhecemos de forma remota ao cursar as disciplinas.

À equipe que me ajudou na coleta do material, Maria Clara, Vitor, Izabele, Rubia, Priscila e Moisés.

Agradeço aos professores que participaram em alguma fase da correção desse trabalho, seja durante o projeto inicial, resultados parciais e qualificação.

Ao meu filho, Miguel, por ser meu incentivo a continuar.

À Usina Petribu, por ceder os materiais utilizados na pesquisa.

Agradeço a minha mãe, pai e esposo por todo apoio que precisei.

Meus agradecimentos a todos que ajudaram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho. Meu muito obrigada!

SILVA, ELAINE CRISTINA ALVES DA, Potencial energético da madeira de clones de *Eucalyptus* cultivados na Zona da Mata de Pernambuco. 2025. Orientador: Rafael Leite Braz. Coorientadora: Rute Berger.

## RESUMO

A matriz energética mundial é dominada pelos combustíveis fósseis, enquanto a brasileira se destaca pela sustentabilidade. No Nordeste, a lenha é amplamente utilizada, especialmente nas residências (48%) e na indústria (50%), sendo grande parte extraída ilegalmente da Caatinga, o que contribui para o desmatamento. Nesse contexto, o gênero *Eucalyptus* surge como alternativa promissora por seu rápido crescimento, alta produtividade e boas características para combustão. Esta pesquisa teve como objetivo analisar o potencial energético da madeira de dois clones de *Eucalyptus* (AEC144 – C1 e AEC224 - C2) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, com base em suas características físico-químicas, anatômicas e térmicas. Foi determinada a densidade básica ao longo do fuste e a biomassa. A composição química foi caracterizada pela análise química estrutural (extrativos, lignina e holocelulose), imediata (teor de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas) e química elementar (C, H, C/H, e O). Foi realizada a caracterização anatômica das fibras dos clones. A eficiência energética da madeira foi determinada por meio dos valores de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU). Foi quantificada a densidade energética, o estoque de carbono e o índice de valor combustível. Além disso, a degradação térmica da biomassa foi analisada por termogravimetria. Todos os dados foram submetidos à análise de variância e para a densidade básica, além da ANOVA, foi utilizado o teste de Tukey a 95% de probabilidade. Foi aplicada ainda a análise multivariada de componentes principais (PCA) e realizado o ranqueamento dos clones com base nas características avaliadas. Os resultados indicaram que não houve diferença significativa entre os clones, para a maioria das propriedades avaliadas, sugerindo que ambos possuem potencial energético semelhante. A densidade básica apresentou variação ao longo do fuste, sendo maior na base ( $0,61 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e reduzindo gradualmente em direção ao topo ( $0,47 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Na análise química estrutural, a média dos clones para o teor de lignina solúvel foi de 24,07%, teor de lignina insolúvel de 2,7% e 67,50% para o teor de holocelulose. A química imediata revelou teores elevados de materiais voláteis (81%) e baixos teores de cinzas (<1%). Na análise da química elementar, o clone C1 destacou-se com os maiores valores de teor de carbono (45,26%) e hidrogênio (6,27%). O clone C1 também apresentou os maiores valores para o comprimento ( $847,44 \mu\text{m}$ ) e largura das fibras ( $17,02 \mu\text{m}$ ). Em relação ao PCS, o clone C1 apresentou o maior valor ( $4573,05 \text{ kcal.kg}^{-1}$ ). Já em relação à densidade energética, estoque de carbono e índice de valor combustível, os clones foram semelhantes estatisticamente entre si. Com a análise térmica foi possível observar as três fases de degradação da madeira, com a hemicelulose sendo degradada entre  $180^\circ\text{C}$  e  $300^\circ\text{C}$ , a celulose entre  $240^\circ\text{C}$  e  $350^\circ\text{C}$  e a lignina apresentando uma degradação mais contínua, de  $280^\circ\text{C}$  a  $500^\circ\text{C}$ . A PCA mostrou que as variáveis de poder calorífico estão fortemente associadas ao teor de carbono, lignina e extrativos. Embora o ranqueamento tenha destacado o C1 pelo melhor desempenho energético, ambos os clones apresentaram resultados satisfatórios e são recomendados para uso energético. Os plantios florestais da Zona da Mata são uma fonte legal e constante de biomassa, capazes de atender o polo gesseiro do Araripe e reforçar o suprimento energético do estado, aliviando a pressão sobre a Caatinga.

**Palavras-chave:** Biomassa; energia térmica; densidade básica; teor de carbono; poder calorífico

SILVA, ELAINE CRISTINA ALVES DA, Energy potential of wood from *Eucalyptus* clones cultivated in the Zona da Mata region of Pernambuco. 2025. Advisor: Rafael Leite Braz. Co-supervisor: Rute Berger.

### ABSTRACT

The global energy matrix is dominated by fossil fuels, while Brazil stands out for its focus on sustainability. In the Northeast, firewood is widely used, especially in households (48%) and in industry (50%), with a large portion being illegally extracted from the Caatinga, which contributes to deforestation. In this context, the *Eucalyptus* genus emerges as a promising alternative due to its fast growth, high productivity, and favorable combustion characteristics. This research aimed to analyze the energy potential of the wood from two *Eucalyptus* clones (AEC144 – C1 and AEC224 – C2) cultivated in the Zona da Mata region of Pernambuco, based on their physical-chemical, anatomical, and thermal characteristics. Basic wood density along the stem and aboveground biomass were measured. The chemical composition was characterized through structural (extractives, lignin, and holocellulose), proximate (moisture content, volatile matter, fixed carbon, and ash), and elemental (C, H, C/H ratio, and O) analyses. Fiber anatomy was also assessed. The energy efficiency of the wood was evaluated using higher heating value (HHV), lower heating value (LHV), and useful calorific value (UCV), along with energy density, carbon stock, and fuel value index. Additionally, thermal degradation of the biomass was analyzed through thermogravimetric analysis (TGA). All data were subjected to analysis of variance, and for basic density, in addition to ANOVA, the Tukey test at a 95% probability level was used. A principal component analysis (PCA) was also performed, as well as a ranking of the clones based on the evaluated characteristics. The results indicated no significant differences between the clones for most of the assessed properties, suggesting that both have similar energy potential. Basic density varied along the stem, being higher at the base (0.61 g/cm<sup>3</sup>) and gradually decreasing toward the top (0.47 g/cm<sup>3</sup>). In the structural chemical analysis, the average values for soluble lignin content were 24.07%, insoluble lignin 2.7%, and holocellulose 67.50%. The proximate analysis revealed high volatile matter (81%) and low ash content (<1%). In the elemental analysis, clone C1 stood out with higher carbon (45.26%) and hydrogen (6.27%) contents. Clone C1 also presented the highest values for fiber length (847.44 μm) and width (17.02 μm). Regarding HHV, clone C1 showed the highest value (4573.05 kcal.kg<sup>-1</sup>). However, for energy density, carbon stock, and fuel value index, both clones were statistically similar. Thermal analysis revealed three distinct degradation phases: hemicellulose degradation occurred between 180°C and 300°C, cellulose between 240°C and 350°C, and lignin degraded more continuously from 280°C to 500°C. PCA showed that calorific value variables are strongly associated with carbon, lignin, and extractive contents. Although the ranking highlighted clone C1 for its superior energy performance, both clones showed satisfactory results and are recommended for energy use. The forest plantations in the Zona da Mata are a legal and consistent source of biomass, capable of supplying the gypsum hub in Araripe and strengthening the state's energy supply, while reducing pressure on the Caatinga.

**Keywords:** Biomass; Thermal energy; Basic density; Carbon content; Calorific value

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
3.1 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL .....	14
3.2 MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL .....	17
3.3 LENHA COMO FONTE ENERGÉTICA NO NORDESTE .....	19
3.4 BIOMASSA FLORESTAL PARA FINS ENERGÉTICOS .....	22
3.5 EUCALIPTO NO CENÁRIO FLORESTAL E FONTE DE BIOMASSA ENERGÉTICA .....	24
3.6 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA .....	25
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>47</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>66</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>80</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 . Consumo de energia nas residências (%) entre os anos de 2013 a 2023 por fonte de combustível utilizadas no Brasil.....	19
Tabela 2 . Consumo de energia no setor industrial (%) no segmento de cerâmica entre os anos de 2013 a 2023 por fonte de combustível utilizadas no Brasil.....	20
Tabela 3 . Dados médios silviculturais dos clones C1 e C2 ( <i>Eucalyptus urophylla</i> ) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, com base nas árvores amostradas no talhão35	
Tabela 4 . Metodologia aplicada para a quantificação dos teores de extrativos, lignina insolúvel e lignina solúvel.....	39
Tabela 5 . Produção de biomassa da parte aérea (folha, galho, fuste, biomassa total e biomassa por hectare) dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco49	
Tabela 6 . Teor de extrativo (TEX), teor de lignina insolúvel (TLI), teor de lignina solúvel (TLS) e Holocelulose (HOLO) dos clones dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.....	50
Tabela 7 . Teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ) e teor de carbono fixo dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.....	51
Tabela 8 . Resultados médios dos teores de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.....	53
Tabela 9 . Resultados médios das dimensões das fibras dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.....	55
Tabela 10 . Valores médios estimado de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) nos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.....	56
Tabela 11 . Valores médios dos valores estimado de densidade energética, estoque de carbono e Índice de Valor Combustível (IVC) dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.....	57
Tabela 12 . Ranqueamento dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, de acordo com os parâmetros avaliados.....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 . Matriz energética mundial .....	15
Figura 2 . Matriz energética brasileira .....	17
Figura 3 . Produção de lenha (%) proveniente do extrativismo por estado do Nordeste brasileiro no ano de 2023 .....	21
Figura 4 . Quantidade de lenha (%) proveniente do extrativismo por mesorregião de Pernambuco .....	21
Figura 5 . Representação da estrutura química da molécula de celulose .....	28
Figura 6 . Representação da estrutura química da molécula de hemicelulose .....	29
Figura 7 . Representação da estrutura química da molécula de lignina .....	30
Figura 8 . Determinação da altura (A), corte da árvore em diferentes posições e obtenção dos discos amostrados ao longo do fuste (C) de árvores provenientes dos plantios da Zona da Mata de Pernambuco .....	36
Figura 9 . Amostragem dos discos para a determinação da densidade básica no sentido (base-topo) e corte do disco em cunha para secagem em estufa e de madeiras de árvores provenientes dos plantios da Zona da Mata de Pernambuco .....	37
Figura 10 . Transformação das cunhas em cavacos para uso de madeiras de árvores provenientes dos plantios da Zona da Mata de Pernambuco em moinho .....	37
Figura 11 . Densidade básica dos clones C1 (A) e C2 (B) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco .....	48
Figura 12 . Termograma do clone C1 (A) e C2 (B) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco .....	59
Figura 13 . Contribuição das variáveis nas componentes principais da madeira do clone C1 (A) e C2 (B) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é predominantemente dependente de combustíveis fósseis, um recurso não renovável e que gera um grande impacto ambiental. O aumento da demanda por energia tem impulsionado diversos países a buscarem alternativas mais sustentáveis, com ênfase em fontes renováveis. Nesse contexto, a biomassa florestal, especialmente a madeira, em sua forma de lenha, é uma alternativa para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo na mitigação dos impactos ambientais e transição para um modelo energético mais sustentável (Cruz et al., 2023).

No segmento energético, a madeira é tradicionalmente denominada de lenha e foi a primeira fonte de energia que o homem utilizou, a qual sempre contribuiu para o desenvolvimento da humanidade. A intensidade no uso da madeira é afetada por diversos fatores, tais como, nível de desenvolvimento do país, disponibilidade de madeira em florestas e a sua competitividade com outras fontes de energia (Simioni et al., 2017). Este recurso é a principal fonte de energia térmica utilizada no setor industrial para a produção de cerâmica e gesso, bem como para alimentar outros tipos de fornos e caldeiras em diversos outros segmentos industriais (Souza et al., 2023).

A exploração da Caatinga para o suprimento desta demanda por biomassa é uma preocupação constante, uma vez que a maior quantidade dessa madeira, em sua grande maioria, é proveniente de áreas sem manejo florestal, resultando no aumento de áreas desmatadas de forma irregular (Carvalho et al., 2020). A utilização de plantios florestais que visem a produção de biomassa para a geração de energia, principalmente para suprir o setor industrial, contribui para uma perspectiva ambiental mais sustentável, com o fornecimento constante de madeira (Loureiro et al., 2021). Mesmo estando distante, os plantios florestais na Zona da Mata podem suprir o polo gesseiro do Araripe, pois oferecem uma fonte regular e legal de biomassa, contribuindo para reduzir a pressão sobre a Caatinga. Com logística planejada, essa alternativa se mostra viável e ambientalmente mais sustentável. O gênero *Eucalyptus* tem se destacado dentre as espécies florestais que são mais plantadas, inclusive para fins energéticos, devido à sua notável capacidade de crescimento rápido, alta produtividade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas (IBÁ, 2024). Desde a sua introdução no Brasil, o melhoramento genético e as técnicas de propagação de clones em florestas energéticas de eucaliptos, têm alcançado melhorias significativas em relação tanto ao incremento

médio anual em volume quanto às características energéticas da madeira (Cunha et al., 2021).

Para a geração de energia, é importante observar as características físicas, químicas e térmicas da madeira durante o processo de seleção da espécie (Siwal et al., 2022). A caracterização da madeira de eucalipto fornece informações importantes para a tomada de decisão e o aprimoramento da cadeia produtiva da espécie. Esses dados contribuem para o fortalecimento dos setores energético e florestal, com foco na sustentabilidade e na promoção da biomassa como fonte renovável.

Diante da crescente demanda energética do setor industrial, especialmente no Nordeste, é fundamental aprofundar o conhecimento sobre o potencial energético de espécies utilizadas em plantações florestais, como o eucalipto, que já integra de forma significativa a matriz energética brasileira. Sendo assim, esse estudo busca avaliar a qualidade da madeira de dois clones de *Eucalyptus*, quanto às suas características físicas, anatômicas, químicas e térmicas, visando identificar os materiais de maior potencial energético.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial energético da madeira de dois clones de *Eucalyptus* cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, com base em suas características físico-químicas, anatômicas e térmicas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar a biomassa acima do solo de dois clones de *Eucalyptus* plantados na zona da Mata de Pernambuco, considerando a biomassa das folhas, galhos e fuste;
- Avaliar as propriedades físicas, químicas (estrutural, imediata e elementar) e anatômicas de dois clones de *Eucalyptus* plantados na zona da Mata de Pernambuco;
- Avaliar o potencial energético da madeira dos clones de *Eucalyptus*;
- Avaliar a degradação térmica da madeira dos clones, por meio de análises termogravimétricas (TGA/DTG) dos clones de *Eucalyptus*;
- Verificar por meio de análises de agrupamento multivariada os componentes principais para determinar as características que mais influenciam na geração de energia;
- Identificar o clone de *Eucalyptus* com maior potencial energético entre dois materiais genéticos cultivados na Zona da Mata de Pernambuco.

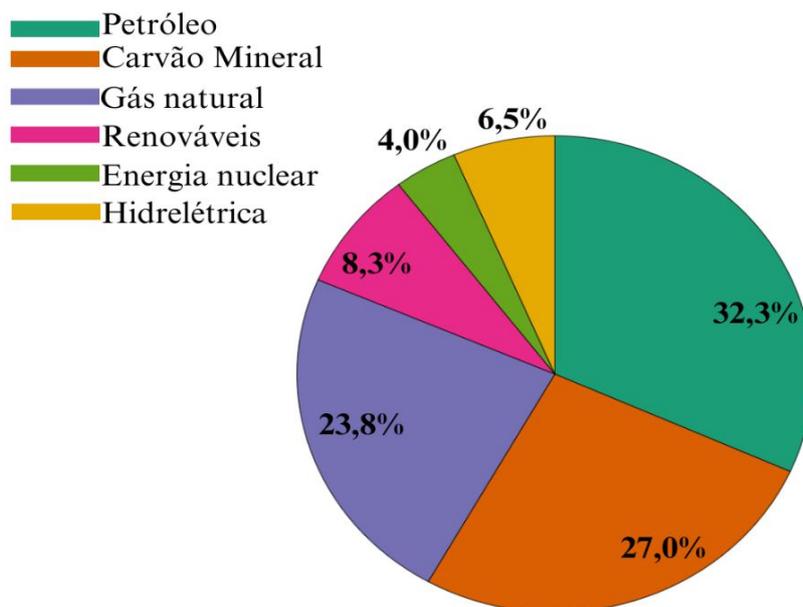
### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

A matriz energética representa todos os recursos naturais que são utilizados para suprir a demanda de diversos setores, incluindo o elétrico, transporte, indústria, comércio e residencial. Os recursos podem ser categorizados em primários, quando não passam por processos de transformação, ou seja, a energia é fornecida em sua forma bruta como o carvão e o petróleo; ou secundário, quando a energia é derivada da conversão do recurso primário, como a eletricidade (Oliveira; Trindade, 2018).

Os recursos primários são classificados em renováveis ou não renováveis. Os renováveis são fontes cujo abastecimento ocorre naturalmente como o sol, o vento, a biomassa. Essas fontes têm um menor impacto ambiental e contribui para a redução das emissões de carbono. Os recursos não renováveis são finitos e cooperam significativamente para as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e colabora com a degradação ambiental, como o carvão mineral e o petróleo (Güney, 2019).

A matriz energética mundial encontra-se na figura 1, onde os dados são referentes ao ano de 2023 e são utilizados por governos, empresas e pesquisadores que analisam o consumo por combustível dos países. Conforme pode ser observado, há um predomínio do uso de fontes não renováveis que totalizam cerca de 80% da matriz energética mundial (Energy Institute, 2024).

**Figura 1. Matriz energética mundial**

**Fonte:** Adaptado de Energy Institute, 2024.

Na sociedade do Paleolítico Médio, a lenha foi o primeiro recurso utilizado com fins energéticos para atender às necessidades básicas de aquecimento, proteção e cocção de alimento (Vidal-Matutano et al., 2019). Essas fontes eram abundantes e facilmente acessíveis, mas tinham limitações em termos de eficiência e escala de uso (Price, 1995; Rodriguez; Aguirre; Babot, 2022).

Com o avanço das sociedades e o aumento das demandas produtivas, especialmente a partir da Revolução Industrial no século XVIII, essas fontes tradicionais deram lugar aos combustíveis fósseis, mais eficientes e com maior poder energético, como o carvão mineral, que passou a impulsionar o desenvolvimento industrial e o crescimento econômico. Posteriormente, no século XX, outros combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural, ganharam destaque, diversificando a matriz energética e oferecendo opções mais versáteis e eficientes para suprir as necessidades da sociedade moderna (Shingala, 2020).

A transição para os combustíveis fósseis transformou profundamente os sistemas de produção, transporte e estilo de vida das sociedades modernas, estabelecendo a base da atual dependência global desses recursos não renováveis. O aumento contínuo na demanda mundial por energia oriunda de combustíveis fósseis tem gerado uma série de consequências preocupantes (Pereira et al., 2021). A dependência excessiva de fontes

como petróleo, carvão mineral e gás natural tem contribuído significativamente para as mudanças climáticas globais, além dos impactos ambientais durante o processo de extração desses recursos (Schernikau; Smith, 2022).

As emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis já provocam impactos evidentes no clima global, como o agravamento do aquecimento global, a ocorrência frequente de eventos climáticos extremos, a elevação do nível do mar e a perda significativa da biodiversidade. Além disso, a dependência de regiões geopoliticamente instáveis para o suprimento desses combustíveis compromete a segurança energética de diversos países. Diante desse cenário, a transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis torna-se não apenas necessária, mas essencial (Kivimaa; Sivonen, 2021).

A organização das Nações Unidas (ONU), como parte das ações da Agenda 2030 no ano de 2015, estabeleceu 17 objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Eles incluem áreas como a erradicação da pobreza, segurança alimentar, educação, energia limpa e combate as mudanças climáticas. Os ODS têm o propósito de equilibrar o crescimento econômico, a proteção ambiental e o bem-estar social, incentivando ações coordenadas entre governos, empresas e sociedade civil para enfrentar os desafios globais de forma integrada e sustentável.

Foram estabelecidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela ONU (Figura 2). Dentre esses, quatro estão diretamente relacionados ao setor energético, como os que tratam da ampliação do acesso à energia limpa, da geração de empregos, do incentivo à inovação tecnológica e da mitigação das mudanças climáticas.

**Figura 2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável pela Organização das Nações Unidas**

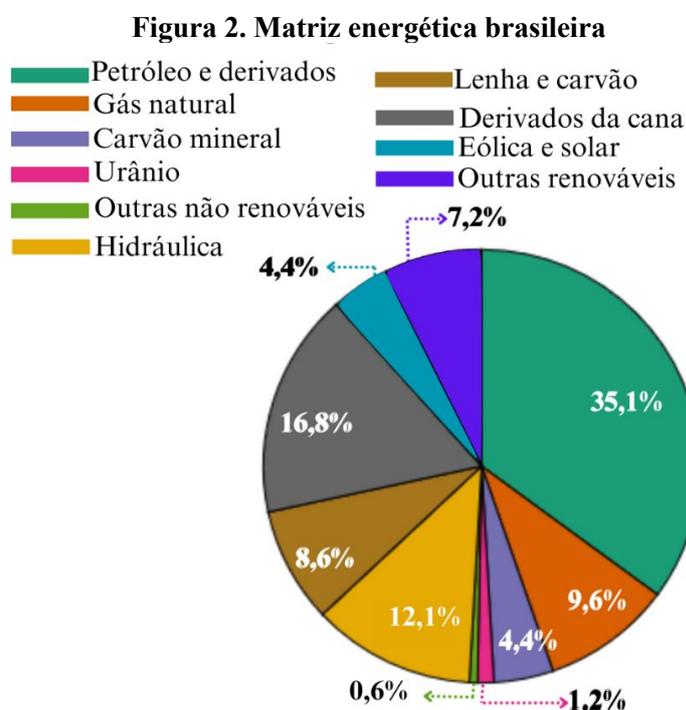


**Fonte:** ONU, 2015.

O potencial energético da biomassa contribui para a busca por soluções energéticas de baixo impacto. A adoção de políticas públicas que incentivem a eficiência energética e a transição para uma matriz mais sustentável é fundamental para acelerar essa mudança (Chillayil et al., 2022). O investimento em infraestrutura de energia renovável impulsiona o desenvolvimento econômico sustentável, especialmente em regiões rurais e remotas, onde o acesso à energia tradicional pode ser limitado (Standar; Kozera; Satola, 2021).

### 3.2 MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL

A matriz energética nacional é mais ampla e diversificada, com rica variedade de fontes de energia e padrões de consumo (Figura 3). É uma matriz, cerca de três vezes, mais renovável do que a matriz energética mundial. Assim o Brasil desempenha um papel significativo no cenário geral de produção e consumo de energia (Abreu et al., 2019; Montoya et al., 2021).



**Fonte:** Adaptado de Balanço Energético Nacional, 2024.

Entre as principais fontes renováveis da matriz energética brasileira, destacam-se a solar e a eólica, que vêm crescendo significativamente graças aos avanços tecnológicos. A energia hidráulica, por sua vez, permanece como a principal fonte renovável, aproveitando a ampla disponibilidade de recursos hídricos no país (Tomasoni; Pinto; Silva, 2010).

O Brasil possui condições naturais favoráveis à geração de energia solar e eólica. A região Nordeste, por exemplo, apresenta ventos constantes e intensos ao longo do ano, enquanto a proximidade com a linha do Equador garante elevados índices de radiação solar (Martins; Pereira; Echer, 2004). A extensa rede de rios e quedas d'água, com destaque para o Amazonas, São Francisco, Tocantins-Araguaia e Paraná, torna o país líder no aproveitamento de recursos hídricos para geração de energia (Duarte, 2010).

Além dessas fontes, a biomassa tem papel estratégico, especialmente em áreas com oferta de resíduos florestais, agrícolas e agroflorestais. Sua versatilidade permite desde o uso direto da lenha até formas mais elaboradas, como carvão vegetal, cavacos e briquetes (Fiala; Nonini, 2018). Nesse contexto, a biomassa florestal ganha relevância como alternativa viável e renovável, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis, além de reforçar o compromisso com a sustentabilidade (Simioni et al., 2017).

As condições climáticas favoráveis do Brasil, com períodos prolongados de luz solar e regimes de chuva adequados em muitas áreas, contribuem para ciclos de cultivo mais longos e rendimentos superiores. Esse conjunto de fatores naturais e geográficos coloca o Brasil em uma posição privilegiada para liderar a produção global de biocombustíveis e outras formas de energia derivadas das florestas. Essa liderança oferece uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis e contribui significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Maia; Bozelli, 2022).

O Brasil conta com diversos programas e políticas públicas que incentivam a transição para uma matriz energética mais renovável, promovendo o uso de fontes limpas e sustentáveis. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado pela Lei nº 10.438/2002, foi um marco para impulsionar a geração de energia a partir de fontes renováveis, como a eólica e biomassa (Brasil, 2002; Dutra; Szklo, 2008).

Além disso, o RenovaBio, parte da Política Nacional de Biocombustíveis, visa ampliar a produção e o uso de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, reduzindo as

emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes (Brasil, 2017). Essas iniciativas reforçam o compromisso nacional em diversificar a matriz energética, alinhar-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e consolidar o Brasil como líder mundial em energia renovável (Ridelensky, 2021).

### 3.3 LENHA COMO FONTE ENERGÉTICA NO NORDESTE

A lenha é um recurso energético de grande importância no Nordeste brasileiro, não apenas por sua acessibilidade e custo-benefício, mas também por sua versatilidade em diferentes setores econômicos (Simioni et al., 2017). Nas áreas rurais e em comunidades tradicionais, a lenha continua sendo a principal fonte de energia para cocção de alimentos e aquecer residências (Arnold, 1979; Silva et al., 2018).

A análise do uso das fontes utilizadas no Brasil entre os anos de 2013 a 2023, revela que a lenha se mantém como um dos principais combustíveis utilizados no país no setor residencial, ficando atrás da eletricidade (48%) e oscilando entre a segunda e terceira posição com o gás liquefeito de petróleo. Entre 2013 a 2017, o uso da lenha nas residências ocupava a terceira posição e a partir de 2018, se mantém na segunda posição (EPE, 2024) (Tabela 1).

**Tabela 1. Consumo de energia nas residências (%) entre os anos de 2013 a 2023 por fonte de combustível utilizadas no Brasil**

<b>FONTES</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Gás natural	1,3	1,2	1,2	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5
Lenha	23,8	24,2	24,9	23,9	24,9	26,8	25,9	25,5	26,0	25,9	25,0
Gás liquefeito de petróleo	27,0	25,9	25,7	25,9	25,4	24,1	23,8	23,8	22,8	22,1	21,1
Querosene	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gás canalizado	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eletricidade	44,5	45,0	44,4	45,0	44,5	43,8	45,0	45,2	45,5	46,2	48,4
Carvão vegetal	1,7	1,9	1,9	1,7	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,1
Solar térmica	1,6	1,8	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	2,8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>										

**Fonte:** Empresa de Pesquisa Energética, 2024

No setor industrial, a lenha é amplamente utilizada em fornos e caldeiras, especialmente em indústrias como cerâmica, gesso, panificação e produção de alimentos, que requerem calor constante em seus processos de fabricação (Delpech et al., 2018). Segundo os dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2024), dentre as fontes que

abastecem este setor industrial no segmento de cerâmica, entre os anos de 2013 a 2023, a lenha ocupou consistentemente a primeira posição para o abastecimento desse setor (>50%) (Tabela 2).

**Tabela 2. Consumo de energia no setor industrial (%) no segmento de cerâmica entre os anos de 2013 a 2023 por fonte de combustível utilizadas no Brasil**

<b>FONTES</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Gás natural	26,70	26,36	28,70	31,01	30,98	29,78	29,79	30,06	33,89	33,31	30,72
Carvão vapor	0,76	0,99	1,35	0,86	0,95	1,31	1,04	1,20	1,24	1,39	1,03
Lenha	51,89	52,31	50,10	48,70	48,61	49,28	49,62	49,89	48,10	48,36	50,45
Outras recuperações	1,28	1,29	1,29	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,33	1,33	1,39
Óleo diesel	0,46	0,48	0,48	0,42	0,37	0,35	0,39	0,42	0,46	0,45	0,47
Biodiesel	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06
Óleo combustível	2,46	2,00	1,27	1,13	1,35	1,29	0,99	1,12	0,87	0,83	0,84
Gás liquefeito de petróleo	3,22	3,37	3,75	3,81	3,66	3,71	3,78	4,46	3,92	4,24	4,88
Outras de petróleo	5,69	5,74	5,69	5,23	5,25	5,33	5,36	3,75	2,32	2,18	1,97
Gás canalizado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Eletricidade	7,50	7,41	7,34	7,54	7,52	7,62	7,68	7,72	7,81	7,85	8,19
Outras não especificadas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>										

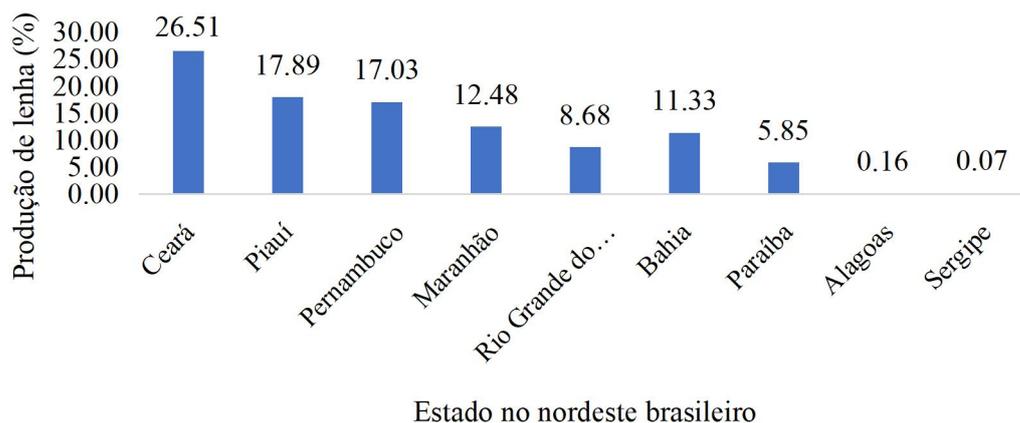
**Fonte:** Empresa de Pesquisa Energética (2024).

A indústria de cerâmica, presente principalmente nos estados de Pernambuco, Ceará e Rio Grande do Norte, desempenha um papel importante na economia regional. O aproveitamento da rica disponibilidade de argila de alta qualidade na região atende à crescente demanda do setor de construção civil, além da produção de cerâmica artesanal (Arruda; Damasceno, 2015; Silva et al., 2023a).

Em Pernambuco, além da indústria da cerâmica, há uma grande participação da indústria de gesso. A produção no Polo Gesseiro do Araripe, destaca a atuação da região como um dos principais centros de produção de gesso no Brasil e um dos maiores consumidores de lenha no Nordeste. A indústria gesseira nessa área é caracterizada por sua dependência de biomassa florestal como fonte de energia. Isso se deve ao processo de calcinação da gipsita, matéria-prima do gesso, que exige altas temperaturas mantidas de forma constante. A lenha, por sua disponibilidade e custo relativamente baixo, tornou-se o combustível preferencial para alimentar os fornos de calcinação (Medeiros; Hurtado-Guerrero; Silva, 2010)

Segundo dados do IBGE (2024), extraídos da Pesquisa da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), a produção de lenha de origem extrativista nos estados da região Nordeste apresenta-se concentrado em poucos estados. O Ceará se destaca como o maior produtor da região, seguido por Piauí e Pernambuco (Figura 4).

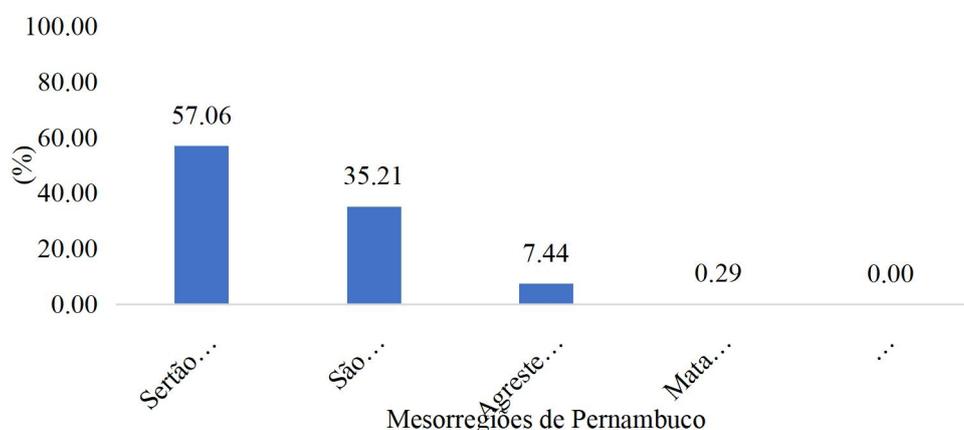
**Figura 3. Produção de lenha (%) proveniente do extrativismo por estado do Nordeste brasileiro no ano de 2023**



**Fonte:** Adaptado IBGE (2024).

Pernambuco é o terceiro estado do nordeste de maior extração de lenha para fins energéticos. O estado é dividido em cinco mesorregiões (Sertão Pernambucano, São Francisco Pernambucano, Agreste Pernambucano, Mata Pernambucana e Metropolitana de Recife). Cerca de 57% de toda lenha utilizada em Pernambuco é proveniente do extrativismo da mesorregião do Sertão Pernambucano (Figura 5) (IBGE, 2024).

**Figura 4. Quantidade de lenha (%) proveniente do extrativismo por mesorregião de Pernambuco**



**Fonte:** Adaptado IBGE, 2024.

Inserida na mesorregião do Sertão Pernambucano, tem-se a microrregião de Araripina, composta pelos municípios de Araripina, Bodocó, Exu, Granito, Ipubi, Moreilândia, Ouricuri, Santa Cruz, Santa Filomena e Trindade. Essas cidades fazem parte do polo gesseiro do Araripe, responsável pelo abastecimento de cerca de 95% de toda produção gesseira nacional (Granja et al., 2017).

É importante considerar os desafios que estão associados ao uso da lenha para que seu uso tenha uma contribuição efetiva para a ODS. Atualmente, grande parte da lenha consumida no Nordeste é proveniente da Caatinga, bioma caracterizado por sua vegetação xerófila e altamente sensível à degradação (Medeiros; Hurtado-Guerrero; Silva, 2010).

A implantação de florestas energéticas com espécies de rápido crescimento, como o eucalipto, é uma alternativa viável para reduzir a pressão sobre a Caatinga e garantir segurança energética às indústrias locais (Brand, 2017; Romanelli, 2007). No entanto, essa proposta enfrenta desafios importantes, como as limitações dos solos, a escassez de água e as condições climáticas adversas da região, que dificultam a produção sustentável de lenha (Romanelli, 2012).

### 3.4 BIOMASSA FLORESTAL PARA FINS ENERGÉTICOS

A biomassa é uma fonte de energia renovável proveniente da energia solar capturada pelas plantas por meio da fotossíntese. Nesse processo, as plantas absorvem dióxido de carbono da atmosfera e água do solo, utilizando a luz solar para transformá-los em compostos orgânicos complexos, principalmente os carboidratos (Robert et al., 2014). Pode ser derivada de uma ampla variedade de fontes, incluindo resíduos agrícolas, florestais e urbanos, bem como florestas energéticas (Cherubini et al., 2011).

Estes compostos armazenam a energia química que pode ser posteriormente liberada através de diversos processos, como a combustão direta, a fermentação ou a decomposição (Schobert, 2013). Desempenham um papel importante no ciclo do carbono, pois o CO<sub>2</sub> liberado durante a utilização da biomassa é reabsorvido pelas plantas em crescimento, tornando-a potencialmente neutra em carbono (Cherubini et al., 2011).

O potencial de crescimento da biomassa na matriz energética desses países é considerável, dado que é um dos recursos mais abundantes do mundo (Guerrero et al., 2016). Além disso, a biomassa pode promover o desenvolvimento rural, criar empregos e melhorar a segurança energética, especialmente em regiões com acesso limitado a outras fontes de energia. À medida que as tecnologias de conversão de biomassa se tornam mais eficientes e econômicas, espera-se que sua participação na matriz energética global continue a crescer, desempenhando um papel importante na transição para um futuro energético mais sustentável (Muh; Tabet; Amara, 2021).

O processamento da biomassa para geração de energia é um campo em constante evolução, abrangendo uma variedade de tecnologias promissoras. No entanto, dois desafios principais persistem, que são o custo elevado e a eficiência energética ao longo da cadeia produtiva (Ghosh, 2018).

Esses fatores podem limitar a adoção em larga escala dessas tecnologias, tornando-as menos competitivas em comparação com fontes de energia convencionais. Apesar disso, pesquisas contínuas e avanços tecnológicos estão sendo realizados para melhorar tanto a viabilidade econômica quanto o rendimento energético desses processos. Embora o uso da biomassa tenha sido historicamente associado ao desmatamento ilegal, uma solução sustentável tem se evidenciado na forma de plantios de florestas energéticas (Muhamad; Pa'e; Zahan, 2017). Essas florestas são especificamente projetadas e gerenciadas para a produção de biomassa, oferecendo uma fonte renovável e controlada de matéria-prima para a produção de lenha, carvão e briquetes (Demirbas et al., 2016).

Esta abordagem não apenas mitiga as preocupações ambientais relacionadas ao desmatamento, mas também estabelece uma cadeia de suprimentos mais estável e previsível para a indústria de bioenergia. As florestas energéticas representam um passo importante em direção a um futuro energético mais sustentável, equilibrando as necessidades de produção de energia com a conservação ambiental (Banaś; Utnik-Banaś, 2022). Na região Nordeste do Brasil, o uso da biomassa para fins energéticos apresenta grandes oportunidades.

### 3.5 EUCALIPTO NO CENÁRIO FLORESTAL E FONTE DE BIOMASSA ENERGÉTICA

A produção de biomassa lenhosa destinada à geração de energia renovável tem ganhado destaque como uma alternativa estratégica para diversificação da matriz energética e redução da dependência de combustíveis fósseis. Uma das principais fontes dessa biomassa é o cultivo de florestas de curta rotação, também conhecidas como florestas energéticas, caracterizadas por ciclos produtivos que variam entre 3 e 5 anos (Simioni et al., 2017). Essas florestas são planejadas especificamente para fins energéticos, priorizando espécies de rápido crescimento e elevado rendimento em biomassa.

No contexto brasileiro, o país apresenta condições edafoclimáticas favoráveis para o cultivo florestal, possuindo aproximadamente 10,3 milhões de hectares de florestas plantadas. Desse total, estima-se que cerca de 76% sejam compostos por espécies do gênero *Eucalyptus*, amplamente utilizadas devido à sua adaptabilidade, alta produtividade e qualidade da madeira para fins energéticos. Esse cenário posiciona o Brasil como um dos principais produtores de biomassa florestal do mundo, com grande potencial para o aproveitamento sustentável dessa fonte energética (IBÁ, 2024).

O gênero *Eucalyptus* é amplamente cultivado para a produção de madeira destinada a diversas finalidades, como a indústria de celulose e papel, a fabricação de chapas de fibra e a geração de energia. Essa ampla utilização se deve, principalmente, ao seu rápido crescimento, à boa adaptação a diferentes condições ecológicas e às características tecnológicas da madeira, que podem ser consideradas favoráveis conforme o uso pretendido (Beltrame et al., 2012).

A demanda por energia na forma de lenha para abastecimento industrial nos estados de Pernambuco, Ceará e Rio Grande do Norte é significativamente elevada, especialmente nos setores gesseiro e cerâmico. No entanto, devido à escassez de oferta local de madeira proveniente de plantios florestais, como o *Eucalyptus*, essas indústrias acabam recorrendo à exploração da vegetação nativa, o que contribui para a pressão sobre os remanescentes florestais e acarreta impactos ambientais consideráveis.

Esse cenário evidencia uma desconexão entre as regiões produtoras de biomassa florestal, oriunda de silvicultura (IBÁ, 2024), e os polos industriais que mais dependem dessa fonte energética. Observa-se que a maior parte da madeira proveniente dos

plantios localizados na Bahia e no Maranhão é direcionada, prioritariamente, à indústria de papel e celulose, não sendo canalizada para suprir a demanda energética de outros estados nordestinos.

Diante disso, torna-se evidente a necessidade de se investir na expansão de áreas de plantios florestais no Nordeste, seja nas proximidades dos polos industriais ou em áreas estratégicas com logística viável. A implantação de florestas energéticas, mesmo em localidades distintas, pode atender à crescente demanda de setores como o polo gesseiro do Araripe, um dos maiores consumidores de lenha do país. Além de promover segurança energética e redução da pressão sobre a vegetação nativa, o fomento à silvicultura regional pode gerar empregos, diversificar a economia local e contribuir para práticas produtivas mais sustentáveis.

No Brasil, o cultivo de eucaliptos para produção de energia concentra-se principalmente em espécies como *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e seus híbridos, devido às suas características favoráveis de crescimento rápido e alta densidade da madeira. Assim como o híbrido *E. urocam*, resultante do cruzamento entre *E. urophylla* e *E. camaldulensis*, tem sido destacado por sua adaptabilidade e eficiência na produção de biomassa para energia. Essas espécies são amplamente utilizadas em programas de melhoramento genético para desenvolver clones com desempenho superior em termos de produtividade e qualidade da madeira para fins energéticos (Almeida et al., 2022).

### 3.6 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA

As propriedades da madeira representam um conjunto complexo de características que determinam sua qualidade e desempenho em diferentes aplicações. Essas propriedades são influenciadas por uma combinação de fatores intrínsecos, como a espécie, a anatomia e a composição química da madeira, e fatores extrínsecos, como as condições ambientais, o manejo silvicultural e o processamento do material (Wang et al., 2014).

### 3.6.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas da madeira são características fundamentais que determinam seu comportamento e desempenho em diferentes usos, incluindo aplicações energéticas. Propriedades como o teor de umidade e a densidade estão relacionadas à estrutura e à composição da madeira, as quais influenciam diretamente sua eficiência, durabilidade e viabilidade como recurso natural, afetando significativamente seu comportamento em diferentes aplicações (Rani; Singh; Singh, 2017).

O teor de umidade na madeira é um fator importante que influencia o processo de combustão e a eficiência energética. Para aplicações energéticas, é altamente desejável que a madeira apresente baixos teores de umidade, pois isso aumenta seu poder calorífico e reduz os custos associados ao manejo e transporte do material. Quando a madeira apresenta um alto teor de umidade, uma parte considerável da energia gerada durante a queima é consumida para evaporar essa água antes que a combustão propriamente dita ocorra. Isso resulta em uma redução substancial da eficiência energética, pois menos calor é efetivamente aproveitado para o propósito desejado, seja aquecimento ou geração de energia (Possell; Bell, 2013).

A densidade básica da madeira é um parâmetro fundamental na avaliação da qualidade e características da madeira. Sua importância reside no fato de que ela se correlaciona diretamente com diversas outras propriedades da madeira, além de ser relativamente simples de se determinar. Para uma caracterização abrangente da madeira, é fundamental não apenas determinar sua densidade básica, mas também compreender como esta propriedade varia dentro da própria árvore. Isso envolve a análise da variação longitudinal, da base ao topo da árvore, bem como a variação radial, da medula para a casca (Melo et al., 2016).

O estudo detalhado da variação da densidade básica fornece informações sobre a qualidade geral da madeira e potenciais aplicações. Compreender essas variações é essencial para otimizar o uso da madeira em diferentes setores industriais, como construção civil, produção de papel e celulose, e fabricação de móveis, permitindo uma seleção mais precisa e um aproveitamento mais eficiente do material (Couto et al., 2013).

Madeiras mais densas oferecem diversas vantagens significativas para aplicações energéticas, tornando-as uma escolha preferencial em muitos contextos

industriais e de geração de energia (Fraser, 1982). Além das vantagens mencionadas, como menor área de estocagem e logística, essas madeiras também proporcionam uma combustão mais prolongada e estável, resultando em uma liberação de energia mais constante e eficiente. Isso é particularmente benéfico em processos industriais que requerem um fornecimento contínuo e confiável de energia térmica (Ames; Baxter, 1981).

### **3.6.2 Propriedades química**

As propriedades químicas da madeira referem-se à sua composição molecular, incluindo a presença e proporção de componentes como celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. Esses elementos influenciam diretamente uma série de características fundamentais da madeira, como o teor de umidade, densidade e o comportamento térmico. Consequentemente, essas propriedades exercem papel determinante na sua eficiência e adequação para diferentes aplicações industriais, como a geração de energia, a produção de papel e celulose, bem como a fabricação de carvão vegetal (Bajpai, 2018).

A química da madeira pode ser analisada em três níveis principais: estrutural, imediata e elementar. A química estrutural aborda a composição dos principais polímeros da madeira, como celulose, hemicelulose e lignina, que influenciam diretamente sua rigidez, durabilidade e poder calorífico (Meshitsuka; Isogai, 2017). A química imediata refere-se à divisão básica dos componentes em cinzas, voláteis, carbono fixo, sendo essencial para determinar sua eficiência como biomassa energética (Lana et al., 2016). Já a química elementar quantifica os elementos químicos que constituem a madeira, como carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio responsáveis por definir as propriedades térmicas e a combustão.

#### **3.6.2.1 Química estrutural**

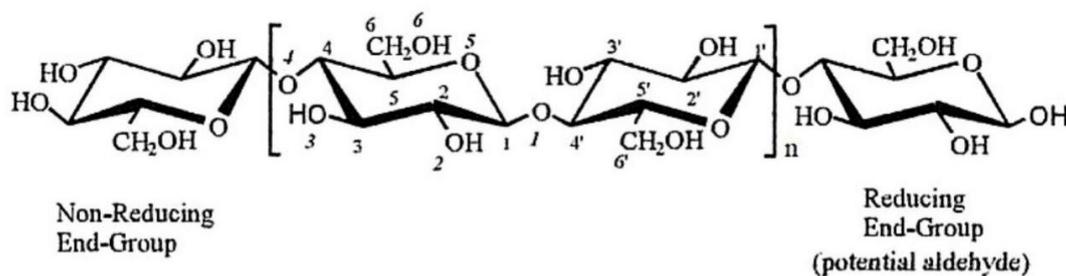
A química estrutural da madeira está relacionada à composição de seus principais biopolímeros, como celulose, hemicelulose e lignina, que formam a base de sua estrutura e influenciam diretamente suas propriedades físicas, químicas e térmicas (Young, 2008). Embora a madeira contenha diversos constituintes químicos, como carboidratos, substâncias fenólicas, proteínas e hidrocarbonetos, são esses três

componentes estruturais que estão presentes em maiores proporções e determinam sua funcionalidade.

A celulose e a hemicelulose, por serem carboidratos estruturais, conferem resistência mecânica e flexibilidade, enquanto a lignina, uma substância fenólica, é responsável pela rigidez e pela resistência da madeira à degradação (Berglund et al., 2020). Além de garantir estabilidade estrutural, esses elementos afetam a eficiência energética da biomassa e sua aplicabilidade em processos industriais, tornando sua caracterização essencial para o uso sustentável da madeira (Qaseem; Shaheen; Wu, 2021).

A celulose, como principal componente estrutural das paredes celulares das plantas, desempenha uma importante contribuição na determinação das propriedades mecânicas dos materiais lignocelulósicos. Sua estrutura molecular altamente organizada, composta por longas cadeias de glicose unidas por ligações  $\beta$ -1,4, confere rigidez e resistência às fibras vegetais (Figura 5) (Rongpipi et al., 2019).

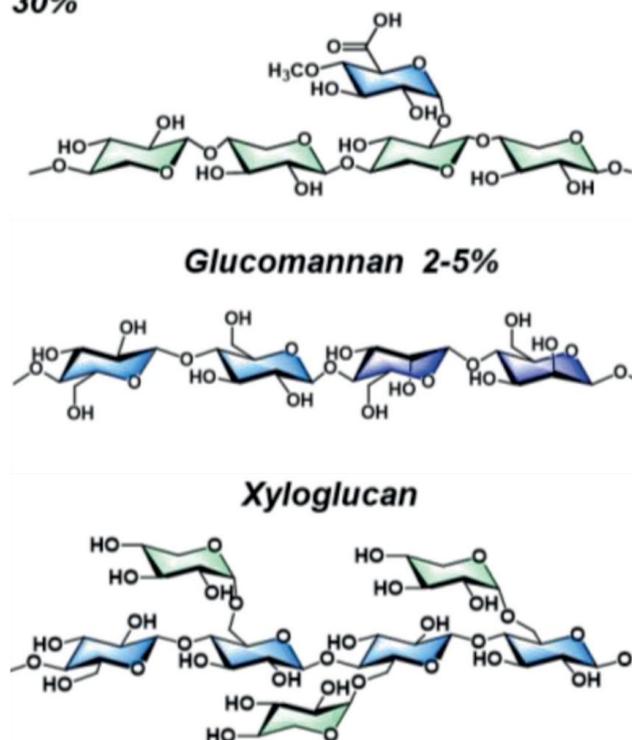
**Figura 5. Representação da estrutura química da molécula de celulose**



Fonte: Peter, (2021)

A hemicelulose das madeiras duras é composta principalmente por três classes estruturais: O O -metilglucuronoxilano, polissacarídeo predominante, representando cerca de 15–30% da hemicelulose; o galactoglucomanano, que está presente em concentrações de 2 a 5%; e o O -acetilado nas posições C-2 ou C-3 dos resíduos de manose, exibindo uma distribuição aleatória e um grau de acetilação de aproximadamente 0,3. Já a xiloglucana ocorre nas paredes celulares primárias das madeiras duras, sendo abundante em Dicotiledôneas e escassa em Monocotiledôneas, é formada por unidades de d-glucopiranosose ligadas por  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (Rao et al., 2023) (Figura 6).

**Figura 6. Representação da estrutura química da molécula de hemicelulose**  
***O*-acetyl-4-*O*-methylglucuronoxylan 15-30%**



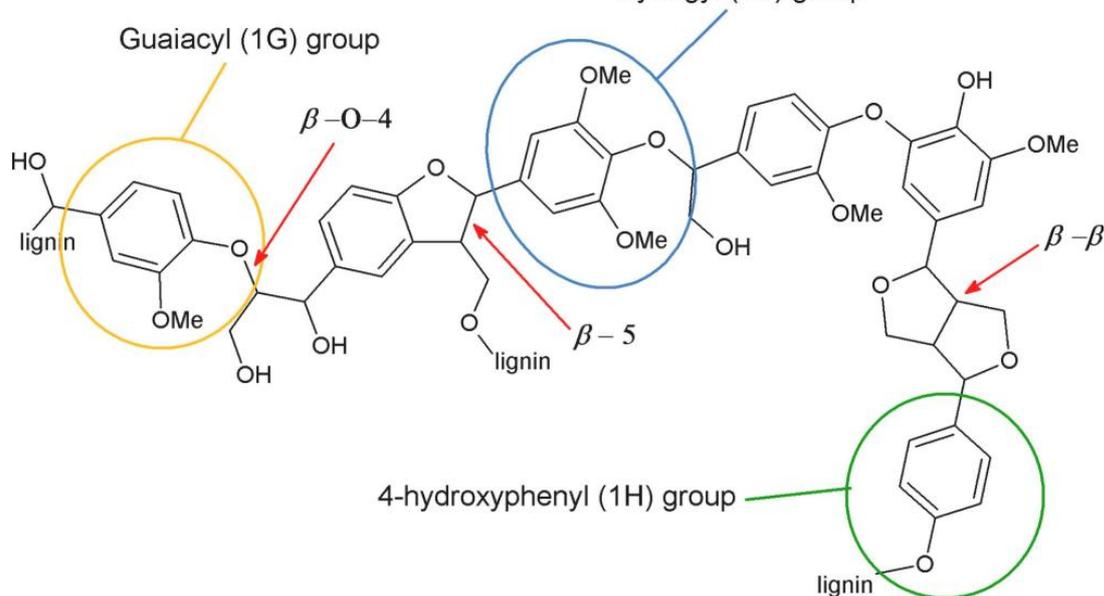
Fonte: Rao et al., (2023).

A natureza mais ramificada e heterogênea, combinada com uma menor estabilidade térmica em comparação com a celulose, faz com que a hemicelulose se degrade a temperaturas mais baixas. Esta degradação térmica resulta na liberação de diversos compostos voláteis, incluindo ácidos orgânicos, aldeídos e furanos, que não apenas afetam as propriedades do material durante o processamento, mas também desempenham um papel importante na combustão, influenciando aspectos como a inflamabilidade e o perfil de emissões dos produtos derivados da biomassa (Werner; Pommer; Broström, 2014).

A estrutura química da lignina é complexa, caracterizada por anéis aromáticos interligados, sintetizada por meio de um processo de polimerização radicalar, envolvendo três álcoois p-hidróxi-cinâmicos precursores: p-cumarílico, coniferílico e sinapílico. Esses precursores dão origem às unidades básicas da lignina, que são classificadas de acordo com o grau de metoxilação do anel aromático. A unidade p-hidróxi-fenil, derivada do álcool p-cumarílico, não possui grupos metoxila. A unidade guaiacil, proveniente do álcool coniferílico, apresenta uma metoxila. Por fim, a unidade

siringil, originada do álcool sinapílico, contém duas metoxilas (Carvalho et al., 2009) (Figura 7).

**Figura 7. Representação da estrutura química da molécula de lignina**



**Fonte:** Adaptado de Jdrzejczak et al., (2021).

Esta propriedade faz da lignina um elemento essencial para o rendimento calórico da madeira, tornando-a uma fonte valiosa de energia em processos de combustão. Além de sua contribuição energética, a lignina também proporciona rigidez e resistência mecânica às plantas, atuando como um "cimento" natural que une as fibras de celulose. Esta característica não apenas fortalece a estrutura da madeira, mas também influencia diretamente sua capacidade de gerar calor durante a queima (Frei, 2013). A presença de lignina na biomassa vegetal é, portanto, um fator determinante na eficiência energética da madeira, tornando-a um recurso importante tanto para aplicações industriais quanto para o uso doméstico como combustível (Md Salleh et al., 2023).

Os extrativos são compostos químicos não estruturais presentes na madeira, como resinas, óleos, ceras, taninos e terpenos. Embora representem uma pequena fração da composição total, exercem influência significativa nas propriedades térmicas da madeira. Um dos principais efeitos desses compostos é o aumento do poder calorífico, já que muitos extrativos possuem estrutura química rica em carbono e hidrogênio, favorecendo a liberação de energia durante a combustão (Roffael, 2016).

Além disso, os extrativos contribuem para a inflamabilidade e podem melhorar a estabilidade térmica inicial da madeira, facilitando o processo de ignição e propagação

da queima. No entanto, sua presença também pode trazer efeitos indesejáveis. Durante a combustão, alguns extrativos se volatilizam e podem formar compostos que prejudicam o desempenho de caldeiras e outros equipamentos térmicos, promovendo o acúmulo de resíduos, formação de alcatrão ou liberação de substâncias potencialmente corrosivas e poluentes (Moulin et al., 2017).

### 3.6.2.2 Química imediata

A química imediata da madeira é uma análise fundamental para compreender seu comportamento em processos de conversão energética, como combustão, gaseificação e carbonização. Cada um dos componentes (materiais voláteis, carbono fixo e cinzas) desempenha um papel importante na eficiência energética e na qualidade do produto final (Thybring; Fredriksson, 2023).

Os materiais voláteis são compostos orgânicos leves que se despreendem da madeira quando ela é aquecida. Eles são essenciais na fase inicial da combustão porque, ao se volatilizarem, reagem rapidamente com o oxigênio do ar, promovendo o início da chama e contribuindo para o aumento da temperatura no sistema. Esse processo favorece a ignição da madeira e acelera a decomposição térmica dos componentes sólidos remanescentes (Jin et al., 2023). Uma maior quantidade de voláteis pode resultar em uma queima mais rápida e intensa, favorecendo a liberação imediata de energia. No entanto, se o processo de combustão não for bem controlado, esses compostos podem gerar emissões mais elevadas de poluentes, como hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono e material particulado (Zhu et al., 2021).

O carbono fixo representa a fração sólida da madeira que permanece após a liberação dos materiais voláteis. Ele se queima de forma mais lenta e contínua, sendo um dos principais responsáveis pela manutenção da combustão e pela liberação gradual de energia durante essa fase. Um teor elevado de carbono fixo está diretamente relacionado à maior eficiência energética da biomassa, pois indica maior concentração de matéria combustível que permanece ativa ao longo do processo. Além disso, no caso da produção de carvão vegetal, o alto teor de carbono fixo é desejável porque resulta em um produto com maior densidade energética, maior tempo de queima e menor geração de fumaça e resíduos, contribuindo para uma queima mais limpa e estável. Portanto, sua

importância não se resume apenas à quantidade de energia gerada, mas também à qualidade da combustão e à eficiência do uso energético (Wang et al., 2018).

Já o teor de cinzas, que corresponde aos resíduos inorgânicos deixados após a combustão, deve ser o mais baixo possível para evitar o acúmulo de resíduos no sistema e reduzir custos de manutenção. Altos teores de cinzas estão associados a menor eficiência e maior impacto ambiental. Assim, a análise equilibrada desses componentes permite a seleção de madeiras mais adequadas para fins energéticos, otimizando tanto o rendimento quanto a sustentabilidade do processo (Widera; Grabowski; Smoliński, 2022).

### 3.6.2.3 Química elementar

A química elementar da madeira, é referente à composição dos seus principais elementos químicos, os quais influenciam diretamente suas propriedades energéticas. A energia liberada durante a combustão da madeira está diretamente relacionada à quebra das ligações químicas presentes em suas moléculas orgânicas, principalmente aquelas formadas por átomos de carbono (C) e hidrogênio (H). Um alto teor de carbono na madeira indica a presença abundante de ligações C–C e C–H, que armazenam grande quantidade de energia química e, ao serem rompidas no processo de combustão, liberam calor de forma eficiente (Ogemdi, 2019).

O teor de carbono é um dos fatores mais importantes para a eficiência da combustão, pois está diretamente relacionado ao poder calorífico da madeira, quanto maior a concentração de carbono, maior será a energia liberada durante a queima. Já o hidrogênio liberado da madeira, embora presente em menor quantidade, contribui para a liberação de energia, pois forma compostos voláteis altamente combustíveis (Garcia; Caraschi; Ventorim, 2017). A relação C/H é um indicador fundamental da qualidade do combustível sólido, uma vez que materiais com alta proporção de carbono e menor teor de hidrogênio tendem a gerar uma combustão mais estável e eficiente (Xiao; Chen; Chen, 2016).

A compreensão da composição da madeira permite otimizar o seu uso, maximizando as propriedades desejáveis e minimizando suas limitações. Além disso, o conhecimento aprofundado dessas características possibilita o desenvolvimento de

novos produtos e tecnologias que aproveitam melhor as qualidades únicas de cada espécie de madeira.

### **3.6.3 Propriedades anatômicas**

As propriedades anatômicas da madeira influenciam diretamente sua eficiência energética, pois afetam características como densidade, porosidade e comportamento térmico durante a combustão. A madeira é composta por diferentes elementos estruturais, como fibras, vasos e células de parênquima, cuja disposição e proporções impactam a quantidade de material lenhoso efetivamente disponível para a queima (Nam et al., 2022).

Fibras com maior espessura de parede e menor diâmetro de lúmen tendem a aumentar a densidade da madeira, resultando em maior conteúdo energético por unidade de volume (Vale et al., 2003). Essa compactação anatômica reduz a porosidade e dificulta a penetração de oxigênio, o que pode tornar a queima mais lenta e controlada, favorecendo uma liberação gradual de energia (Hepworth et al., 2002). Já madeiras com fibras muito finas ou paredes delgadas possuem menor densidade e menor capacidade de armazenamento de energia, o que pode levar a uma queima mais rápida, porém menos eficiente (Kiaei, 2011).

Além disso, a relação entre o comprimento e a espessura das fibras afeta a integridade estrutural da madeira e sua resistência térmica. Fibras mais longas e com paredes espessas aumentam a quantidade de lignina e celulose por volume, dois componentes-chave na liberação de energia durante a combustão.

### **3.6.4 Propriedades energéticas**

As propriedades energéticas, como o poder calorífico, são essenciais para avaliar a eficiência da madeira em processos de conversão de energia. O poder calorífico da madeira pode ser classificado em três formas: poder calorífico superior (PCS), que representa a energia total liberada na combustão completa; poder calorífico inferior (PCI), que desconta a energia usada na vaporização da água formada na combustão; e poder calorífico útil (PCU), que considera as perdas térmicas do sistema e indica a

energia efetivamente aproveitada no processo (Mar'yandyshev; Chernov; Lyubov, 2015; Sepman et al., 2022).

A análise termogravimétrica, por sua vez, oferece informações do processo da degradação térmica da madeira a diferentes temperaturas. A análise termogravimétrica (TGA) permite o registro constante da perda de massa quando a amostra é submetida a um programa de temperatura, em que ocorre a variação do tempo ou da temperatura (Blasio, 2019; Menczel, 2020). Esta avaliação permite observar o comportamento da madeira durante sua decomposição térmica além de identificar a faixa de temperatura em que a decomposição é mais acentuada.

Além disso, a análise termogravimétrica fornece informações sobre a estabilidade térmica da madeira, a velocidade de decomposição e a quantidade de resíduos gerados, aspectos cruciais para otimizar processos de conversão energética e desenvolver tecnologias mais eficientes para o aproveitamento da biomassa florestal. Essa técnica permite identificar etapas como a liberação de umidade, degradação de hemicelulose e celulose, e a decomposição da lignina, fornecendo informações sobre a estabilidade térmica e o perfil de combustão (Varfolomeev et al., 2015). Assim, a combinação do poder calorífico e da análise termogravimétrica oferece uma base sólida para selecionar materiais com características térmicas otimizadas para aplicações industriais e energéticas.

Durante o processo de aquecimento, os componentes da madeira vão se degradando em diferentes fases de acordo com sua estrutura. A hemicelulose devido à sua estrutura amorfa e heterogênea inicia o processo de degradação térmica em 190° e de curta duração (Shen; Gu; Bridgwater, 2010). A celulose tem uma forte interação por pontes de hidrogênio, e sua degradação térmica se inicia em temperaturas mais elevadas, cerca de 315°C mais lenta (Pereira et al., 2013a). Já a lignina, devido à sua estrutura mais complexa, tem uma ampla faixa de decomposição de 250 a 500°C (Oliveira et al., 2013; Yang et al., 2020).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PLANTIO

Os materiais genéticos utilizados na pesquisa foram clones da espécie *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, o clone AEC144 (clone C1) e o AEC224 (Clone C2). O clone C1 foi obtido na fazenda Mourão, a área do talhão foi de 2,5 ha e o clone C2, proveniente da fazenda Macaco, com área de plantio de 2,7 ha, os plantios foram realizados em julho de 2015. Ambas fazendas são pertencentes à Usina Petribu, localizadas na Zona da Mata de Pernambuco, Brasil.

A fazenda Mourão está localizada no município de Tracunhaém (7°45'00"S de latitude e 35°25'00"W de Longitude), com uma altitude de 120 metros, distante 48,86 km da capital Recife. E a fazenda Macacos está inserida no município de Paudalho (07°53'S de latitude e 35°10' W de longitude), com altitude média de 69 m, distante 37 km da capital.

O clima da região é do tipo tropical chuvoso com verão seco e a precipitação média anual de 1634 mm e 21°C de temperatura. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), os solos predominantes nos municípios do experimento são os Latossolos e Argissolos em topos de chapadas e relevos residuais, enquanto Gleissolos e Neossolos Flúvicos ocorrem nas áreas de várzeas (Santos et al., 2018).

As informações silviculturais dos clones encontram-se na tabela 3.

**Tabela 3. Dados médios silviculturais dos clones C1 e C2 (*Eucalyptus urophylla*) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, com base nas árvores amostradas no talhão**

Clone	Espécie	Espaçamento (m)	Idade (anos)	Altura total (m)	Altura comercial (m)	DAP (cm)	
C1	i144	<i>E. urophylla</i>	3 x 2	6	25,01	20,5	16,9
C2	i224	<i>E. urophylla</i>	3 x 2	6	23,9	19,7	15,7

Fonte: Autor, 2025.

## 4.2 AMOSTRAGEM, COLETA E PREPARO DO MATERIAL PARA A CARACTERIZAÇÃO

Para a seleção das árvores, foi realizado um inventário florestal piloto com o objetivo de determinar o diâmetro médio à altura do peito (DAP, a 1,30 m do solo) e, com base nesses dados, selecionar as árvores representativas de cada talhão. Foram selecionadas dez árvores representativas de cada talhão, de acordo o diâmetro médio e as condições fitossanitárias, evitando-se as árvores localizadas na borda do talhão.

Após a seleção, as árvores foram abatidas e medida sua altura total e altura comercial (diâmetro  $\geq 5$  cm) (Figura 8A). As árvores foram cubadas para a determinação do volume de madeira na parcela, conforme o método de Smalian. De cada árvore, retirou-se dois discos de aproximadamente 5 cm de espessura ao longo do tronco nas posições longitudinais na altura de 1,30 m do solo (DAP) e a 0%, 25%, 50%, 75%, e 100% da altura comercial de cada indivíduo (Figura 8B e 8C).

**Figura 8. Determinação da altura (A), corte da árvore em diferentes posições e obtenção dos discos amostrados ao longo do fuste (C) de árvores provenientes dos plantios da Zona da Mata de Pernambuco**

(A) AMOSTRAGEM DA ÁRVORE  
n = 10 indivíduos



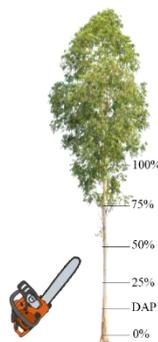
Clone i144

*Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*

Clone AEC 2034

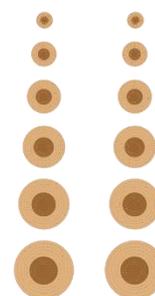
*Eucalyptus camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*

(B)CORTE DA ÁRVORE



(C) AMOSTRA BASE - TOPO

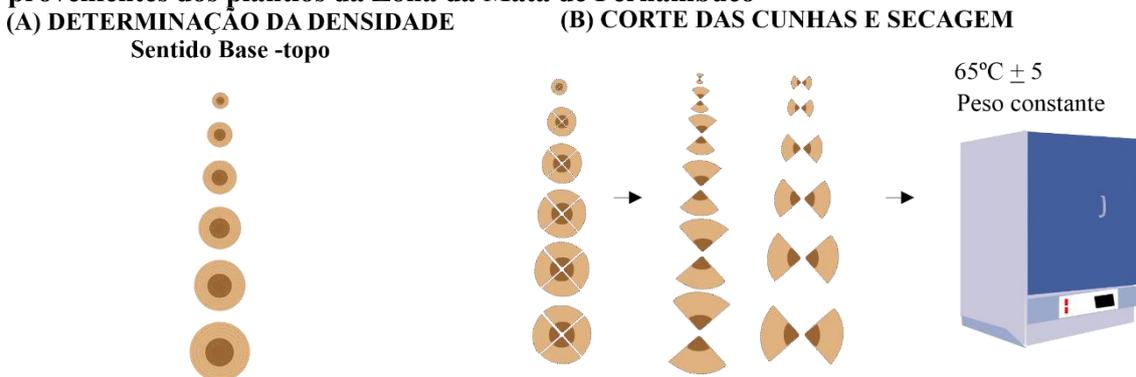
- 2 discos por posição
- 5 cm de espessura



**Fonte:** Autor, 2025.

Dos dois discos retirados em cada posição, um foi destinado para a determinação da densidade básica da madeira (Figura 9A), enquanto o outro disco da sessão foi seccionado em quatro cunhas para ser destinado para as avaliações. As cunhas foram levadas à estufa de circulação forçada de ar a  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  para obtenção de peso constante (Figura 9B).

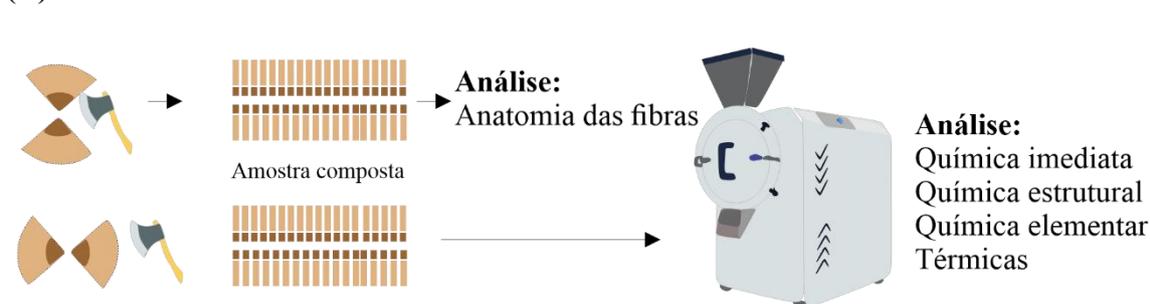
**Figura 9. Amostragem dos discos para a determinação da densidade básica no sentido (base-topo) e corte do disco em cunha para secagem em estufa e de madeiras de árvores provenientes dos plantios da Zona da Mata de Pernambuco**



Fonte: Autor, 2025.

Após a secagem, uma dupla de cunhas foi transformada em cavacos para a determinação da anatomia das fibras. As outras duas cunhas foram moídas em um moinho de facas do tipo Willey. Após passar no moinho, o material foi passado em peneiras com diferentes malhas, de acordo com a avaliação. Foi utilizada uma amostra composta de todas as posições das árvores, unindo-se as cunhas de posições opostas, para as análises anatômicas, química estrutural, química imediata e química elementar e termogravimetria dos indivíduos (Figura 10).

**Figura 10. Transformação das cunhas em cavacos para uso de madeiras de árvores provenientes dos plantios da Zona da Mata de Pernambuco em moinho**



Fonte: Autor, 2025.

Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira da Universidade Federal Rural de Pernambuco, exceto a análise de química elementar e a termogravimétrica, que seguiram para outros laboratórios.

### 4.3. PARÂMETROS AVALIADOS PARA CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA

#### 4.3.1 Densidade básica

A densidade básica (DB) da madeira foi avaliada ao longo do tronco nas posições de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, além do DAP. Foi determinada pelo método de imersão em água, conforme a NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003).

$$Db \text{ (g. cm}^{-3}\text{)} = \frac{Ms}{V_{sat}}$$

Onde:

Ms = Massa seca (g);

V sat = Volume saturado (cm<sup>3</sup>).

Os discos foram saturados em água para alcançarem seu volume saturado e pesadas em balança de precisão. Em seguida, foram secas ao ar por alguns dias e colocadas em estufa em circulação forçada a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  para determinação do peso seco

#### 4.3.2 Biomassa

Para a determinação da biomassa acima do solo foi utilizado o método direto de avaliação de árvores. Depois da árvore ser derrubada, todas as folhas e galhos foram retirados, separadamente, e pesado em campo para a determinação do peso úmido, com auxílio de uma balança digital móvel com capacidade máxima de 25 kg. Em seguida, foi retirada uma amostra representativa, de aproximadamente 300 g de folha e galho.

No laboratório, para determinação da massa seca, as amostras foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de  $65^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , até obtenção de peso constante. Em seguida, as amostras foram pesadas novamente em balança eletrônica de precisão 0,01 g, para a determinação da massa seca.

De posse dos dados de massa fresca e seca, foi estimada a biomassa de cada componente em kg, conforme a equação:

$$BM = \frac{PU(c) * PS (a)}{PU (a)}$$

Onde:

BM = biomassa;

PU(c) = peso de matéria úmida de folhas ou galhos com a casca em campo, em kg;

PU(a) = peso de matéria úmida da amostra levada ao laboratório, em kg;

PS(a) = peso de matéria seca da amostra, em kg.

A biomassa da madeira dos fustes (BF) foi determinada com o volume com casca, pela equação:

$$BF = V * DB$$

Onde:

V = volume de madeira, em m<sup>3</sup>;

DB = densidade básica da madeira, em kg.m<sup>-3</sup>.

A partir da biomassa média (BM) das árvores avaliadas, a biomassa por hectare foi estimada multiplicando a BM pelo número de árvores por hectare em cada talhão (Santana et al., 2008).

#### 4.3.3 Propriedades química da madeira

Para a análise da química estrutural da madeira, o material retido na peneira de malha de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh foi utilizado para as determinações, conforme as metodologias da tabela 4.

**Tabela 4. Metodologia aplicada para a quantificação dos teores de extrativos, lignina insolúvel e lignina solúvel**

<b>Avaliação</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Referência</b>
Teor de extrativo	TAPPI T 204 cm-17	TAPI, 2017
Teor de lignina	TAPPI T 222 om-15	TAPI, 2015
Teor de lignina solúvel	Goldschimid	Goldschimid (1971)

Para a quantificação do teor de extrativos totais (TEX) foram utilizados três diferentes sistemas de solventes. Na primeira etapa, foi utilizado 2 g do material peneirado, colocado em cartucho de celulose e levado para o sistema de extração Soxhlet contendo 250 mL de solução etanol-hexano (1:2), por seis horas. Após a recuperação do solvente, o material levado à estufa para eliminação do solvente residual. Na segunda etapa, o material seco retornou para o Soxhlet em cartucho de celulose com 250 mL de etanol a 95%, por um período de 4 horas. Em seguida, o material foi

colocado novamente na estufa para eliminação do solvente residual. Na última etapa de extração, foi realizada a solubilidade em água quente, na qual o material com adição de 500 mL água destilada foi levado para banho maria a 100°C por 1 hora. O material foi filtrado em cadinho filtrante e colocado em estufa por 24 horas. Após esse período, foi colocado em dessecador, pesado e calculado segundo a equação:

$$TEX (\%) = \frac{Pas - (Pac - Pc)}{Pas} * 100$$

Onde:

Pas = Peso da amostra seca (g);

Pac= Peso da amostra + cadinho (g);

Pc = Peso do cadinho filtrante (g).

O teor de lignina insolúvel (TLI) foi determinado em ácido. Para isso, foram utilizadas 0,3 g do material livre de extrativos e colocados em tubo de ensaio com 3 mL de ácido sulfúrico a 72%. Em seguida, o material foi levado para banho-maria a 30 °C por 1 hora e transferido para frasco de capacidade de 100 mL, com 84 mL de água destilada. O material foi filtrado e deixado para secar por 24 horas para ser pesado posteriormente. O teor de lignina foi calculado conforme a seguinte equação:

$$TLI (\%) = \frac{(Pac - Pc)}{0,3 * AS}$$

Onde:

Pac = Peso da amostra + cadinho (g);

Pc = Peso do cadinho filtrante (g);

AS = Porcento absolutamente seco.

Para o teor de lignina solúvel (TLS), foi utilizado o material filtrado na etapa anterior, em que foi preparada uma solução branco de 3 mL de ácido sulfúrico a 72%; com 1000 mL de água destilada. O espectrofotometro foi ajustado para determinar as absorvâncias nos comprimentos de onda de 215 e 280 nm, sendo realizada as leituras das soluções. O teor de lignina solúvel foi determinado pela equação:

$$TLS (\%) = \frac{4,3 * A215 * A280}{300 * Pa} * 100$$

Onde:

A215 = Absorbância do filtrado a 215 nm;

A280 = Absorbância do filtrado a 280 nm;

Pa = Peso da amostra (g).

O teor da holocelulose (Holo) foi estimado utilizando os teores de extrativo, lignina solúvel e insolúvel e de cinzas determinados previamente, pela equação:

$$THolo (\%) = 100 - (TET + TLS + TLI + TCZ)$$

Onde:

TET = Teor de Extrativos Totais (%);

TLS = Teor de Lignina Solúvel (%);

TLI = Teor de Lignina Insolúvel (%);

TCZ = Teor de Cinzas (%).

A composição química imediata da madeira foi obtida conforme preconizado pela norma da ASTM D1762 - 84 (1995), com algumas adaptações obtendo-se assim, os valores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

O teor de umidade do fuste (TU) foi realizado na fração de madeira que passou na peneira de 20 mesh e retida em 40 mesh, em que foi utilizada 1 g, levada para a estufa a 105 °C até peso obtenção de constante, e utilizada a equação:

$$TU = \frac{Ps(ar) - Ps(est)}{Ps(est)} \times 100$$

Onde:

Ps (ar) = peso da matéria seca ao ar (g);

Ps (est) = peso da matéria massa seca a 105 °C (g).

O teor de materiais voláteis (TMV) foi realizado na fração retida na peneira 100 mesh. Foi utilizado 1 g do material seco e colocado no cadinho e levado fechado para a mufla na temperatura de 950 °C por um total de 11 minutos, sendo 2 min na borda externa da mufla, 3 min na borda interna e 6 min dentro da mufla com a porta fechada. O material foi retirado, colocado em dessecador para esfriar e pesado em balança, obtendo o TMV em porcentagem (%), segundo a equação:

$$TMV = \frac{Ms(i) - Ms(f)}{Ms(a)} \times 100$$

Onde:

Ms (i) = massa seca a 105 °C (g);

Ms (f) = massa seca a 950 °C (g);

Ms (a) = massa da amostra (g).

O teor de cinzas (TCZ) foi determinado com a fração que passou na peneira de 100 mesh. Para isso, foi utilizado 1 g do material seco, colocado na mufla de porta fechada, a uma temperatura de 750 °C. Após seis horas, o material foi retirado e colocado em dessecador para esfriar, pesando posteriormente em balança de precisão, e utilizada a equação:

$$TCZ = \frac{Ms(mufla)}{Ms(est)} \times 100$$

Onde:

Ms (mufla) = massa seca a 750 °C (g);

Ms (est) = massa seca a 105 °C (g).

Para a determinação de teor de carbono fixo (TCF) foi utilizada a forma indireta, por meio dos valores de materiais voláteis e teor de cinzas, conforme a equação:

$$TCF = (TMV + TCZ) - 100$$

Onde:

TMV = Materiais voláteis (%);

TCZ = Teor de cinzas (%).

Para a análise da composição elementar dos materiais estudados, as amostras foram encaminhadas ao Núcleo de Extensão e Prestação de Serviços (NEPS) do Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais.

Foi utilizado o material passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na de 270 mesh de cada clone, sendo encaminhado ao laboratório. Determinou-se a porcentagem de carbono (C) e hidrogênio (H). Determinou-se também a relação C/H. Foi utilizado o Analisador CHNS/O 2400 Series II Perkin-Elmer, equipamento que utiliza como gás de

arraste e ignição o hélio e o oxigênio, respectivamente. A estimativa de oxigênio foi determinada pela equação abaixo (SHEN et al., 2010):

$$O = 0,340 TCF + 0,469 TMV - 0,023 TCZ$$

Onde:

TCF = Teor de Carbono Fixo (%)

TMV = Teor de Materiais Voláteis (%)

TCZ = Teor de Cinzas (%)

#### 4.3.4 Propriedades anatômicas da madeira

Para a determinação das dimensões da fibra da madeira, utilizou-se a metodologia de Barrichelo e Foelkel (1983), que consiste na dissociação da madeira em ácido. Para isso, os cavacos foram fragmentados em palitos e imersos numa solução macerante de ácido nítrico e ácido acético (1:3), por 6 horas. Em seguida, foram lavadas e coradas em uma solução de safranina aquosa a 1% e posteriormente foram preparadas lâminas temporárias com glicerina P.A. Para mensuração das fibras, foi aplicada a metodologia descrita pela Comissão Panamericana de Normas Técnicas (COPANT, 1974).

As fotomicrografias foram capturadas utilizando o sistema de aquisição de imagens Honestech TVR 25®, com uma câmera acoplada a um microscópio óptico. Após a obtenção das imagens, a mensuração das fibras foi realizada por meio do software ImageProPlus®. Foi medido o comprimento (mm), a largura ( $\mu\text{m}$ ) e o diâmetro do lume ( $\mu\text{m}$ ) de 40 fibras de cada árvore. A espessura da parede ( $\mu\text{m}$ ) foi obtida pela subtração do diâmetro da fibra com o diâmetro do lume dividido por dois.

#### 4.3.5 Propriedades energéticas da madeira

O poder calorífico superior, inferior e útil foi estimado partir dos valores obtidos na análise química imediata da madeira (teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) de acordo com Parikh, Channiwala e Ghosal (2005)

$$PCS \text{ (kcal/kg)} = 84,5104 \times (\%TCF) + 37,2601 \times (\% TMV) - 1,8642 \times (CZ)$$

$$PCI \text{ (kcal/kg)} = PCS - (600 \times 0,09 \times \% H)$$

$$PCU \text{ (kcal/kg)} = (PCI \times (1 - (0,01 \times \% TU)) - (600 \times 0,01 \times \% TU))$$

Onde:

PCS = poder calorífico superior, base seca (kcal/kg);

PCI = poder calorífico inferior, base seca (kcal/kg);

PCU = poder calorífico útil, base úmida (kcal/kg);

H = teor de hidrogênio considerado de 5,99%.

TCF = teor de carbono fixo (%)

TCZ = teor de cinzas (%)

TMV = teor de materiais voláteis (%)

A densidade energética (DE) foi obtida utilizando o produto entre a densidade básica da madeira na altura do DAP e o poder calorífico superior estimado.

$$DE \text{ (MJ.m}^{-3}\text{)} = DB * PCS$$

Onde:

DB = Densidade Básica (g.cm<sup>-3</sup>)

PCS = Poder Calorífico Superior (kJ.g<sup>-1</sup>)

O estoque de carbono (EC) foi calculado pela multiplicação da densidade básica média do fuste e o teor de carbono (Reis et al., 2023; Protássio et al., 2013).

$$EC \text{ (g/cm}^3\text{)} = DB * TC$$

Onde:

DB = Densidade Básica (g.cm<sup>-3</sup>)

TC = Teor de carbono (%)

O Índice de Valor Combustível (IVC) foi calculado segundo o modelo proposto por Purohit e Nautiyal (1987), de acordo com a fórmula:

$$IVC = \frac{PCS * DB}{TC}$$

Onde:

PCS = Poder Calorífico Superior (kJ.g<sup>-1</sup>)

DB = Densidade Básica (g.cm<sup>-3</sup>)

TC = Teor de Cinzas (%)

Para a realização da Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG), as amostras foram enviadas para o Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE/MCTI, Unidade de Pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, integrante da estrutura do Poder Executivo Federal, com sede em Recife/PE.

Foram pesados 2 mg de uma amostra composta para cada clone, sendo utilizado o material moído e retido nas peneiras de 40 e 60 mesh. As análises foram realizadas a partir da temperatura ambiente, em torno de 25° C, até a temperatura máxima de 600°C, com taxa de aquecimento de 10 °C.minuto<sup>-1</sup>, em cadinho de alumínio. Foi utilizado o aparelho TGA – 60 (SHIMADZU) com o gás nitrogênio na vazão constante de 30 ml.min<sup>-1</sup>. A curva termogravimétrica (TG) foi obtida para verificar a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada da perda de massa (DTG).

Para analisar a resistência térmica da madeira, foram gerados termogramas e as funções resultantes foram interpoladas e derivadas. As curvas termogravimétricas foram utilizadas para avaliar a perda de massa da madeira dentro da faixa de temperatura analisada, enquanto a análise térmica diferencial identificou a temperatura correspondente à taxa máxima de degradação térmica, indicando o momento de maior liberação de energia.

#### 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todos os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) a 95% de probabilidade para comparação entre os dois clones estudados. Para a densidade da madeira, além da ANOVA, foi utilizada a análise fatorial (2 clones x 6 posições na árvore) e aplicado o teste de Tukey. O software utilizado nas análises estatísticas foi o Sisvar.

Foi realizada a Análise de Componentes Principais (PCA) com o objetivo de identificar as variáveis que mais contribuíram para a caracterização energética da madeira dos clones avaliados. Essa abordagem permitiu uma melhor interpretação das inter-relações entre os parâmetros estudados, mesmo diante da semelhança estatística entre os clones, para a maioria das variáveis avaliadas.

Para comparar o desempenho geral dos clones, foi realizado um ranqueamento com base nas variáveis de biomassa, propriedades físicas, anatômicas, químicas e

energéticas da madeira. Cada uma foi avaliada conforme o resultado da análise estatística, ou seja, quando houve diferença significativa entre os clones, o valor 2 foi atribuído ao clone com o maior resultado e o valor 1 ao de menor valor. Caso não houvesse diferença significativa, ambos receberam o valor 0. Em seguida, os pontos atribuídos foram somados dentro de cada grupo de características, gerando subtotaís por categoria e, ao final, uma pontuação total por clone. Esse ranqueamento permitiu identificar de forma prática qual material genético apresentou melhor desempenho para fins energéticos, considerando o conjunto das variáveis analisadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a maioria das variáveis, os clones apresentaram resultados semelhantes estatisticamente ( $P < 0,05$ ). As Tabelas de Análise de Variância referentes às características estudadas encontram-se no Apêndice.

### 5.1 DENSIDADE BÁSICA

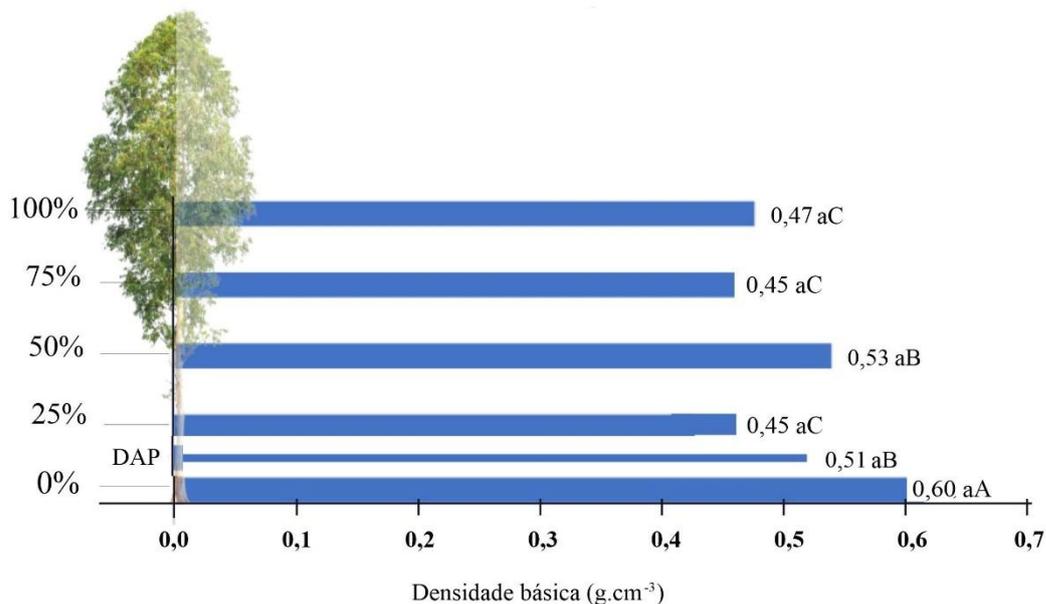
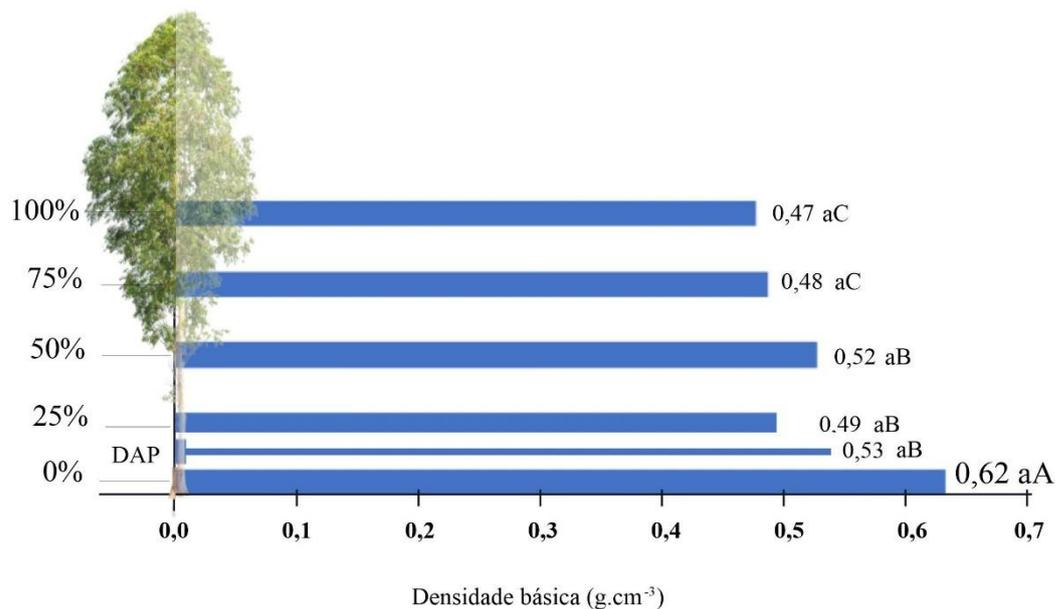
A densidade básica da madeira não apresentou diferença estatística significativa entre os clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco ( $P < 0,05$ ). No entanto, observou-se variação significativa entre as posições ao longo do fuste, com os maiores valores registrados na base do tronco (Figura 12).

A densidade básica é uma característica determinante no potencial energético da madeira, pois influencia diretamente o poder calorífico por volume. Madeiras com maior densidade tendem a ter mais biomassa compactada em um mesmo volume, o que resulta em maior energia gerada por metro cúbico durante a combustão. Essa característica é especialmente relevante quando se busca matéria-prima para fins energéticos, como a produção de lenha ou carvão vegetal de alto rendimento.

O valor de densidade mais alto na base do tronco indica que essa porção da madeira possui maior concentração de tecidos maduros e lignificados, o que aumenta sua eficiência energética (Billard et al., 2021; Guedes et al., 2018; Wassenberg et al., 2015). Ao observar a variação da densidade ao longo do fuste de clones de *Eucalyptus* sp. aos 6,7 anos, Lima et al., (2020) constataram que o maior valor foi observado na base das árvores e o valor médio da densidade foi de  $0,524 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Esses resultados são ainda mais relevantes considerando que os clones C1 e C2 foram desenvolvidos especificamente para fins energéticos, tendo como foco principal a produção de biomassa com alta densidade e eficiência na conversão energética. Esses materiais genéticos foram desenvolvidos pela APERAM BioEnergia, uma empresa do setor siderúrgico que utiliza madeira de eucalipto como fonte renovável de energia para seus altos-fornos. Estão devidamente registrados no Registro Nacional de Cultivares (RNC) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), conforme consulta realizada no sistema online do RNC para os materiais genéticos utilizados (C1 -nº 21874 e C2 - nº 21876) (MAPA, 2025).

**Figura 11. Densidade básica dos clones C1 (A) e C2 (B) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**



Nota: \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, minúscula entre clone e maiúscula para as diferentes posições ao longo do fuste ( $P < 0,05$ ).

A seleção de clones de eucalipto com alta densidade básica é recomendada para maximizar o rendimento energético, uma vez que essa característica apresenta alta

herdabilidade e possui uma forte relação de causa e efeito com a densidade energética (Couto; Teodoro; Trugilho, 2017).

## 5.2 BIOMASSA

A análise da biomassa aérea dos clones C1 e C2, cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, demonstrou que não houve diferenças significativas entre os componentes folha, fuste e biomassa total acima do solo ( $P > 0,05$ ), com exceção dos galhos, cujo valor foi significativamente maior no clone C1 (Tabela 5). A biomassa total acima do solo foi de  $151,98 \text{ t.ha}^{-1}$ , com o fuste representando mais de 90% da biomassa, o que é particularmente relevante do ponto de vista energético, pois esse componente é o principal insumo para a geração de bioenergia, especialmente na forma de lenha e carvão vegetal.

**Tabela 5. Produção de biomassa da parte aérea (folha, galho, fuste, biomassa total e biomassa por hectare) dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	Componente da árvore ( $\text{t.ha}^{-1}$ )			Biomassa total acima do solo ( $\text{t.ha}^{-1}$ )
	Folha	Galho	Fuste	
C1	5,03	8,00*	140,5	153,5
C2	4,82	5,85	139,8	150,4
Média	4,92	6,92	140,13	151,98
CV (%)	7,31	10,8	9,40	6,33

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones avaliados. CV – Coeficiente de variação.

A elevada biomassa do fuste evidencia o potencial energético dos clones avaliados, pois é nesse compartimento que se encontra a maior concentração de madeira densa e com alto poder calorífico, adequada para conversão em energia térmica. Estudos demonstram que espécies de *Eucalyptus* com crescimento rápido e elevada densidade de madeira são ideais para uso em florestas energéticas (Knapic et al., 2014; Singh et al., 2019; Soares et al., 2018).

Além disso, a comparação com os resultados de Alves (2007), que avaliou 13 clones em Araripina-PE com quatro anos de idade, revelou uma produção média de  $88 \text{ t.ha}^{-1}$ , variando de  $50,87$  a  $119,35 \text{ t.ha}^{-1}$ . Apesar da diferença etária, os resultados obtidos na Zona da Mata são significativamente superiores, indicando que a região tem

alto potencial para cultivo energético de eucalipto, sobretudo se forem utilizadas estratégias de manejo e seleção de genótipos adaptados às condições locais.

A biomassa de galhos e folhas, embora represente apenas 7,79% da biomassa total, desempenha papel importante na sustentabilidade dos ecossistemas florestais, contribuindo com a ciclagem de nutrientes e cobertura do solo. Do ponto de vista energético, esses compartimentos podem também ser aproveitados na forma de cavacos ou biomassa particulada.

Ambos os clones apresentam potencial produtivo semelhante e elevado, sendo promissores para uso em sistemas de produção de energia renovável a partir de biomassa florestal na Zona da Mata nordestina. Embora esta região esteja geograficamente distante do polo gesso do Araripe, principal centro consumidor de madeira energética no estado de Pernambuco, o alto volume de biomassa por hectare viabiliza o fornecimento, desde que haja uma estrutura logística eficiente. Com planejamento de transporte e armazenamento, é possível integrar a produção florestal da Zona da Mata à cadeia energética do gesso, contribuindo tanto para a diversificação da oferta de matéria-prima, quanto para o desenvolvimento regional sustentável.

### 5.3 PROPRIEDADES QUÍMICA

Entre os parâmetros químicos avaliados para a química estrutural, houve diferença significativa apenas para o teor de extrativos ( $P < 0,05$ ), sendo o clone C1 superior ao C2. Para lignina insolúvel, lignina solúvel e holocelulose, os valores foram semelhantes entre os clones (Tabela 6).

**Tabela 6. Teor de extrativo (TEX), teor de lignina insolúvel (TLI), teor de lignina solúvel (TLS) e Holocelulose (HOLO) dos clones dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	TEX (%)	TLI (%)	TLS (%)	HOLO (%)
C1	6,03*	24,49	2,86	66,41
C2	5,31	23,25	2,57	68,61
Média	5,62	23,64	2,68	67,85
CV (%)	28,97	12,44	8,98	3,21

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones. CV – Coeficiente de variação.

O maior teor de extrativos no clone C1 é relevante do ponto de vista energético, pois essas substâncias (resinas, taninos, óleos, ceras) são compostos orgânicos de fácil

volatilização e alto poder calorífico. Ou seja, sua presença aumenta a eficiência da combustão, contribuindo para maior liberação de energia por massa queimada. Além disso, os extrativos participam da formação de produtos como o óleo pirolítico, podendo ampliar as possibilidades de conversão energética da madeira, inclusive em processos termoquímicos como a pirólise (Protásio et al., 2019).

A lignina, por sua vez, é o principal componente associado à resistência térmica e rendimento gravimétrico de carvão vegetal. Sua estrutura complexa e rica em carbono confere maior poder calorífico ao material. Os valores obtidos neste estudo indicam que ambos os clones apresentam alto potencial para produção de carvão com boa qualidade energética (Pereira et al., 2013).

Embora a holocelulose represente a maior fração da madeira, ela tem menor impacto direto no poder calorífico em comparação à lignina e aos extrativos. No entanto, é importante para a estabilidade térmica da biomassa durante o processo de combustão.

Os resultados obtidos para os parâmetros da análise imediata (teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas) revelaram que não houve diferenças estatísticas significativas entre os clones avaliados ( $P < 0,05$ ) (Tabela 7).

**Tabela 7. Teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCZ) e teor de carbono fixo dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	TU (%)	TMV (%)	TCF (%)	TCZ (%)
C1	10,65	81,11	18,42	0,54
C2	9,87	81,47	17,18	0,62
Média	10,26	81,29	17,80	0,58
CV (%)	10,39	7,72	4,88	13,10

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones. CV – Coeficiente de variação.

O teor de umidade é um dos principais fatores que afetam o desempenho energético da biomassa florestal. A madeira com teor de umidade em torno de 10%, como observado nos clones deste estudo, é considerada ideal para combustão, pois possibilita queima mais eficiente, maior liberação de energia útil e menor perda térmica com a evaporação da água (Tucho et al., 2023).

Além disso, teores de umidade nessa faixa contribuem para melhor conservação da madeira durante o armazenamento, fator importante em cadeias produtivas que exigem tempo de estocagem, como no fornecimento para o polo gesseiro do Araripe. Assim, ambos clones demonstram elevada aptidão energética, pois combinam boa produtividade de biomassa com umidade dentro da faixa ideal para combustão. Isso

fortalece a viabilidade desses materiais genéticos para uso em sistemas de produção de energia térmica a partir de biomassa florestal.

O teor de materiais voláteis médio encontrado nos clones foi de 81,29%, valor que se encontra dentro da faixa desejável para madeiras destinadas à combustão (75% a 85%), conforme estabelecido por Carvalho et al., (2021). Os materiais voláteis são compostos que se desprendem da madeira sob aquecimento, transformando-se em gases inflamáveis. Quando esses gases entram em contato com o oxigênio e uma fonte externa de calor (como uma chama ou resistência elétrica), ocorre a ignição, dando início à formação das chamas. Dessa forma, um teor adequado de voláteis garante uma combustão eficiente, favorecendo tanto o acendimento quanto a manutenção inicial do fogo. O teor médio de voláteis, obtido para os clones avaliados, foi de 81%, estando dentro da faixa desejável, indicando o potencial dos clones para fins energéticos (Rupar; Sanati, 2003).

Em seguida à queima dos voláteis, entra em ação o carbono fixo, fração sólida do combustível composta majoritariamente por carbono. Essa parte do material é responsável por sustentar a combustão de forma mais lenta, contínua e estável, com liberação gradual de calor. O carbono fixo representa, portanto, a principal fonte de energia térmica duradoura no processo de queima da biomassa. Os valores médios encontrados para este parâmetro (17,80%) indicam que os clones apresentam comportamento compatível com materiais lenhosos utilizados para produção de calor em fornalhas, caldeiras e na fabricação de carvão vegetal.

Outro aspecto relevante foi o baixo teor de cinzas observado, com média de 0,58%. Esse resultado é importante porque cinzas são resíduos inorgânicos não combustíveis, que se acumulam ao final do processo de queima e não contribuem para a geração de energia. Teores elevados de cinzas podem causar acúmulo de resíduos em equipamentos, exigindo maior frequência de limpeza, aumentando os custos de manutenção e diminuindo a vida útil de fornalhas e caldeiras. Santos (2008) destaca que teores inferiores a 1% são recomendados para madeira destinada à geração de energia, sendo, portanto, um indicativo positivo para os clones avaliados.

Com base nesses resultados, pode-se afirmar que os materiais genéticos estudados apresentam composição adequada para uso como biomassa energética. O equilíbrio entre alto teor de voláteis (~81%) (boa ignição), presença significativa de carbono fixo (18%) (combustão prolongada) e baixo teor de cinzas (<1%) (maior

eficiência dos sistemas térmicos) confirma a viabilidade técnica desses clones para aplicações industriais e energéticas, especialmente no setor que demanda calor contínuo e de boa qualidade, como o polo gesso e a siderurgia (Brand, 2010; Cortez et al., 2008).

As espécies estudadas apresentaram diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) entre si quanto à composição química elementar. O clone C1 apresentou os maiores teores de carbono (45,26%) e hidrogênio (6,27%), enquanto o clone C2 apresentou a maior razão C/H (7,67). Por outro lado, o teor de oxigênio não apresentou variação estatisticamente significativa entre os clones, com média de 44,16% (Tabela 8).

**Tabela 8. Resultados médios dos teores de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	C (%)	H (%)	C/H	O (%)
C1	45,26*	6,27*	7,22	44,29
C2	44,85	5,85	7,67*	44,03
Média	45,05	6,06	7,44	44,16
CV (%)	21,1	11,15	2,47	5,78

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones. CV – Coeficiente de variação.

A alta concentração de carbono e hidrogênio está diretamente associada ao maior poder calorífico da biomassa, favorecendo seu uso para combustão direta. Esses elementos são os principais responsáveis pela liberação de energia térmica durante a queima, enquanto o oxigênio, apesar de ser essencial para o processo de combustão, não contribui significativamente para o aumento do poder calorífico (Sheng; Azevedo, 2005).

Pesquisas recentes, como a conduzida por Costa (2019), corroboram esses achados e fornecem dados específicos para diferentes clones de eucalipto. O estudo revelou teores de carbono variando de 46,08% a 49,12% em clones como *E. grandis* x *E. camaldulensis*, *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. grandis*.

A relação C/H, que foi de 7,22 para o clone C1 e 7,67 para o C2, está dentro da faixa ideal para combustíveis sólidos (6:1 a 8:1), o que garante um bom equilíbrio entre ignição rápida e estabilidade térmica. Relações mais altas tendem a favorecer combustíveis com maior tempo de queima, enquanto relações mais baixas favorecem maior volatilização.

O teor de oxigênio médio observado (44%) está de acordo com os valores reportados por Silveira et al. (2020) e Trugilho et al. (2012), os quais relataram médias

de 43,2% e 44,78%, respectivamente. O oxigênio presente na madeira, denominado oxigênio de constituição, está ligado a grupos funcionais como hidroxilas, carboxilas e éteres. Embora ele não contribua diretamente para a liberação de energia, sua presença influencia a estabilidade térmica e pode afetar negativamente o poder calorífico da biomassa, conforme apontado por Huggett (1980).

Os clones avaliados apresentam características químicas compatíveis com aplicações energéticas, sendo o clone C1 ligeiramente mais vantajoso em termos de poder calorífico devido aos seus maiores teores de carbono e hidrogênio. A escolha da biomassa para geração de energia térmica deve levar em conta não apenas o poder calorífico total, mas também a proporção entre carbono e hidrogênio, garantindo eficiência e otimização do processo energético.

O teor de oxigênio presente em madeiras de eucalipto geralmente varia entre 40% e 45% em base seca, dependendo da espécie, no material estudado foi em média 44%. Diversos autores encontraram o teor de oxigênio com valor próximo ao da presente pesquisa. Silveira et al., (2020) encontrou o valor de 43,2% para um clone de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos de idade, plantado no Rio Grande do Sul. Ao avaliarem 15 clones de Eucalipto, Truguilho et al. (2012), encontraram o valor médio de 44,78%, corroborando com o valor encontrado.

O oxigênio é um dos elementos que juntamente com o carbono e hidrogênio faz parte da composição da madeira, em estruturas moleculares como polissacarídeos. O oxigênio se liga a grupos funcionais como hidroxilas, carboxilas e éteres, os quais são responsáveis por muitas propriedades físicas e químicas da madeira (Yang et al., 2022).

Embora o oxigênio não contribua diretamente para a liberação de energia durante o processo de combustão, sua presença influencia no processo da queima. Esse oxigênio de constituição, pode afetar o poder calorífico e afetar a combustão, afetando o poder calorífico do material (Huggett, 1980).

#### 5.4 PROPRIEDADES ANATÔMICAS

A análise das características anatômicas das fibras dos clones revelou diferenças significativas para o comprimento e largura das fibras, enquanto o diâmetro do lume e espessura da parede não apresentaram variação estatisticamente significativa ( $P < 0,05$ ).

Os valores médios para as dimensões foram: comprimento de 823,20  $\mu\text{m}$ , largura de 16,26  $\mu\text{m}$ , diâmetro do lume de 10,32  $\mu\text{m}$  e espessura da parede de 0,60  $\mu\text{m}$  (Tabela 9).

**Tabela 9. Resultados médios das dimensões das fibras dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	Comprimento da fibra ( $\mu\text{m}$ )	Largura da fibra ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro do lume ( $\mu\text{m}$ )	Espessura da parede ( $\mu\text{m}$ )
C1	847,44*	17,02*	10,73	3,14
C2	798,97	15,51	9,93	2,79
Média	823,20	16,26	10,32	15,12
CV	32,02	8,47	18,86	2,4

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones. CV – Coeficiente de variação.

As propriedades anatômicas da madeira influenciam diretamente sua densidade, comportamento térmico e, conseqüentemente, o seu desempenho como fonte de energia. No presente estudo, os clones apresentaram diferenças significativas no comprimento e na largura das fibras. O clone C1 se destacou por possuir fibras mais longas e largas, o que está associado à maior densidade básica da madeira observada neste material.

A densidade está fortemente relacionada à proporção e estrutura das fibras. Fibras mais espessas e com maiores dimensões tendem a formar uma madeira mais compacta, com maior quantidade de material sólido por unidade de volume (Gonzalez et al., 2014). Isso resulta em um rendimento energético superior durante a combustão, pois há mais carbono disponível para ser oxidado, aumentando o poder calorífico da biomassa (Magalhães et al., 2020). Além disso, madeiras mais densas contribuem para maior estabilidade térmica, importante em aplicações como a produção de carvão vegetal e uso direto em fornalhas e caldeiras.

A presença de fibras curtas, como é característico do gênero *Eucalyptus*, também favorece a eficiência energética, uma vez que essas estruturas facilitam uma degradação térmica mais homogênea. Essa uniformidade no processo térmico permite uma combustão mais regular e controlada, com melhor aproveitamento energético da madeira (Poletto, 2017).

As características anatômicas observadas nos clones avaliados contribuem diretamente para o seu potencial de uso como biomassa energética, tanto por influenciarem a densidade quanto por favorecerem um comportamento térmico eficiente e estável durante a queima (Braz et al., 2014).

## 5.5 PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA

A análise dos valores médios do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) indicou diferenças estatisticamente significativas entre os materiais genéticos avaliados em que o clone C1 apresentou valores ligeiramente superiores ao C2 ( $P < 0,05$ ) (Tabela 10).

**Tabela 10. Valores médios estimado de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) nos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	PCS (kcal.kg <sup>-1</sup> )	PCI (kcal.kg <sup>-1</sup> )	PCU (kcal.kg <sup>-1</sup> )
C1	4573,05*	4249,59*	3807,39*
C2	4548,02	4224,56	3747,89
Média	4560,53	4237,03	3777,65
CV (%)	41,04	31,70	17,74

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones. CV – Coeficiente de variação.

Embora os clones possuam a mesma idade, o desempenho superior do clone C1 em termos de poder calorífico pode estar relacionado a características anatômicas e químicas do material lenhoso. Fatores como maior teor de extrativos totais e dimensões das fibras (como maior largura e comprimento) influenciam diretamente a liberação de energia durante a combustão (Vieira et al., 2019). Os extrativos, por exemplo, são compostos orgânicos que possuem alto poder calorífico, enquanto fibras mais espessas favorecem maior densidade e maior acúmulo de massa sólida por volume (Protássio et al., 2019).

Os valores obtidos para ambos os clones estão dentro da faixa recomendada para madeira utilizada em combustão direta, o que reforça sua viabilidade para uso como lenha em processos industriais e domésticos. Além disso, o uso desses materiais em sistemas energéticos é favorecido não apenas pelo valor calorífico, mas também pela rápida taxa de crescimento do eucalipto, o que garante alta produtividade de biomassa em ciclos curtos (Fahruddin et al., 2023; Lins et al., 2020; Lunguleasa; Spirchez; Zeleniuc, 2020).

Os resultados confirmam que os dois clones possuem potencial energético, com o clone C1 se destacando ligeiramente na eficiência de liberação de calor. Isso o torna particularmente indicado para aplicações que exigem maior desempenho térmico, como na produção de carvão vegetal ou no fornecimento de energia térmica para processos industriais.

De acordo com a análise estatística, foi observado que não houve diferença significativa ( $P < 0,05$ ) entre os clones para a densidade energética, sugerindo que ambos os materiais genéticos apresentam desempenho energético semelhante (Tabela 11).

**Tabela 11. Valores médios dos valores estimado de densidade energética, estoque de carbono e Índice de Valor Combustível (IVC) dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**

Clone	Densidade Energética (MJ.m <sup>-3</sup> )	Estoque de Carbono (kg.m <sup>-3</sup> )	IVC
C1	2423753,6	239,88	4516,31
C2	2319490,2	228,74	3731,08
Média	2371621,90	22,75	4123,70
CV (%)	9,17	14,87	21,78

Nota: \*teste F significativo ( $P < 0,05$ ) para comparação entre os clones. IVC – Índice de Valor Combustível; CV – Coeficiente de variação.

Apesar da ausência de diferença estatística, o clone C1 apresentou densidade energética superior, o que está em consonância com seus valores ligeiramente mais altos de densidade básica e poder calorífico. Isso reforça seu desempenho como biomassa compacta e eficiente, capaz de fornecer mais energia por metro cúbico de madeira, o que é altamente vantajoso em aplicações que demandam otimização do espaço de armazenamento, transporte e uso energético, como em fornalhas industriais, secadores e fornos do polo gesseiro.

A densidade energética é um parâmetro particularmente importante na logística e no aproveitamento da biomassa. Materiais com maior densidade energética são mais econômicos para transporte e estocagem, pois concentram mais energia em menor volume. Essa característica também favorece sistemas que dependem da alimentação volumétrica da madeira, como os que operam com toras ou cavacos.

Além disso, quando associamos os resultados de densidade energética aos demais parâmetros analisados, como teor de umidade, alto teor de carbono fixo e baixos teores de cinzas, percebe-se que os clones avaliados, especialmente o C1, possuem perfil técnico adequado para uso como fonte energética renovável e sustentável. O equilíbrio entre densidade, eficiência térmica e baixa produção de resíduos sólidos faz desses materiais excelentes candidatos ao uso em cadeias bioenergéticas, inclusive com potencial para substituição de combustíveis fósseis em escala local (Simetti et al., 2018).

Os valores estimados de estoque de carbono para os clones avaliados não apresentaram variação ( $P < 0,05$ ), com média geral de 22,75. O estoque de carbono

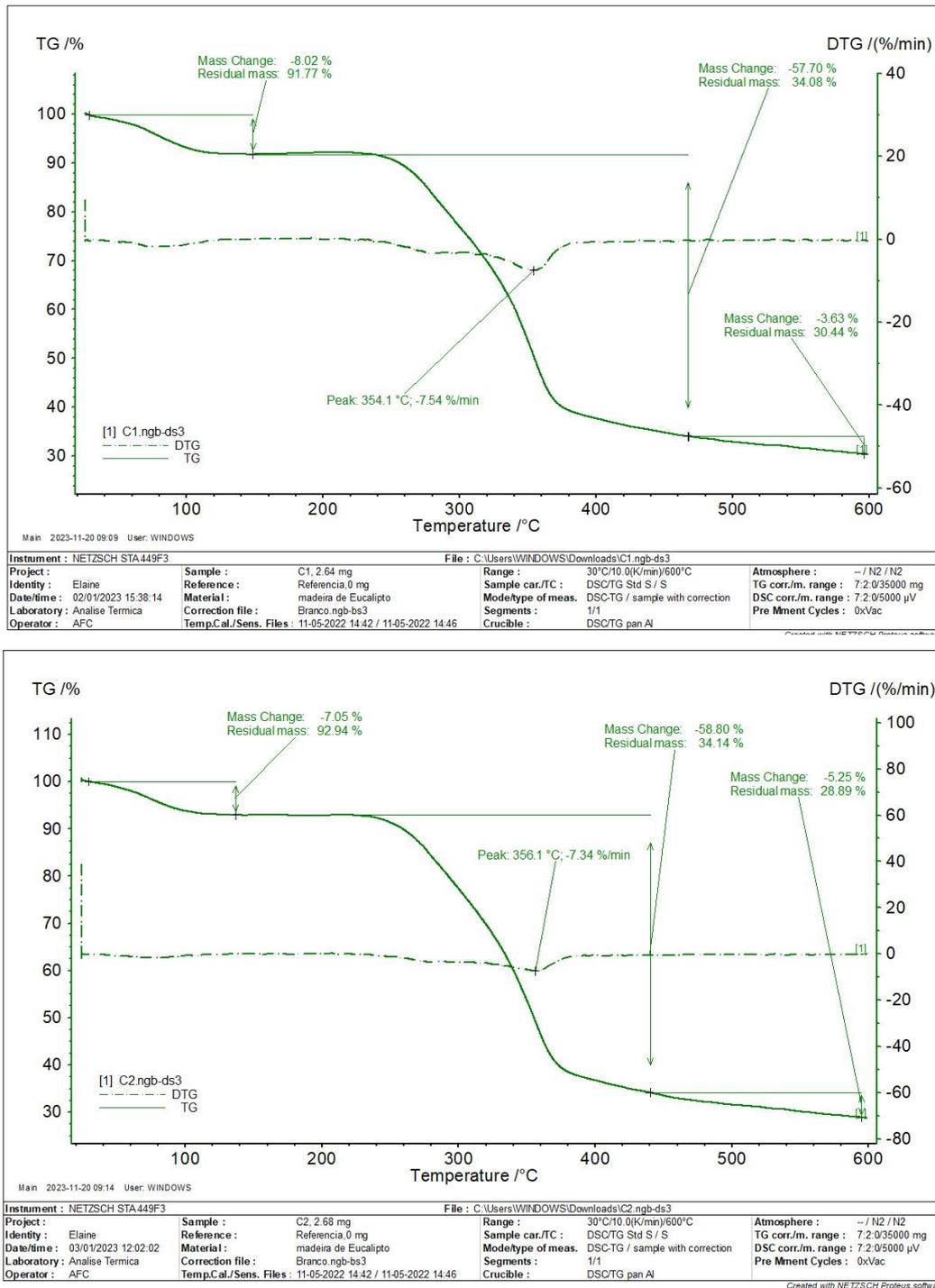
reflete diretamente a capacidade das espécies florestais de sequestrar CO<sub>2</sub> atmosférico e armazená-lo sob forma de biomassa, sendo um indicador importante para ações de mitigação das mudanças climáticas (SCHWERZ et al., 2020).

Segundo a tabela 12, o índice do valor combustível não variou significativamente entre os clones avaliados, com valor médio de 4123,70 (Tabela 10). Neste índice é considerado não apenas a quantidade de energia que é liberada pelo material, mas também o teor de cinzas presente em sua constituição, que é o resíduo inorgânico resultante do processo de combustão. Assim, quanto menor for o teor de cinzas, maior será o IVC que o material apresentará.

A ausência de variação significativa observada entre os clones, sugere que ambos possuem aplicação com desempenho energético satisfatório, mesmo quando os resíduos gerados na queima são considerados. Essa característica é importante em setores industriais que requerem combustão eficiente e geração de calor constante, como na produção cerâmica, operação de caldeiras e processos metalúrgicos. De acordo com a capacidade desses clones de fornecerem uma fonte de energia concentrada e consistente, esses materiais podem ser indicados como alternativas promissoras para atender às demandas energéticas desses setores.

A análise termogravimétrica (TGA) permitiu avaliar o comportamento dos clones ao longo de sua degradação térmica, identificando as etapas de perda de massa associadas à degradação de cada componentes químicos da madeira para os clones C1 e C2 (Figura 12).

**Figura 12. Termograma do clone C1 (A) e C2 (B) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**



Fonte: Autora, 2025.

Pode-se observar três momentos durante a degradação térmica dos clones, na etapa inicial (50°C – 150°C), ocorre a remoção da molécula de água livre e da adsorvida na estrutura da madeira. Nesta etapa, não há degradação significativa dos constituintes estruturais, como a celulose, hemicelulose e lignina, apenas a evaporação da molécula de água presente nos espaços intercelulares (Poletto, 2017). A pequena perda de massa (em média 7,5%) pode estar associada à volatilização de extrativos como os terpenos e compostos fenólicos voláteis. Há uma influência direta do tempo de ignição da biomassa, uma vez que madeiras com maior teor de umidade precisam dissipar essa água antes da queima eficiente, o que reduz o rendimento térmico inicial.

Na temperatura de 180° a 300°C, ocorre a decomposição da hemicelulose, que possui uma menor estabilidade térmica. Por ter uma estrutura química heterogênea é o primeiro componente a se degradar, devido à menor organização molecular, com a liberação de ácidos orgânicos, CO e água (Gao et al., 2016). E entre 300°C a 400°C, a celulose inicia uma liberação intensa de materiais voláteis, com produção de gases combustíveis (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>). A degradação da celulose ocorre de forma abrupta, com perda de cerca de 58,2% da matéria, resultando numa grande quantidade de energia liberada, pois há a quebra das ligações β-1,4-glicosídicas que compõem a estrutura cristalina da celulose (Soares et al., 2001).

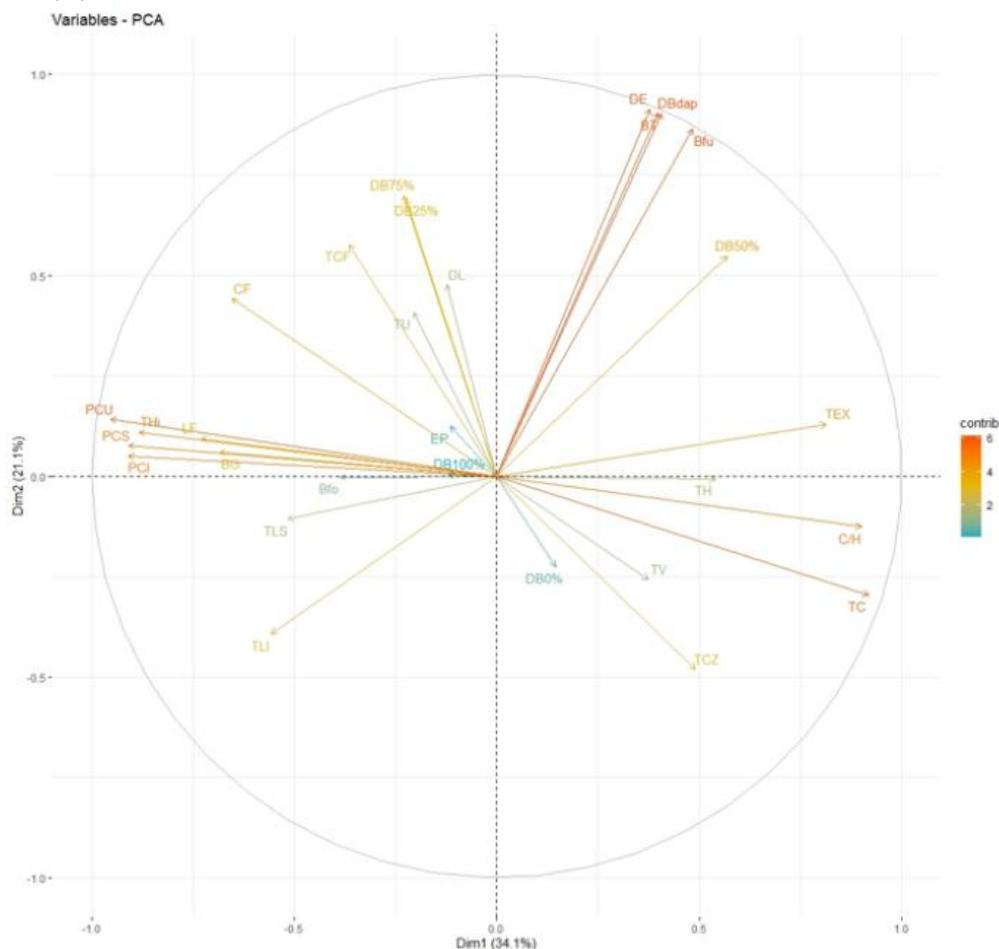
A última etapa ocorre na temperatura de 400°C a 600°C, com a degradação da lignina, devido à estrutura complexa e altamente ramificada. Esta molécula possui unidades fenólicas resistentes ao calor. Com sua degradação, há liberação de hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos voláteis de cadeia longa. Acima da temperatura de 500°C, a maior parte dos compostos orgânicos já foi degradado, restando apenas o carbono fixo e as cinzas minerais (Kim et al., 2014).

## 5.6 ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS E RANQUEMANTO DOS CLONES

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para identificar padrões e relações entre as variáveis físicas, químicas e energéticas da madeira dos clones analisados. Essa abordagem estatística permite reduzir a complexidade dos dados e visualizar a contribuição de cada variável na diferenciação dos materiais genéticos avaliados.

Conforme a figura 13, é possível observar que os dois primeiros componentes principais (Dim1 e Dim2) explicaram conjuntamente 55,2% da variabilidade total dos dados, sendo Dim1 responsável por 34,1% e Dim2 por 21,1%. Esse resultado indica que essas duas dimensões capturam mais da metade das variações das características analisadas.

**Figura 13. Contribuição das variáveis nas componentes principais da madeira do clone C1 (A) e C2 (B) cultivados na Zona da Mata de Pernambuco**



Nota: Bfo – Biomassa folha; Bg – Biomassa galho; Bfu - Biomassa fuste; BT – Biomassa total; LF – Largura das fibras; EP – Espessura da parede; CF – comprimento das fibras; DL – Diâmetro do lume; DB0% - Densidade básica a 0%; DB 25% - Densidade básica a 25%; DBdap – Densidade básica DAP; DB 50% - Densidade básica a 50%; DB 75% - Densidade básica a 75%; DB100% - densidade básica a 100%; TU – Teor de umidade; TV – Teor de voláteis; TCZ – Teor de cinzas; TCF – Teor de carbono fixo; TEX – Teor de extrativo; TLI – Teor de lignina insolúvel; TLS – Teor de lignina solúvel; TH – Teor de Hidrogênio; TC – Teor de Carbono; THi – Teor de hidrogênio; C/H –Relação Carbono/ Hidrogênio; PCS – Poder calorífico superior; PCI – Poder calorífico inferior; PCU – Poder calorífico útil; DE – Densidade energética.

As variáveis relacionadas ao poder calorífico (PCS, PCI e PCU) estão fortemente correlacionadas e posicionadas na mesma direção no plano fatorial, indicando uma relação linear positiva entre elas. O que sugere que materiais que apresentam um maior PCS também tendem a apresentar maiores valores de PCI e PCU, reforçando a consistência da madeira desses clones para a produção de energia térmica. Além disso, essas variáveis estão próximas do TC (teor de carbono), THi (teor de hidrogênio) e TL (teor de lignina), indicando que um maior teor de lignina está associado a um maior poder calorífico.

As variáveis relacionadas à densidade básica da madeira (DB0%, DB25%, DB50%, DB75%) aparecem distribuídas ao longo da Dim1, sugerindo uma forte influência na caracterização dos clones para fins energéticos. A densidade da madeira tem um impacto direto na eficiência da combustão, pois madeiras mais densas apresentam maior tempo de queima e libera energia de forma mais gradual, que é uma característica desejável para processos energéticos contínuos. O PCA revelou que as principais variáveis que impactam a eficiência energética da madeira dos clones analisados estão relacionadas à composição química e ao poder calorífico.

A análise demonstrou ainda que os clones avaliados apresentam características energéticas semelhantes, sugerindo que ambos possuem potencial para fins energéticos, independentemente de pequenas variações em suas propriedades físico-químicas. Além disso, a presença da densidade básica como uma variável influente ressalta a necessidade de avaliar não apenas os parâmetros químicos da madeira, mas também suas propriedades físicas, pois uma maior densidade pode resultar em maior rendimento energético. A madeira de maior densidade concentra uma maior quantidade de biomassa por unidade de volume, o que resulta em maior teor de carbono fixo, e favorece a queima de forma mais lenta, contínua e eficiente.

A avaliação integrada dos clones C1 e C2 permitiu uma análise comparativa detalhada das principais características relacionadas ao potencial de uso energético da madeira. Para isso, foi adotado um sistema de pontuação, em que os clones receberam valores conforme seu desempenho relativo em cada parâmetro analisado, permitindo ranqueá-los com base em um conjunto robusto de indicadores técnicos (Tabela 12).

**Tabela 12. Ranqueamento dos clones C1 e C2 cultivados na Zona da Mata de Pernambuco, de acordo com os parâmetros avaliados**

		<b>Parâmetro</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
Biomassa		Biomassa das folhas (t.ha <sup>-1</sup> )	0	0
		Biomassa dos galhos (t.ha <sup>-1</sup> )	2	1
		Biomassa do fuste (t.ha <sup>-1</sup> )	0	0
		Biomassa acima do solo (t.ha <sup>-1</sup> )	0	0
		<b>Subtotal</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Propriedades física		Densidade básica ao DAP (g.cm <sup>-3</sup> )	0	0
		Densidade básica na posição de 100% da altura comercial (g.cm <sup>-3</sup> )	0	0
		Densidade básica na posição de 75% da altura comercial (g.cm <sup>-3</sup> )	0	0
		Densidade básica na posição de 50% da altura comercial (g.cm <sup>-3</sup> )	0	0
		Densidade básica na posição de 25% da altura comercial (g.cm <sup>-3</sup> )	0	0
		Densidade básica na posição de 0% da altura comercial (g.cm <sup>-3</sup> )	0	0
		<b>Subtotal</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Propriedades anatômicas		Comprimento da fibra	2	1
		Largura	2	1
		Diâmetro do lume	0	0
		Espessura da parede	0	0
		<b>Subtotal</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
Propriedades químicas		Teor de extrativo (%)	2	1
		Teor de lignina insolúvel (%)	0	0
		Teor de lignina solúvel (%)	0	0
		Teor de holocelulose (%)	0	0
		Teor de voláteis (%)	0	0
		Teor de carbono fixo (%)	0	0
		Teor de umidade (%)	0	0
		Teor de cinzas (%)	0	0
		Teor de carbono (%)	2	1
		Teor de hidrogênio (%)	2	1
		Relação C/H	2	1
		Teor de oxigênio (%)	0	0
		<b>Subtotal</b>	<b>8</b>	<b>4</b>
Propriedades energéticas		Poder calorífico superior (kcal.kg-1)	2	1
		Poder calorífico inferior (kcal.kg-1)	2	1
		Poder calorífico útil (kcal.kg-1)	2	1
		Densidade energética (kcal.m-3)	0	0
		Índice de valor calorífico	0	0
		<b>Subtotal</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
		<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>10</b>

Nota: Valor 0 atribuído quando não se constatou diferença significativa pelo teste F (P<0,05); valor 1 e 2 atribuído quando se constatou a presença de diferença significativa entre os clones, sendo 2 para o maior valor e 1 para o menor valor observado.

Os resultados indicaram que os clones apresentaram semelhança significativa em diversos aspectos, especialmente nas propriedades físicas da madeira (densidade básica em todas as posições do fuste) e nos valores de biomassa (folhas, fuste e parte aérea total), em que ambos os materiais genéticos obtiveram pontuação idêntica. Isso demonstra que, do ponto de vista produtivo e estrutural, os dois clones têm desempenho equivalente, o que é vantajoso para manejo e planejamento florestal, pois oferece uma maior flexibilidade na escolha do material genético sem comprometer a produtividade de madeira por hectare.

Entretanto, os maiores contrastes entre os clones foram observados nas propriedades químicas e energéticas, que foram determinantes para a diferenciação do desempenho final. O clone C1 se destacou principalmente pelo maior teor de extrativos, teor de carbono e maior poder calorífico (PCS, PCI e PCU), indicando maior capacidade de liberação de energia por massa queimada. Nas propriedades anatômicas, também apresentou fibras mais longas e largas, o que pode ter contribuído para sua maior densidade e desempenho térmico. Esses fatores conferem ao C1 maior eficiência energética, especialmente para aplicações que exigem alta liberação de calor, como a produção de carvão vegetal ou uso direto em fornalhas industriais.

Considerando todos os resultados obtidos e a pontuação geral atribuída, o clone C1 obteve maior destaque no ranqueamento final, com 20 pontos contra 10 do clone C2. Essa superioridade reflete não apenas um melhor desempenho isolado, mas uma combinação mais favorável de características anatômicas, químicas e energéticas que, juntas, tornam esse material genético mais eficiente e tecnicamente indicado para uso como biomassa energética.

Portanto, ambos os clones demonstraram viabilidade técnica para cultivo na Zona da Mata de Pernambuco com foco na produção de energia. No entanto, o clone AEC144 apresenta melhor desempenho global, sendo a alternativa mais promissora para aplicações que exigem alto rendimento térmico e eficiência na conversão energética da madeira.

## 6 CONCLUSÃO

A quantificação da biomassa acima do solo evidenciou que ambos os clones apresentam boa produtividade, com distribuição da biomassa entre folhas, galhos e fuste, o que os torna viáveis para fins energéticos.

As análises físicas, químicas e anatômicas revelaram que, embora tenham sido identificadas diferenças significativas entre os clones em algumas variáveis específicas, como teores de extrativos, lignina, carbono, hidrogênio e nas dimensões das fibras, a maioria das características avaliadas apresentou resultados semelhantes entre os dois materiais genéticos.

As análises térmicas (TGA/DTG) mostraram um comportamento semelhante entre os clones, com a degradação térmica ocorrendo em três estágios distintos. A estabilidade térmica, especialmente em função da lignina, confirma a viabilidade dos materiais para uso energético por combustão direta.

A análise de componentes principais (PCA) permitiu identificar as variáveis mais relevantes para o desempenho energético da madeira. Densidade básica, teor de extrativo, teor de carbono e teor de lignina foram determinantes para o poder calorífico, reforçando a importância de uma abordagem integrada na seleção de materiais genéticos para fins energéticos.

Apesar da superioridade do clone C1 em grande parte das variáveis avaliadas, conforme evidenciado no ranqueamento final, ambos os materiais genéticos apresentaram características energéticas adequadas para uso como biomassa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. D. M.; ERTHAL JUNIOR, M.; HORA, H. R. M.; SOUZA, C. L. M.; SANTOS, W. A. Análise multicritério de potencialidades para a produção de energia renovável na região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro. Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha - Publicação Online. **Anais...** Em: XIX Simpósio de Pesquisa Operacional & Logística da Marinha. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Blucher, maio 2019. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/34452>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; LOUZADA, J. L. P. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; OLIVEIRA, J. C. L.; CÂMARA, A. P.; ALVARES, C. A. Differences in wood anatomy and chemistry of a *Eucalyptus urophylla* clone site climate conditions. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 52, n. 5, p. 834–844, 2022.

ALVES, A. M. C. **Quantificação da produção de biomassa e do teor de carbono fixado por clones de eucalipto, no Pólo Gesseiro do Araripe – PE**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM D 1762-84). Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. 1995.

AMES, G. C. W.; BAXTER, H. O. Wood Fuel: An Alternative Energy Source for Agribusiness and Industry. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 13, n. 2, p. 91–97, 1981.

ARNOLD, J. E. M. Wood energy and rural communities. **Natural Resources Forum**, v. 3, n. 3, p. 229–252, 1979.

ARRUDA, E.; DAMASCENO, V. Relações em curto e longo prazo na indústria do Nordeste brasileiro. **Revista Ciências Administrativas**, v. 21, n. 1, p. 184–210, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941: determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: determinação da densidade básica de madeira. Rio de Janeiro, 2003.

BAJPAI, P. Properties of wood. In: BIERMANN, C. J. (ed.). **Biermann's handbook of pulp and paper: volume 1 – Raw material and pulp making**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. p. 215–232.

BANAŚ, J.; UTNIK-BANAŚ, K. Using Timber as a Renewable Resource for Energy Production in Sustainable Forest Management. **Energies**, v. 15, n. 6, p. 2264, 2022.

BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. F. Processo nítrico-acético para maceração de madeira. **Silvicultura**, v. 8, n. 28, p. 732-733, 1983.

BELTRAME, R.; BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; SANTOS, G. A. D. Desempenho silvicultural e seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 791–796, 2012.

BERGLUND, J.; MIKKELSEN, D.; FLANAGAN, B. M.; DHITAL, S.; GAUNITZ, S.; HENRIKSSON, G.; LINDSTRÖM, M. E.; YAKUBOV, G. E.; GIDLEY, M. J.; VILAPLANA, F. Wood hemicelluloses exert distinct biomechanical contributions to cellulose fibrillar networks. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p.1-16, 2020.

BILLARD, A.; BAUER, R.; MOTHE, F.; COLIN, F.; DELEUZE, C.; LONGUETAUD, F. Vertical variations in wood basic density for two softwood species. **European Journal of Forest Research**, v. 140, n. 6, p. 1401–1416, 2021.

BLASIO, C. Thermogravimetric Analysis (TGA). Em: BLASIO, C. (Ed.). Fundamentals of Biofuels Engineering and Technology. **Green Energy and Technology**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 91–102.

BRAND, M. A. Potencial de uso da biomassa florestal da Caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 117–127, 31 mar. 2017.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro, Interciência, 2010. 131p.

**BRASIL**. Decreto nº 9.456, de 24 de maio de 2018. Regulamenta a Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio, instituída pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 25 maio 2018.

**BRASIL**. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica, sobre o uso de fontes alternativas e renováveis, e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 29 abr. 2002.

**BRASIL**. Lei nº 14.876, de 3 de abril de 2024. Dispõe sobre a Política Nacional de Qualidade do Ar. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, 4 abr. 2024. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2023-2026/2024/Lei/L14876.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14876.htm). Acesso em: 20 dez. 2024.

BRAZ, R. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; ROSADO, A. M.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOIOLA, P. L. Caracterização Anatômica, Física e Química da Madeira de Clones de *Eucalyptus* Cultivados em Áreas Sujeitas à Ação de Ventos. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 5, n. 2, p. 127–137, 30 nov. 2014.

CARVALHO, A. C. D.; SANTOS, R. D.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, C. D. S.; COSTA, S. D. L.; CARVALHO, A. D.; ALMEIDA, M. D. Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, 2020.

CARVALHO, N. R. D.; BARROS, J. L. D.; SILVA, D. A. D.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Química Nova**, v. 44, n. 1, p. 35-40, 2021.

CARVALHO, W.; CANILHA, L.; FERRAZ, A.; MILAGRES, A. M. F. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2191–2195, 2009.

CHERUBINI, F.; PETERS, G. P.; BERNTSEN, T.; STRØMMAN, A. H.; HERTWICH, E. CO<sub>2</sub> emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming: Global Warming Potential of C2 From Bioenergy. **GCB Bioenergy**, v. 3, n. 5, p. 413–426, 2011.

CHILLAYIL, J.; SURESH, M.; P. K, V.; KOTTAYIL, S. K. Is imperfect evaluation a deterrent to adoption of energy audit recommendations? **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 71, n. 4, p. 1385–1406, 2022.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - COPANT. Descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira. São Paulo, 1974.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, Editora da Unicamp, 2008. p. 31-52.

COUTO, A. M.; TEODORO, P. E.; TRUGILHO, P. F. Path analysis of the energy density of wood in eucalyptus clones. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 1, p. 27-34 2017.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. D. P.; SÁ, V. A. D. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 27–34, 2013.

CRUZ, P. M.; DANIELI, J. A. C.; SOUZA, M. V. A. Perspectiva transnacional da sustentabilidade e a nova matriz energética global. **Pensar - Revista de Ciências Jurídicas**, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2023.

CUNHA, T. Q. G. D.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETTE JUNIR, C. R. *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105900, jan. 2021.

DELPECH, B.; MILANI, M.; MONTORSI, L.; BOSCARDIN, D.; CHAUHAN, A.; ALMAHMOUD, S.; JOUHARA, H. Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by means of the heat pipe technology: Case of the ceramic industry. **Energy**, v. 158, p. 656–665, set. 2018.

DEMIRBAS, A.; AHMAD, W.; ALAMOUDI, R.; SHEIKH, M. Sustainable charcoal production from biomass. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 38, n. 13, p. 1882–1889, 2016.

DUARTE, G. M. Águas transfronteiriças - Qualidade e questões ambientais/econômicas com interesse ao desenvolvimento Sul Americano. **Revista do Instituto Geológico**, v. 31, n. 1–2, p. 53–65, 2010.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 65–76, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2024: ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 04 mar. 2025.

ENERGY INSTITUTE. Statistical Review of World Energy: 73rd edition. Londres: Energy Institute, 2024. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. Acesso em: 04 mar. 2025.

FAHRUSSIAM, F.; LESTARI, D.; NINGSIH, R. V. Calorific Value of Several Types of Wood Through Proximate Analysis and Chemical Components Approach. **Journal Biologi Tropis**, v. 23, n. 1, p. 355–359, 22 jan. 2023.

FIALA, M.; NONINI, L. Biomass and biofuels. **EPJ Web of Conferences**, v. 189, p. 00006, 2018.

FRASER, A. I. The Use of Wood for Industrial and Domestic Energy in Rural Areas of Britain and the Transfer of Wood-Energy Technology to Developing Countries. Em: **Energy for Rural and Island Communities**. [s.l.] Elsevier, 1982. p. 259–273.

FREI, M. Lignin: Characterization of a Multifaceted Crop Component. **The Scientific World Journal**, v. 2013, n. 1, p. 436517, 2013.

GAO, Y.; WANG, H.; GUO, J.; PENG, P.; ZHAI, M.; SHE, D. Hydrothermal degradation of hemicelluloses from triploid poplar in hot compressed water at 180–340 °C. **Polymer Degradation and Stability**, v. 126, p. 179–187, 2016.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Emissões de gases do efeito estufa da queima de pellets de madeira. **Floresta**, v. 47, n. 3, p. 297-306, 2017.

GHOSH, S. Biomass-Based Distributed Energy Systems: Opportunities and Challenges. Em: GAUTAM, A. et al. (Eds.). Sustainable Energy and Transportation. **Energy, Environment, and Sustainability**. Singapore: Springer Singapore, p. 235–252, 2018.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley & Sons, p. 241-266, 1971.

GONÇALEZ, J. C.; SANTOS, G. L., SILVA JUNIOR, F. G.; MARTINS, I. S.; COSTA, J. A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**. v. 42, p. 81–89, 2014.

GRANJA, C. V. A.; CAVALCANTE, E. P.; CAFEÉ FILHO, H. P. SIQUEIRO, M. S.; NASCIMENTO, W. Degradação Ambiental: Exploração de Gipsita no Polo Gesseiro do Araripe. Id on Line **Revista de Psicologia**, v. 11, n. 36, p. 239-267, 2017.

GUEDES, T. O.; LIMA, L. C.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. D.; SANTOS, L. D. T. Effect of planting density on wood anatomy in *Eucalyptus* and *Acacia* from Brazil. **Madera y Bosques**, v. 24, n. 2, e2421420, 2018.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J. F.; STRAUSS, J.; ERTAN, H.; SIDDIQUI, K. S. Lignocellulosic biomass: Biosynthesis, degradation, and industrial utilization. **Engineering in Life Sciences**, v. 16, n. 1, p. 1–16, 2016.

GÜNEY, T. Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 26, n. 5, p. 389–397, 2019.

HEPWORTH, D. G.; Vincent, J. F.; Stringer, G.; Jeronimidis, G. Variations in the morphology of wood structure can explain why hardwood species of similar density have very different resistances to impact and compressive loading. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 360, n. 1791, p. 255–272, 15 fev. 2002.

HUGGETT, C. Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. **Fire and Materials**, v. 4, n. 2, p. 61–65, 1980.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2024. São Paulo: IBÁ, 2024. Disponível em: <https://iba.org>. Acesso em: 05 mar. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS 2024*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 04 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS 2024*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 04 mar. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 04 mar. 2025.

JĘDRZEJCZAK, P.; COLLINS, M. N.; JESIONOWSKI, T.; KLAPISZEWSKI, Ł. The role of lignin and lignin-based materials in sustainable construction – A comprehensive review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 187, p. 624–650, set. 2021.

JĘDRZEJCZAK, P.; COLLINS, M. N.; JESIONOWSKI, T.; KLAPISZEWSKI, Ł. The role of lignin and lignin-based materials in sustainable construction – A comprehensive review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 187, p. 624–650, 2021.

JIN, H.; YUAN, W.-J.; LI, W.; YANG, J.; ZHOU, Z.; ZHAO, L.; LI, Y. E.; QI, F. Química da combustão de hidrocarbonetos aromáticos. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 96, 101076, 2023.

KALAK, T. Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future. **Energies**, v. 16, n. 4, p. 1783, 2023.

KIAEI, M. Fiber dimensions, physical and mechanical properties of five important hardwood plants. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 11, p. 1460–1463, 2011.

KIM, J.-Y.; HWANG HYEWON, H. H.; PARK JEESU, P. J.; OH SHINYOUNG, O. S.; CHOI JOONWEON, C. J. Predicting structural change of lignin macromolecules before and after heat treatment using the pyrolysis-GC/MS technique. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 110, p. 305–312, 2014.

KISS, I.; ALEXA, V.; SÁROSI, J. Biomass from Wood Processing Industries as an Economically Viable and Environmentally Friendly Solution. **Analecta Technica Szegedinensia**, v. 10, n. 2, p. 1–6, 2016.

KIVIMAA, P.; SIVONEN, M. H. Interplay between low-carbon energy transitions and national security: An analysis of policy integration and coherence in Estonia, Finland and Scotland. **Energy Research & Social Science**, v. 75, p. 102024, 2021.

KNAPIC, S.; PIRRALHO, M.; LOUZADA, J.-L.; PEREIRA, H. Avaliação inicial das características de densidade de 19 espécies de eucalipto usando microdensitometria de raios X na perspectiva da produção potencial de biomassa. **Ciência e Tecnologia da Madeira**, v. 48, n. 1, p. 37–49, 2014.

LANA, A. Q.; SALLES, T. T.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARDOSO, M. T.; TEIXEIRA, R. U. Comparison of procedures for immediate chemical analysis of charcoal. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 371–376, 2016.

LIMA, M. D. R.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; FIGUEIREDO, I. C. R.; PROTÁSIO, TP.; TRUGILHO, P.F. Variabilidade das densidades básicas e energéticas e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 48, n. 128, e3302, 2020.

LINS, T. R. S.; BRAZ, R. L.; SILVA, T. C.; REIS, C. A.; SILVA, D. A.; SILVA, J. A. A. Energetic potential of *Eucalyptus* sp. wood cultivated in the Plaster's Pole of Araripe, PE, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** v. 16, n. 1, p. 1–8, 25 mar. 2021.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F. TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização

qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.

LUNGULEASA, A.; SPIRCHEZ, C.; ZELENIUC, O. Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 22, n. 3, p. 269-280, 2020.

MAGALHÃES, L. G. S. LIMA, A. P. L.; LIMA, S. F.; SORATTO, D. N.; MARTINS, S. M.; SANTOS, I. F. F. Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 19435–19445, 2020.

MAIA, R. G. T.; BOZELLI, H. The importance of GHG emissions from land use change for biofuels in Brazil: An assessment for current and 2030 scenarios. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, p. 106131, 2022.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Registro Nacional de Cultivares – RNC. Disponível em: [https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php). Acesso em: 04 jun. 2025.

MAR'YANDYSHEV, P. A.; CHERNOV, A. A.; LYUBOV, V. K. Analysis of thermogravimetric data for different forms of wood. **Solid Fuel Chemistry**, v. 49, n. 2, p. 117–122, 2015.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. D. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário: o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145–159, 2004.

MD SALLEH, M.; NOOR, R. M.; YAHYA, A.; ABD-AZIZ, S.; HUSSIN, H. Potential applications of lignin and its derivatives from lignocellulosic biomass – A review. **Journal Teknologi**, v. 85, n. 3, p. 43–59, 2023.

MEDEIROS, M. S. D.; HURTADO-GUERRERO, J. C.; SILVA, L. G. A. A saúde no contexto do polo gesso de Araripina - Pernambuco, Brasil. **Saúde e Sociedade**, v. 19, n. 2, p. 358–370, 2010.

MELO, L. E. D. L. SILVA, J. D.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T., TRUGILHO, P. F.,; NASCIMENTO, D. F. R. Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus* spp. and *Corymbia citriodora*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, 2016.

MENCZEL, J. D. Thermogravimetric analysis of fibers. Em: *Thermal Analysis of Textiles and Fibers*. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 71–79.

MESHITSUKA, G.; ISOGAI, A. Chemical Structures of Cellulose, Hemicelluloses, and Lignin. Em: HON, D. N.-S. (Ed.). **Chemical Modification of Lignocellulosic Materials**. 1. ed. [s.l.] Routledge, 2017. p. 11–33.

MONTOYA, M. A.; ALLEGRETTI, G.; BERTUSSI, L. A. S.; TALAMINI, E. Renewable and Non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: Brazilian

contributions to climate change via international trade. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127700, 2021.

MOULIN, J. C.; NOBRE, J. R. C.; CASTRO, J. P.; TRUGILHO, P. F.; ARANTES, M. D. Efeito de extrativos e temperatura de carbonização nas características energéticas de resíduos de madeira na floresta amazônica. **Cerne**, v. 23, n.2, p. 209–218, 2017.

MUH, E.; TABEL, F.; AMARA, S. Conversão de biomassa em combustíveis e produtos químicos de valor agregado: uma revisão abrangente dos processos termoquímicos, v. 4, n. 1, p. 3–25, 2021.

MUHAMAD, I. I.; PA'E, N.; ZAHAN, K. A. Sustainable and Economical Production of Biocellulose from Agricultural Wastes in Reducing Global Warming and Preservation of the Forestry. Em: LEAL FILHO, W.; POCIOVALISTEANU, D.-M.; AL-AMIN, A. Q. (Eds.). Sustainable Economic Development. World Sustainability Series. Cham: Springer International Publishing, p. 141–154, 2017.

NAM, J.; YUN, B. Y.; CHOI, J. Y.; KIM, S. Potential of wood as thermal energy storage materials: Different characteristics depending on the hierarchical structure and components. **International Journal of Energy Research**, v. 46, n. 11, p. 14926–14945, 2022.

OGEMDI, I. Combustion of Wood by Pyrolysis: A Review. *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 3, n. 1, p. 1, 2019.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R., CARVALHO, A. M. M. L., TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557–566, 2013.

OLIVEIRA, J. F. G. D.; TRINDADE, T. C. G. World Energy Matrix. Em: OLIVEIRA, J. F. G. D.; TRINDADE, T. C. G. (Eds.). Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Sources: The Case of o Brazil. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 1–17.

OLIVEIRA, J. F. G. D.; TRINDADE, T. C. G. World Energy Matrix. In: OLIVEIRA, J. F. G. D.; TRINDADE, T. C. G. (Eds.). **Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Sources: The Case of Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 1–17.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). [Imagem]. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 11 nov. 2024.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, n. 84, p. 487-494, 2005.

PEREIRA, B. L. C., CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties, **BioResource**, v. 8, n.3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567–576, jun. 2013a.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L., OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592., 2013b.

PEREIRA, G.; BELL, M. L.; HONDA, Y.; LEE, J. T.; MORAWSKA, L.; JALALUDIN, B. Energy transitions, air quality and health. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 2, p. 020202, 2021.

POLETTI, M. Assessment of the thermal behavior of lignins from softwood and hardwood species. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 19, n. 1, p. 63-74, 2017.

POSSELL, M.; BELL, T. L. The influence of fuel moisture content on the combustion of *Eucalyptus* foliage. **International Journal of Wildland Fire**, v. 22, n. 3, p. 343, 2013.

PRICE, D. Energy and human evolution. **Population and Environment**, v. 16, n. 4, p. 301–319, 1995.

PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior *Eucalyptus* Firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 3, p. 626–641, 2019.

PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior *Eucalyptus* Firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 3, p. 626–641, set. 2019.

PROTÁSIO, P. T.; COUTO, A. M.; DOS REIS, A. A., TRUGILHO, P. F., & GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

PUROHIT, A. N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, v. 4, n. 2–3, p. 177–182, 1987.

QASEEM, M. F.; SHAHEEN, H.; WU, A.-M. Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110996, 2021.

RANI, A.; SINGH, J.; SINGH, T. An experimental characterization of physical properties of timber woods. **Materials Science and Nanotechnology**, v. 1, n. 2, p. 41-45, 2017.

RAO, J.; LV, Z.; CHEN, G.; PENG, F. Hemicellulose: Structure, chemical modification, and application. **Progress in Polymer Science**, v. 140, p. 101675, 2023.

REIS, G. D. M. F.; MARCHESAN, R.; SARAIVA, K. F.; DA SILVA, R. C.; COLARES, C. J. G.; DE MORAES, C. B.; MORAES, T. P. E. Qualidade energética da madeira e do carvão vegetal do fuste e galho de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 8, p. 8735-8752, 2023.

RIDELNSKY, M. D. C. A sustentabilidade ambiental de projetos de sucesso com diferentes alternativas de energia. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e194101118380, 2021.

RODRIGUEZ, M. D. R.; AGUIRRE, M. G.; BABOT, P. Firewood, architecture for fire and society. Agro-pastoralist atmospheres in the Argentine Puna (South Central Andes, ca. 1500 B.P.). **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 46, p. 103672, 2022.

ROFFAEL, E. Significance of wood extractives for wood bonding. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 4, p. 1589–1596, 2016.

ROMANELLI, T. L. **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto**. Doutorado em Recursos Florestais—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 23 fev. 2007.

ROMANELLI, T. L.; MILAN, M.; TIEPPO, R. C. Energy-Based Evaluations on *Eucalyptus* Biomass Production. **International Journal of Forestry Research**, v. 1, p. 340865, 2012.

RONGPIPI, S.; YE, D.; GOMEZ, E. D.; GOMEZ, E. W. Progress and Opportunities in the Characterization of Cellulose – An Important Regulator of Cell Wall Growth and Mechanics. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1894, 2019.

RUPAR, K.; SANATI, M. The release of organic compounds during biomass drying depends upon the feedstock and/or altering drying heating medium. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, n. 6, p. 615–622, dez. 2003.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, v. 32, n. 4, p. 697–706, 2008.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. edição revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, I. D. Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. 2008. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SCHERNIKAU, L.; SMITH, W. H. Climate impacts of fossil fuels in today's electricity systems. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 122, n. 3, p. 1–13, 2022.

SCHOBERT, H. Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2013.

SCHWERZ, F.; NETO, D.; CARON, B.; TIBOLLA, L.; SGARBOSSA, J.; ELOY, E.; ELLI, E.; CARVALHO, L. Estoques de carbono, partição e composição da madeira em sistema florestal de curta rotação sob espaçamento de plantio reduzido. **Annals of Forest Science**, v. 77, p. 1-18, 2020.

SEPMAN, A.; ÖGREN, Y.; WENNEBRO, J.; WIINIKKA, H. Simultaneous diagnostics of fuel moisture content and equivalence ratio during combustion of liquid and solid fuels. **Applied Energy**, v. 324, p. 119731, 2022.

SHEN, D. K.; GU, S.; BRIDGWATER, A. V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 1, p. 39–45, ago. 2010.

SHEN, J.; ZHU, S.; LIU, X.; ZHANG, H.; TAN, J. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 5, p. 983–987, maio 2010.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 5, p. 499–507, 2005.

SHINGALA, J.; SHAH, V.; DUDHAT, K.; SHAH, M. Evolution of nanomaterials in petroleum industries: application and the challenges. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 10, n. 8, p. 3993–4006, 2020.

SILVA, A. P. T.; MEDEIROS, P. M.; FERREIRA JÚNIOR, W. S.; SILVA, R. R. V. Does Forest Scarcity Affect the Collection and Use of Firewood by Rural Communities? A Case Study in the Atlantic Forest of Northeastern Brazil. **Economic Botany**, v. 72, n. 1, p. 71–80, 2018.

SILVA, M. M. S.; SILVA, M. M. S.; FEITOSA, I. S.; CRUZ, R. S.; DE SÁ, V. A.; MEDEIROS, P. M.; SILVA, R. R. V. Use of firewood for artisanal ceramic production in a context of forest scarcity in Northeastern Brazil. **Ethnobiology and Conservation**, v. 12, 21 nov. 2023.

SILVEIRA, J. H. D.; DORNELES, R. H. T.; SEBEN, V. H. A.; GASPARIN, F. P.; RIES, L. A. D. S. Characterization of residual biomass from the harvest of *Eucalyptus saligna* for thermal conversion processes. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 24, p. e13, 2020.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A.; MAYER, S. L. S.; SOUZA, H. P.; MUNIZ, G. I. B. Production of biomass and energy stock for five *Eucalyptus* species. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 9, n. 1, p. 30–36, 1 mar. 2018.

SIMIONI, F. J.; MOREIRA, J. M. M. Á. P.; FACHINELLO, A. L.; BUSCHINELLI, C. C. D. A.; MATSUURA, M. I. D. S. F. Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 731–742, 2017.

SINGH, N. R.; KAMINI, N. K.; KUMAR, D. Short-Rotation Forestry: Implications for Carbon Sequestration in Mitigating Climate Change. Em: JHARIYA, M. K. et al. (Eds.). **Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management**. Singapore: Springer Singapore, p. 353–391, 2019.

SIWAL, S. S.; SHEORAN, K.; SAINI, A. K.; VO, D. V. N.; WANG, Q.; THAKUR, V. K. Advanced thermochemical conversion technologies used for energy generation: Advancement and prospects. **Fuel**, v. 321, p. 124107, ago. 2022.

SOARES, S.; RICARDO, N. M.; JONES, S.; HEATLEY, F. High temperature thermal degradation of cellulose in air studied using FTIR and <sup>1</sup>H and <sup>13</sup>C solid-state NMR. **European Polymer Journal**, v. 37, n. 4, p. 737–745, 2001.

SOARES, T. S.; GOUVEIA JUNIOR, W. V.; MATIAS, R. A. M.; CRUZ, E. S. Efeito da densidade de estocagem na produtividade energética de um povoamento de eucalipto manejado em sistema de rotação curta. **Nativa**, v. 6, n. 2, p. 165–169, 2018.

SOUZA, P. D. D.; FARIAS, J. A. D., ZIEMBOWICZ, M. M.; BERNARDY, D. Produção florestal familiar como fonte de energia limpa: garantia de suficiência e sustentabilidade energética para a cura do tabaco. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. e71524, 2023.

STANDAR, A.; KOZERA, A.; SATOŁA, Ł. The Importance of Local Investments Co-Financed by the European Union in the Field of Renewable Energy Sources in Rural Areas of Poland. **Energies**, v. 14, n. 2, p. 450, 2021.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI TEST METHODS. T 204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, TAPPIPRESS, 1997.

TAPPI. Technical Association of Pulp and Paper Industry. TAPPI T 222 om-15: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, 2015.

THYBRING, E. E.; FREDRIKSSON, M. Wood and Moisture. Em: NIEMZ, P.; TEISCHINGER, A.; SANDBERG, D. (Eds.). Springer Handbook of Wood Science and Technology. Springer Handbooks. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 355–397.

TOMASONI, M. A.; PINTO, J. E. S.; SILVA, H. P. A questão dos recursos hídricos e as perspectivas para o Brasil. **GeoTextos**, v. 5, n. 2, 2010.

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T.; NAPOLI, A. Elemental Analysis of Clones of *Eucalyptus* Wood. **Biomassa & Energia**, v. 5, n. 1, p. 53–58, 2012.

TRUGILHO, P.F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T.; NAPOLI, A. Análise elementar da madeira de clones de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, v. 5, p. 53-58, 2012.

TUCHO, B. G. ETEFA, H. F.; KUMAR, V.; RABA, G. A.; EFA, M. T.; DEJENE, F. B. Effect of wood moisture content on the performance of wood burning cook stoves. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 16, n. 1, p. 1–10, 31 dez. 2023.

VALE, A. T. D.; RESENDE, R.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. D. Estimativa do consumo residencial de lenha em uma pequena comunidade rural do município de São João D’Aliança, GO. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 159–165, 30 jun. 2003.

VARFOLOMEEV, M. A. RACHEV, A. N.; MAKAROV, A. A.; ZABELKIN, S. A.; EMEL’YANENKO, V. N.; MUSIN, T. R.; NURGALIEV, D. K. Thermal Analysis and Calorimetric Study of the Combustion of Hydrolytic Wood Lignin and Products of Its Pyrolysis. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, v. 51, n. 1, p. 140–145, mar. 2015.

VIDAL-MATUTANO, P.; BLASCO, R.; SAÑUDO, P.; FERNÁNDEZ PERIS, J. The Anthropogenic Use of Firewood During the European Middle Pleistocene: Charcoal Evidence from Levels XIII and XI of Bolomor Cave, Eastern Iberia (230–160 ka). **Environmental Archaeology**, v. 24, n. 3, p. 269–284, 2019.

VIEIRA, T. A. S.; TRUGILHO, P. F.; CARABINEIRO, S. A.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; BRANCO-VIEIRA, M. Impact of Chemical Composition on *Eucalyptus* Wood Clones for Sustainable Energy Production. **Forests**, v. 14, n. 11, p. 2240, 2023.

WANG, G.; SILVA, R. B.; AZEVEDO, J. L. T.; MARTINS-DIAS, S.; COSTA, M. Evaluation of the combustion behaviour and ash characteristics of biomass waste derived fuels, pine and coal in a drop tube furnace. **Fuel**, v. 117, p. 809–824, jan. 2014.

WANG, H.; GE, Y.; TAN, J.; HAO, L.; PENG, Z.; WANG, X.; YANG, D. The effects of ash inside a platinum-based catalyst diesel particulate filter on particle emissions, gaseous emissions, and unregulated emissions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 33, p. 33736–33744, 2018.

WASSENBERG, M.; CHIU, H. S.; GUO, W.; SPIECKER, H. Analysis of wood density profiles of tree stems: incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations. **Trees**, v. 29, n. 2, p. 551–561, abr. 2015.

WERNER, K.; POMMER, L.; BROSTRÖM, M. Thermal decomposition of hemicelluloses. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 110, p. 130–137, 2014.

WIDERA, K.; GRABOWSKI, J.; SMOLIŃSKI, A. The Application of Statistical Methods in the Construction of a Model for Identifying the Combustion of Waste in Heating Boilers Based on the Elemental Composition of Ashes. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11178, 2022.

XIAO, X.; CHEN, Z.; CHEN, B. H/C atomic ratio as a smart linkage between pyrolytic temperatures, aromatic clusters and sorption properties of biochars derived from diverse precursory materials. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 22644, 2016.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.

YANG, J.; WANG, X.; SHEN, B.; HU, Z.; XU, L.; YANG, S. Lignin from energy plant (*Arundo donax*): kinetics, mechanism and evaluation of the pyrolysis pathway. **Renewable Energy**, v. 161, p. 963–971, 2020.

YANG, Y.; FU, T.; SONG, F.; SONG, X.; WANG, X. L.; WANG, Y. Z. Wood-burning processes in variable oxygen atmospheres: Thermolysis, fire, and smoke release behavior. **Polymer Degradation and Stability**, v. 205, p. 110158, nov. 2022.

YOUNG, R. A. Historical developments in wood chemistry. **Turkish Journal of Forestry**, v. 9, n. 1, p. 1–15, 2008.

ZHU, B.; HUANG, X. F.; XIA, S. Y.; LIN, L. L.; CHENG, Y.; HE, L. Y. Biomass-burning emissions could significantly enhance the atmospheric oxidizing capacity in continental air pollution. **Environmental Pollution**, v. 285, p. 117523, 2021.

## APÊNDICE

Arquivo analisado:

C:\Users\elain\Downloads\Dados estatística Teses.dbf

Variável analisada: Biomassa da folha

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.2781	1	0.190008	0.190008	1.479
REPETI__O 0.5592	5	0.558275	0.111655	0.869
erro	5	0.642142	0.128428	
Total corrigido	11	1.390425		
CV (%) =	7.31			
Média geral:	4.9275000	Número de observações:	12	

Variável analisada: Biomassa do galho

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0026	1	16.850700	16.850700	30.588
REPETI__O 0.0577	5	12.904167	2.580833	4.685
erro	5	2.754500	0.550900	
Total corrigido	11	32.509367		
CV (%) =	10.80			
Média geral:	6.9216667	Número de observações:	12	

Variável analisada: Biomassa do fuste

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.4202	1	106.505208	106.505208	0.770
REPETI__O 0.3077	5	1110.645942	222.129188	1.607
erro	5	691.187742	138.237548	
Total corrigido	11	1908.338892		
CV (%) =	9.40			
Média geral:	140.1291667	Número de observações:	12	

Variável analisada: Biomassa aérea total

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.4464	1	59.808675	59.808675	0.682
REPETI__O 0.5088	5	429.273342	85.854668	0.979
erro	5	438.302675	87.660535	
Total corrigido	11	927.384692		
CV (%) =	6.33			
Média geral:	151.9791667	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Comprimento da fibra

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0634	1	7048.507408	7048.507408	5.652
REPETI__O 0.9532	5	1193.636675	238.727335	0.191
erro	5	6235.865942	1247.173188	
-----				
-- Total corrigido	11	14478.010025		
-----				
-- CV (%) =	32.02			
Média geral:	823.2025000	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Largura da fibra

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0349	1	6.795075	6.795075	8.244
REPETI__O 0.6052	5	3.205775	0.641155	0.778
erro	5	4.121375	0.824275	
-----				
Total corrigido	11	14.122225		
-----				
CV (%) =	8.47			
Média geral:	16.2625000	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Diâmetro do lume

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.5009	1	1.992675	1.992675	0.526
REPETI__O 0.9756	5	2.622275	0.524455	0.138
erro	5	18.950075	3.790015	
Total corrigido	11	23.565025		
CV (%) =	18.86			
Média geral:	10.3225000	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Espessura da parede

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.7168	1	0.001200	0.001200	0.147
REPETI__O 0.1527	5	0.108567	0.021713	2.667
erro	5	0.040700	0.008140	
Total corrigido	11	0.150467		
CV (%) =	15.12			
Média geral:	2.9866667	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de extrativos

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.1262	1	7.712033	7.712033	3.361
REPETI__O 0.4424	5	13.146867	2.629373	1.146
erro	5	11.471667	2.294333	
Total corrigido	11	32.330567		
CV (%) =	28.97			
Média geral:	5.6283333	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de lignina insolúvel

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.2839	1	8.101633	8.101633	1.440
REPETI__O 0.6792	5	18.132800	3.626560	0.645
erro	5	28.129967	5.625993	
Total corrigido	11	54.364400		
CV (%) =	9.85			
Média geral:	23.6400000	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de Lignina solúvel

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0970	1	0.246533	0.246533	4.156
REPETI__O 0.1228	5	0.906567	0.181313	3.057
erro	5	0.296567	0.059313	
Total corrigido	11	1.449667		
CV (%) =	8.98			
Média geral:	2.6833333	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de hidrogênio

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.1386	1	14.564033	14.564033	3.101
REPETI__O 0.2850	5	40.178767	8.035753	1.711
erro	5	23.485867	4.697173	
Total corrigido	11	78.228667		
CV (%) =	3.21			
Média geral:	67.5066667	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de umidade

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.2593	1	1.840833	1.840833	1.618
REPETI__O 0.1346	5	16.425367	3.285073	2.888
erro	5	5.687367	1.137473	
-----				
Total corrigido	11	23.953567		
-----				
CV (%) =	10.39			
Média geral:	10.2616667	Número de observações:	12	
-----				
--				

-----  
 Variável analisada: Teor de voláteis

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.3304	1	0.396033	0.396033	1.161
REPETI__O 0.4351	5	1.988767	0.397753	1.166
erro	5	1.705367	0.341073	
-----				
Total corrigido	11	4.090167		
-----				
CV (%) =	7.72			
Média geral:	81.2883333	Número de observações:	12	
-----				

-----  
 Variável analisada: Teor de cinzas

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.1100	1	0.021675	0.021675	3.766
REPETI__O 0.4598	5	0.031642	0.006328	1.100
erro	5	0.028775	0.005755	
Total corrigido	11	0.082092		
CV (%) =	13.10			
Média geral:	0.5791667	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de Carbono fixo

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0566	1	4.600408	4.600408	6.094
REPETI__O 0.1451	5	10.400542	2.080108	2.755
erro	5	3.774742	0.754948	
Total corrigido	11	18.775692		
CV (%) =	4.88			
Média geral:	17.7958333	Número de observações:	12	

Variável analisada: THI

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0001	1	0.529200	0.529200	108.889
REPETI__O 0.0432	5	0.132300	0.026460	5.444
erro	5	0.024300	0.004860	
Total corrigido	11	0.685800		
CV (%) =	11.15			
Média geral:	6.0600000	Número de observações:	12	

Variável analisada: Relação carbono/hidrogênio

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0002	1	1.062075	1.062075	97.126
REPETI__O 0.0945	5	0.195075	0.039015	3.568
erro	5	0.054675	0.010935	
Total corrigido	11	1.311825		
CV (%) =	2.40			
Média geral:	7.4475000	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Teor de Oxigênio

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.2578	1	0.192533	0.192533	1.630
REPETI__O 0.5028	5	0.586767	0.117353	0.993
erro	5	0.590667	0.118133	
-----				
--				
Total corrigido	11	1.369967		
-----				
CV (%) =	5.78			
Média geral:	44.1616667	Número de observações:	12	

-----  
 Variável analisada: Poder calorífico superior

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
CLONE 0.0003	1	1889.528033	1889.528033	74.741
REPETI__O 0.4894	5	129.613067	25.922613	1.025
erro	5	126.405067	25.281013	
-----				
--				
Total corrigido	11	2145.546167		
-----				
--				
CV (%) =	41.04			
Média geral:	4560.5683333	Número de observações:	12	

-----

Variável analisada: Poder Calorífico inferior

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc
Pr>Fc				
CLONE	1	1879.502700	1879.502700	184.607
0.0000				
REPETI__O	5	377.835000	75.567000	7.422
0.0231				
erro	5	50.905400	10.181080	
Total corrigido	11	2308.243100		
CV (%) =	31.07			
Média geral:	4237.0750000	Número de observações:	12	

-----

-----

Variável analisada: Poder calorífico util

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc
Pr>Fc				
CLONE	1	10620.750000	10620.750000	106207.500
0.0000				
REPETI__O	5	475.670400	95.134080	951.341
0.0000				
erro	5	0.500000	0.100000	
Total corrigido	11	11096.920400		
CV (%) =	17,74			
Média geral:	3777.6400000	Número de observações:	12	

-----

-----  
 --  
 Variável analisada: Densidade energética

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

```

-----
--
FV          GL          SQ          QM          Fc
Pr>Fc
-----
--
CLONE          1   1.741659900E+0010   1.74165990E+0010   0.433
0.5397
REPETI__O     5   3.184804437E+0011   6.36960887E+0010   1.583
0.3132
erro          5   2.011692857E+0011   4.02338571E+0010
-----
--
Total corrigido   11  5.370663284E+0011
-----
--
CV (%) =          9,17
Média geral:    2392758.8508333   Número de observações:   12
-----

```

-----  
 --  
 Variável analisada: Índice de Valor Combustível

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

```

-----
--
FV          GL          SQ          QM          Fc
Pr>Fc
-----
--
CLONE          1   1201516.353075   1201516.353075   4.180
0.0963
REPETI__O     5   3303640.664075   660728.132815   2.298
0.1911
erro          5   1437334.713475   287466.942695
-----
--
Total corrigido   11  5942491.730625
-----
--
CV (%) =          21,78
Média geral:    4223.7025000   Número de observações:   12
-----

```

-----  
 Variável analisada: Estoque de carbono

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

----- -- FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
----- -- CLONE 0.7015	1	0.000075	0.000075	0.165
REPETI__O 0.3195	5	0.003542	0.000708	1.557
erro	5	0.002275	0.000455	
----- -- Total corrigido	11	0.005892		
----- -- CV (%) =	9.04			
Média geral:	0.2358333	Número de observações:	12	

C:\Users\elain\OneDrive\Área de Trabalho\densidade.dbf  
 -----

Variável analisada: Densidade Básica

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )  
 -----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

----- -- FV Pr>Fc	GL	SQ	QM	Fc
----- -- CLONE 0.7746	1	0.000193	0.000193	0.083
POSIção 0.0000	5	0.182803	0.036561	15.651
CLONE*POSIção 0.2791	5	0.015098	0.003020	1.293
erro	60	0.140163	0.002336	
----- -- Total corrigido	71	0.338257		
----- -- CV (%) =	9.39			

Média geral: 0.5146111 Número de observações: 72

--

Análise do desdobramento de POSIÇÃO dentro de cada nível de:

CLONE

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc
Pr>Fc				
POSIÇÃO /1	5	0.064686	0.012937	5.538
0.0003				
POSIÇÃO /2	5	0.133215	0.026643	11.405
0.0000				
Erro	60	0.140163	0.002336	

Codificação usada para o desdobramento

cod. CLONE

1 = C1

2 = C2

Teste de Tukey para o desdobramento de POSIÇÃO dentro da codificação:

1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

--

Teste Tukey para a FV POSIÇÃO

DMS: 0,0821627882583959 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 6

Erro padrão: 0,0197317426160658

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
100	0.472833	a1
75	0.484500	a1
25	0.496833	a1
50	0.503500	a1
1	0.517833	a1
0	0.602333	a2

Teste de Tukey para o desdobramento de POSIÇÃO dentro da codificação:

2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV POSI\_\_O

DMS: 0,0821627882583959 NMS: 0,05

---

Média harmonica do número de repetições (r): 6  
Erro padrão: 0,0197317426160658

---

--

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
75	0.459333	a1
25	0.459500	a1
100	0.469500	a1 a2
1	0.531500	a1 a2
50	0.551500	a2 a3
0	0.626167	a3

---