



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE GURUPI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS E  
AMBIENTAIS**

**WAGNER FERREIRA COELHO DE OLIVEIRA**

**QUALIDADE ENERGÉTICA DE DIFERENTES GENÓTIPOS DE *Eucalyptus*  
PLANTADOS NA REGIÃO NORTE DO TOCANTINS**

**Gurupi, TO**

**2025**

**Wagner Ferreira Coelho de Oliveira**

**QUALIDADE ENERGÉTICA DE DIFERENTES GENÓTIPOS DE *Eucalyptus*  
PLANTADOS NA REGIÃO NORTE DO TOCANTINS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Bueno de Moraes  
Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Raquel Marchesan

**Gurupi, TO**

**2025**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

F383q FERREIRA COELHO DE OLIVEIRA, WAGNER.  
QUALIDADE ENERGÉTICA DE DIFERENTES GENÓTIPOS DE  
Eucalyptus PLANTADOS NA REGIÃO NORTE DO TOCANTINS. / WAGNER  
FERREIRA COELHO DE OLIVEIRA. – Gurupi, TO, 2025.  
65 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins –  
Câmpus Universitário de Gurupi - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em  
Ciências Florestais e Ambientais, 2025.

Orientador: Cristiano Bueno de Moraes

Coorientadora : Raquel Marchesan

1. Biomassa. 2. Densidade energética. 3. Combustão. 4. Energia Renovável.  
I. Título

CDD 628

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer  
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.  
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184  
do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da  
UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).


## WAGNER FERREIRA COELHO DE OLIVEIRA

### Qualidade energética de diferentes genótipos de *Eucalyptus* plantados na região norte do Tocantins.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e Ambientais em 20/08/2025 foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais e Ambientais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.


Data da aprovação: 20/08/2025

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**CRISTIANO BUENO DE MORAES**  
Data: 20/08/2025 13:58:52 -0300  
Verifique em <https://validar.br.gov.br>


---

Prof. Dr. Cristiano Bueno de Moraes – Orientador – UFT

 Documento assinado digitalmente  
**RAFAEL LEITE BRAZ**  
Data: 20/08/2025 13:47:37 -0300  
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

---

Prof. Dr. Rafael Leite Braz – Examinador - UFRPE

 Documento assinado digitalmente  
**LIVIA CÁSSIA VIANA BOTREL**  
Data: 20/08/2025 13:54:52 -0300  
Verifique em <https://validar.br.gov.br>

---

Profª. Drª. Livia Cássia Viana Botrel – Examinadora - UFVJM

Dedico este trabalho a Deus, fonte de toda inspiração, e aos meus pais, Irailda Coelho Soares e Aelton Camargo de Oliveira, modelos de superação e sucesso, a dedicação e amor da minha mãe me impulsionam a seguir em frente e nunca desistir dos meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre ter me dado forças e sabedoria para chegar até aqui, iluminando o meu caminho nessa jornada

Aos meus pais, Irailda Coelho Soares e Aelton Camargo de Oliveira, por sempre terem sido meu alicerce. Mãe, sua sabedoria e carinho me guiam por toda a vida. Agradeço a minha tia Matildes que sempre foi minha segunda mãe e esteve comigo em todos os momentos.

A minha família, meus irmãos Emilio e Camilla, e minha cunhada Erica e cunhado Higor por todo carinho e incentivo. Minhas irmãs do coração Rania e Dienes e seu esposo Wallace, os nossos laços são mais fortes que o tempo e a distância. E os meus sobrinhos, Arthur Gabriel, Davi, Dhiully, Kaique, Maria Clara, Maria Fernanda e Maria Vitoria.

Ao meu orientador, Professor Dr. Cristiano Bueno de Moraes e sua esposa Mestranda Thatiele Pereira Eufrazio de Moraes, expresse minha mais profunda gratidão pelas orientações, paciência e dedicação que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Muito obrigado pelo apoio e incentivo! Houve momentos em que pensei em desistir, mas a força de vocês fez toda a diferença. Sou muito grato por terem me ajudado a seguir em frente.

Agradeço à minha querida coorientadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Raquel Marchesan, pela infinita paciência e dedicação durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação e apoio foram fundamentais para meu crescimento. Agradeço também à Karolayne, a Vanessa, aos Guilhermes e à Dra. Renata por toda a colaboração e incentivo, tornando esta jornada ainda mais enriquecedora. Agradeço a todos do Laboratório de Tecnologia da Madeira por me acolherem como parte dessa família.

Agradeço à UFT e ao PGCFA, na pessoa do prof. Dr. André Ferreira dos Santos, por todo o apoio e contribuição. Agradeço também ao secretário Jediel Fernandes Oliveira pela dedicação e incentivo constantes, sempre disposto a auxiliar em todas as etapas deste processo.

Agradeço imensamente a todos os meus amigos por estarem ao meu lado. A amizade de vocês foi fundamental para superar todos os desafios. E a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente na elaboração e conclusão desse trabalho.

## RESUMO

A demanda por energias renováveis vem crescendo em todo o mundo. A participação da biomassa como insumo energético via combustão direta de madeira, carvão vegetal, gaseificação, compactação, entre outros processos, têm-se intensificado de forma expressiva. Diante desse contexto, esta pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial energético da madeira de quatro clones híbridos de *Eucalyptus* (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* -2361, 321, 1250, 1296) e um material genético seminal E1 (*E. urophylla*), todos com 14 anos de idade, coletados em uma fazenda na região norte no estado do Tocantins para produção de bioenergia. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos florestais da Universidade Federal do Tocantins (UFT), em que foram determinadas as propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira por meio de análises de teor umidade, densidade básica, teor de extrativos totais, lignina total e holocelulose, além da análise química imediata da madeira (AQI) por meio dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Também foram estimados os componentes elementares (Carbono, Hidrogênio e Oxigênio), o poder calorífico superior, densidade energética, estoque de carbono e índice de valor combustível. O efeito clonal afetou significativamente, a densidade básica e energética, os teores de lignina total, teor de materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico superior e índice de valor combustível, respectivamente. Dentre os materiais genéticos analisados, destacou-se o clone 1296, para a finalidade energética, por apresentar maiores valores médios para a densidade básica (590 kg/m<sup>3</sup>) e energética (2745,36 kcal/m<sup>3</sup>), lignina total (27,71%), teor de carbono fixo (14,24%), poder calorífico superior (4602,48 kcal/kg) e índice de valor combustível (14,60%). De maneira geral, os cinco materiais genéticos estudados atenderam as especificações para o uso energético e podem ser altamente viáveis em razão de suas características físicas, químicas, energéticas como alternativa para produção de energia renovável.

**Palavras-chaves:** Biomassa. Combustão. Densidade energética. Energia Renovável.

## ABSTRACT

The demand for renewable energy has been growing worldwide. The use of biomass as an energy input through direct wood combustion, charcoal, gasification, compaction, among other processes, has intensified significantly. In this context, this research aimed to evaluate the energy potential of wood from four hybrid Eucalyptus clones (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* – 2361, 321, 1250, 1296) and one seminal genetic material E1 (*E. urophylla*), all 14 years old, collected from a farm in the northern region of the state of Tocantins for bioenergy production. The analyses were conducted at the Laboratory of Technology and Utilization of Forest Products of the Federal University of Tocantins (UFT), where the physical, chemical, and energetic properties of the wood were determined through analyses of moisture content, basic density, total extractives content, total lignin, and holocellulose, in addition to proximate chemical analysis (PCA) of the wood by determining volatile matter, fixed carbon, and ash contents. The elemental components (Carbon, Hydrogen, and Oxygen), higher heating value, energy density, carbon stock, and fuel value index were also estimated. The clonal effect significantly influenced basic and energy density, total lignin content, volatile matter content, fixed carbon, higher heating value, and fuel value index, respectively. Among the genetic materials analyzed, clone 1296 stood out for energy purposes, presenting higher average values for basic density (590 kg/m<sup>3</sup>) and energy density (2745.36 kcal/m<sup>3</sup>), total lignin (27.71%), fixed carbon content (14.24%), higher heating value (4602.48 kcal/kg), and fuel value index (14.60%). Overall, the five genetic materials studied met the specifications for energy use and may be highly viable due to their physical, chemical, and energetic characteristics as an alternative for renewable energy production.

**Keywords:** Biomass. Combustion. Energy density. Renewable energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da fazenda experimental Novo Cerrado ao norte do Estado de Tocantins.....	24
Figura 2 - Preparação das amostras.....	25
Figura 3 - Análises químicas da madeira. A: Processo de extração dos extrativos da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> em etanol tolueno. B/C: Utilização de autoclave para etapa de determinação do teor de lignina da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> . D/E/F: Determinação teor de lignina da madeira.....	29
Figura 4- Gráfico da correlação de Pearson entre as variáveis principais referentes às propriedades da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades físicas e químicas da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> coletados ao norte do Estado de Tocantins .....	34
Tabela 2- Propriedades energéticas da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> como alternativa para produção de energia .....	36

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	15
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>3.1 Panorama da Biomassa Florestal na Matriz Energética Nacional</b> .....	16
<b>3.2 Biomassa</b> .....	17
3.2.1 Biomassa florestal .....	17
3.2.2 Variáveis energética da biomassa florestal para produção de bioenergia .....	19
3.2.3 Prospectos para a utilização de biomassa florestal.....	20
3.2.4 Biomassa para energia proveniente do gênero <i>Eucalyptus</i> .....	22
3.2.5 Produção de espécies e materiais genéticos do gênero <i>Eucalyptus</i> no Tocantins.....	23
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>4.1 Local e coleta do material</b> .....	24
<b>3.2 Preparação das amostras</b> .....	25
<b>3.3 Propriedades físicas e químicas da madeira do fuste de clones de <i>Eucalyptus</i></b> .....	25
3.3.1 Propriedades Físicas da Madeira .....	25
3.3.1.1 Teor de umidade.....	25
3.3.1.2 Densidade básica .....	26
3.3.2 Propriedades Química da Madeira .....	26
3.3.2.1 Teor de extrativos totais .....	26
3.3.2.2 Teor de lignina .....	27
3.3.2.3 Solubilidade em Hidróxido (NaOH).....	29
<b>3.4 Propriedades Energéticas da Madeira da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i></b> .....	30
3.4.1 Análise química imediata da madeira (AQI).....	30
3.4.2 Poder calorífico superior da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> . .....	31
3.4.3 Densidade energética da madeira e Estoque de carbono da madeira dos clones de <i>Eucalyptus</i> . .....	31
3.4.4 Análise química elementar da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> . .....	32
3.4.5 Índice de Valor Combustível da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> .....	33
<b>3.5 Análises estatísticas dos dados</b> .....	33
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	42
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

<b>ANEXO - ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>50</b>
---	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energias renováveis tem crescido exponencialmente, impulsionada pelo reconhecimento da necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais decorrentes de sua utilização (BOFF; OURIQUES, 2018; PEYERL *et al.*, 2020). Nesse contexto, a biomassa surge como uma alternativa promissora, oferecendo uma fonte de energia renovável e sustentável.

A matriz energética brasileira, segundo a Empresa de Pesquisa Energética-EPE, ainda utiliza 34% de derivados de petróleo, é uma fonte de energia não renovável e uma das principais emissoras de gases de efeito estufa (EPE, 2025). Ademais, a biomassa apresenta um grande potencial que pode implementar a matriz energética brasileira de forma parcial, com o possível crescimento para os próximos anos (JÚNIOR *et al.*, 2017). De acordo com Goldemberg (2017), ela dispõe de uma participação importante devido ao uso de cana de açúcar para a produção de etanol, como também, da lenha e carvão vegetal para a indústria siderúrgica.

Dentro desta perspectiva, a biomassa como uma fonte energética, tem um grande potencial na geração de energia renovável, pois pode ser uma boa alternativa na produção de energia devido a sua alta produtividade, baixo custo e produção sustentável (TEIXEIRA; SILVA, 2021). Além disso, pode promover a redução da dependência do uso de combustíveis fósseis, melhorando a matriz energética brasileira. Portanto, a biomassa florestal tem seu lugar de destaque dentro deste contexto, pois não se limita apenas ao uso da madeira (lenha), mas também a queima direta de resíduos como a casca da madeira de *Eucalyptus* (carvão vegetal) (JÚNIOR *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2017; HENRIQUES *et al.*, 2017; SETTE JR *et al.*, 2018).

Neste sentido, o gênero *Eucalyptus* está consolidado como uma boa alternativa para a geração de energia térmica por meio da queima direta (FLORES *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2017; CRISP *et al.*, 2024). As espécies deste gênero são comumente utilizadas para a produção de bioenergia devido ao rápido crescimento, elevada adaptabilidade e alta densidade energética, além da relativa facilidade em manejo, aceite comercial e sustentabilidade da produção.

A demanda por maiores áreas de plantio de eucalipto tem se intensificado nos últimos anos, principalmente devido ao aumento da demanda pela indústria. De acordo com o relatório da IBÁ (2024), o Brasil ultrapassou a marca de 10 milhões de hectares cultivados com florestas plantadas para fins industriais, destes, 7,8 milhões de hectares foram destinadas ao cultivo de *Eucalyptus*, no entanto, apenas 11% deste montante foi destinado para a produção de carvão vegetal (NICOLLE, 2022; IBÁ, 2024; MORAES *et al.*, 2024). No estado do Tocantins,

aproximadamente 101.625 mil hectares foram ocupados com plantios deste gênero, cuja produção foi destinada principalmente para queima, com uma produção de lenha de 142856 m<sup>3</sup> (IBÁ, 2024).

No entanto, a qualidade dessa biomassa a ser produzida pode variar significativamente de acordo com alguns fatores, especialmente quando proveniente de *Eucalyptus*, sendo alguns destes a espécie ou o material genético selecionado, a idade do plantio, as práticas de manejo e as condições edafoclimáticas que afetam o seu crescimento (MORAES *et al.*, 2014; CARNEIRO *et al.*, 2017; FURLAN *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2022).

Nessa perspectiva, é importante ressaltar, a importância de estudos voltados ao melhoramento genético florestal, para maximizar a produção quantitativa e qualitativa silvicultura energética, através da seleção de genótipos mais produtivos, especialmente do gênero *Eucalyptus*. Essas pesquisas são cruciais para o desenvolvimento de clones adaptados a necessidades específicas, levando consideração as condições edafoclimáticas, com o objetivo do favorecimento dos parâmetros fenotípicos e genotípicos voltados produção de bioenergia (FRIGOTTO *et al.*, 2020).

Assim, mediante o potencial energético da biomassa florestal e da necessidade de pesquisas voltadas a sua utilização como fonte de energia renovável, esse estudo é importante para determinar a qualidade energética dos diferentes clones de *Eucalyptus*, buscando identificar o melhor material genético com bases as suas propriedades da madeira visando uma melhor capacidade para a produção de bioenergia por meio da queima direta, corroborando para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis no uso dessa importante fonte energia no estado do Tocantins.

Considerando o aumento da demanda por energias renováveis e a intensificação do uso da biomassa como insumo energético, é possível hipotetizar que diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* apresentam variação significativa em suas propriedades físicas, químicas e energéticas, sendo alguns clones mais adequados à produção de bioenergia do que outros. Assim, espera-se que ao menos um dos clones híbridos avaliados demonstre maior potencial energético, com destaque para densidade básica, lignina total, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e índice de valor combustível, tornando-se alternativa promissora para atender às demandas de energia renovável.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da madeira de material clonal de *Eucalyptus* como alternativa para produção de bioenergia no estado do Tocantins.

### 2.2 Objetivos específicos

- determinar as propriedades químicas e físicas da biomassa;
- determinar e avaliar a qualidade energética de materiais clonais de *Eucalyptus*;
- identificar o melhor material genético em função das características avaliadas para geração de bioenergia dos clones de *Eucalyptus*.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Panorama da Biomassa Florestal na Matriz Energética Nacional

O emprego da biomassa florestal sempre teve um papel importante na matriz energética brasileira. Como fonte de bioenergia é, historicamente, bastante antiga. Seu aproveitamento energético ocorre principalmente por meio de processos tecnológicos de transformação térmica mais simples, como a queima direta e a carbonização. Exemplos são: o uso do carvão vegetal por decorrência da demanda do setor siderúrgico, e da lenha, largamente usada na cocção de alimentos no segmento residencial, sendo a forma predominante de energia no Brasil até praticamente os anos de 1970 (AMARAL, 2019, SILVA *et al.*, 2021).

No ano de 2024, a participação das fontes renováveis na matriz energética nacional era de 50%, onde a biomassa ocupava 30,3% na geração de bionergia. Dividindo os seus principais insumos energéticos em bagaço de cana de açúcar (16,7%), o licor negro (11,5%) e a lenha e carvão vegetal (8,1%) (EPE, 2025). É importante ressaltar que, o bagaço de cana ocupa lugar destaque na geração biocombustível, principalmente na indutaria de etanol, consolidado através Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em 1975 em resposta à crise do petróleo e com objetivo de reduzir a dependência do mesmo (SILVA *et al.*, 2021).

Por meio dessas informações é importante inferir a versatilidade da biomassa na geração de combustíveis renováveis de origem biológica (sólidos, líquidos e gasosos) nos diversos segmentos, entre as principais vias de sua conversão em biocombustíveis, destacam-se o uso madeira, com pouco ou quase nenhum processamento, na forma de lenha e até mesmo como produtos mais elaborados como o carvão vegetal e o extrato pirolenhoso (AMARAL, 2019, SILVA *et al.*, 2021).

O uso da biomassa para produção de energia é responsável por 8,4% no universo total de geração outorgada no país, os principais materiais usados nesse processo são o bagaço de cana de açúcar (4,9%) e o licor negro (2,3%). A matriz elétrica brasileira é predominantemente composta por fontes renováveis (Fontes na Capacidade Instalada) que representam 88,8% da oferta interna de eletricidade, desse montante destaca-se a geração hidráulica que responde por 54,9%. Ressalta-se a tendência de recuperação da participação das fontes renováveis após um período de retração destas devido à crise hídrica, nos anos de 2013 e 2014, que culminou no aumento na geração térmica a base de combustíveis fósseis (EPE, 2025).

De acordo com Amaral (2019) são diversas as rotas para obtenção de energia, tanto renovável quanto não renovável, e muitas delas são produzidas a partir do trabalho gerado por

energia mecânica - turbinas hidráulicas e cataventos - energia química, energia solar, fissão nuclear, dentre outras. Tratando-se de energia por meio de biomassa florestal, o setor industrial é o principal consumidor, sendo seguido pelo setor energético e, em seguida, pelo setor de transportes (correspondente ao consumo de álcool combustível) (EPE, 2025).

## 3.2 Biomassa

### 3.2.1 Biomassa florestal

A madeira ou a biomassa pode ser convertida em inúmeros combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos por meio de rotas termoquímicas, bioquímicas, mecânicas ou a conciliação destas (PROTÁSIO *et al.*, 2015; CARNEIRO *et al.*, 2017). No Brasil, os dois processos mais empregados para o uso da energia da madeira são: a combustão direta, para geração de calor, e a pirólise lenta, para a produção de carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

A biomassa florestal quando comparada aos combustíveis fósseis convencionais, apresenta menor emissão de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e fuligem, dado que possui baixo teor de enxofre (BILGEN *et al.*, 2015; HERBERT; KRISHNAN, 2016; BONASSA *et al.*, 2018), nitrogênio e cinzas, é uma fonte de energia renovável, balanço neutro de CO<sub>2</sub>, permite a utilização de resíduos, é abundante, apresenta baixo custo e é uma cultura energética de rápido crescimento (BILGEN *et al.*, 2015). Outras comparações a respeito das vantagens do uso de biomassa sobre os combustíveis fósseis foram efetuadas por Herbert e Krishnan (2016), além de apresentarem os impactos ambientais da energia de biomassa.

Na atualidade, a biomassa apresenta-se como uma promissora fonte de energia renovável capaz de substituir os combustíveis petrolíferos, assim como reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> (BEN-IWO; MANOVIC; LONGHURST, 2016). Conforme as definições levantadas por Deboni *et al.* (2019) para os tipos de biomassa florestal: a casca é o material externo da madeira que é coletado nas áreas de colheita; o cavaco florestal é o material (pequenos troncos e galhos) que, ainda no local da colheita, passa por um triturador; lascas industriais, aparas de madeira e serragem são materiais do desdobramento da madeira na indústria.

Entre as múltiplas fontes de energia, o custo de produção da biomassa é classificado como um dos mais baixos (SILVA *et al.*, 2018). De acordo com Searchinger; Beringer; Strong (2017) as estimativas de potencial de bioenergia erram ao contar os benefícios do uso da terra, mas não dos custos. A viabilidade técnica e econômica de um processo de conversão de energia por meio da biomassa, deve-se considerar: o tipo de biomassa, características químicas e físicas,

teor de umidade, porcentagem de cinzas, poder calorífico, densidade; além de aspectos técnicos da colheita e transporte (RODRÍGUEZ-MONROY *et al.*, 2018). Deboni *et al.* (2019) relatam que apesar dos inúmeros fatores benéficos à aplicação da biomassa florestal como fonte de energia, esses materiais ainda são subutilizados.

As principais rotas tecnológicas aplicadas nos processos de cogeração no setor industrial são:

O ciclo a vapor com turbinas de contrapressão: a geração de energia é integrada aos processos industriais para o atendimento das necessidades térmicas da produção (AMARAL, 2019). Neste equipamento a biomassa é queimada diretamente em caldeiras visando à produção do vapor que irá acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico requerido nas unidades de produção e as turbinas para geração de energia (RIBEIRO *et al.*, 2017).

O ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração: consiste na condensação total ou parcial do vapor permitindo que parte deste seja extraído, em um ponto intermediário da expansão, e direcionado para o próprio arranjo produtivo e o restante seja condensado, otimizando seu aproveitamento energético e permitindo a geração de energia independente do consumo de vapor durante o processo produtivo (RIBEIRO *et al.*, 2017; AMARAL, 2019).

O ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa: é configurado pela utilização de turbinas a gás e a vapor, sendo possível integrar o gaseificador ao ciclo combinado com turbina a gás. Neste ciclo há o aproveitamento dos gases de exaustão da turbina para gerar vapor e utilizá-lo para geração de eletricidade (RIBEIRO *et al.*, 2017; AMARAL, 2019). Este conjunto é o mais eficiente na conversão da energia do combustível em potência.

Amaral (2019) e Foelkel (2016) afirmam que a principal característica dos sistemas de ciclo a vapor é o baixo rendimento na conversão da biomassa florestal apenas em energia elétrica. A taxa de conversão da energia primária útil gerada pela biomassa em energia costuma ser de 15 a 35%, respectivamente.

No que diz respeito às vantagens da cogeração, Foelkel (2016) e Reis (2011) citam como principais as seguintes características:

- aumento da eficiência energética do combustível;
- redução dos custos de produção dos produtos energéticos;
- autossuficiência na produção de energia e conseqüente segurança no abastecimento;
- possibilidade do uso de fontes renováveis minimizando os impactos ambientais.

### 3.2.2 Variáveis energética da biomassa florestal para produção de bioenergia

A biomassa florestal é utilizada como fonte de energia, sob a forma de lenha, desde os mais remotos tempos sem que houvesse preocupação com a sua sustentabilidade (RIBEIRO *et al.*, 2017; AMARAL *et al.*, 2019). Por este motivo, durante muito tempo o termo biomassa foi associado à ideia de desmatamento (SILVA *et al.*, 2018).

Mediante este aspecto, a utilização da biomassa florestal para a geração de energia térmica vem sendo aplicada em diversas indústrias e segmentos agropecuários em detrimento dos combustíveis fósseis, principalmente dos óleos combustíveis e diesel (RIBEIRO; VALVERDE, 2016).

A eficiência energética da biomassa sólida depende da tecnologia de conversão aplicada na geração e também de algumas propriedades físicas da madeira (CARNEIRO *et al.*, 2014; PROTÁSIO *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2018). Reis (2011), Vieira *et al.*, (2013); Protásio *et al.* (2014); Jesus *et al.*, (2017) e Silva *et al.* (2018) as principais propriedades da biomassa para energia são: densidade da madeira, poder calorífico, umidade, análise química elementar, imediata e estrutural, teor de inorgânicos e o comportamento térmico da biomassa.

A avaliação energética é realizada com o objetivo de promover a classificação de genótipos superiores, pois são relevantes para a tomada de decisão na implementação de projetos de reflorestamentos visando a utilização da biomassa como fonte energética. As características morfológicas e fisiológicas da madeira servem para promover a diferenciação entre os materiais genéticos (CARNEIRO *et al.*, 2017). Brand (2010), Carneiro *et al.*, (2014); Marchesan *et al.*, (2020) e Silva *et al.*, (2020) Dessa forma, as principais propriedades da madeira almejadas para o uso energético são: elevada densidade básica, elevado poder calorífico; elevado teor de lignina; baixo teor de cinzas e baixa umidade (SILVA *et al.*, 2018).

A avaliação das propriedades energéticas e da eficiência do material permite a obtenção de biomassa mais competitiva frente a outras fontes de energia. A densidade energética é um importante parâmetro a ser considerado, pois influencia diretamente o transporte do material, a quantidade de biomassa consumida no processo de queima e o tamanho do silo de armazenamento de uma máquina, especialmente quando relacionada à energia necessária e às características do material (PEREIRA *et al.*, 2016). No entanto, a baixa densidade energética da biomassa sólida, em comparação às fontes fósseis, impacta negativamente nos custos de transporte e armazenamento, ao passo que o teor de umidade afeta significativamente a qualidade da combustão e o poder calorífico da biomassa (CARNEIRO *et al.*, 2017). Diante

disso, é fundamental compreender as principais vantagens e limitações do uso da biomassa florestal como combustível na geração de energia.

Além disso, outra das características importantes para selecionar biomassas que apresentem potencial energético é sua estabilidade térmica. Técnicas como a análise termogravimétrica (TGA) possibilitam compreender a decomposição da biomassa em função do aquecimento em processos de conversão termoquímica (CARNEIRO *et al.*, 2014). A análise termogravimétrica consiste em analisar a variação da massa de amostras em sistema sob o controle da temperatura e atmosfera, o qual pode variar tanto com a temperatura quanto com o tempo, obtendo informações da composição e da estabilidade térmica, além de conhecer as faixas de temperaturas em que a decomposição é mais pronunciada (YEO *et al.*, 2017).

### 3.2.3 Prospectos para a utilização de biomassa florestal

Os combustíveis fósseis, apesar de serem abundantes não são renováveis e predominam em relação a economia energética mundial, cobrindo (VIEIRA *et al.*, 2021) e continuarão a desempenhar um papel importante na geração de energia, no entanto, as fontes renováveis aumentarão a sua participação no mercado (BILGEN *et al.*, 2015). A demanda por energia cresce em ressonância com o crescimento populacional, industrial e tecnológico. Para o período até 2030, prevê-se que o consumo mundial de energia aumente em 40% (BILGEN *et al.*, 2015).

Em todo o mundo, os países estão investindo em tecnologias de biomassa para obter a segurança energética e reduzir suas emissões de combustíveis fósseis e seus problemas relacionados (MAHESH; SHOBA JASMIN, 2013). Projeções de demanda, como para uso primário de biomassa em todo o mundo, sugerem que a biomassa desempenhará um papel maior no fornecimento de energia renovável, de início grande parte da demanda extra pode ser coberta por resíduos orgânicos, resíduos agrícolas e biomassa florestal, mas a produção destas fontes deve aumentar gradualmente para acompanhar a demanda (WIT; JUNGINGER; FAAIJ, 2013). A energia da madeira é a fonte mais importante de bioenergia no mundo (TIMKO *et al.*, 2018). Pressupõe-se que a produção de biomassa florestal deverá dobrar na Europa em 2030, com Alemanha, Rússia e França como principais produtores (MATZENBERGER *et al.*, 2015).

O Brasil se destaca pela diversidade de sua matriz energética e pela busca na diminuindo da dependência de fontes não renováveis. Ademais, o país possui um grande território, com uma extensa área para prática silvicultura energética e clima favorável. E tem sido feito investimentos significativos em tecnologias melhorias na qualidade e produção da biomassa como também explorar novas fontes da mesma (SILVA *et al.*, 2021).

As projeções de uso futuro de energia e energia renovável, levando-se em consideração também a legislação sobre mudança climática, sugerem um aumento do uso de energia a partir de biomassa florestal e agrícola nas próximas décadas (BILGEN *et al.*, 2015). O maior potencial de produção de biomassa será de plantações de energia em larga escala em áreas com clima favorável para maximizar a produção de biomassa (MATZENBERGER *et al.*, 2015). Timko *et al.* (2018) mencionam que as florestas têm um importante papel a desempenhar para o sucesso da Agenda 2030, o que exigirá prioridades explícitas para abordar as principais compensações e integrar com outros Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Sustainable Development Goals – SDGs).

O estudo de Kim *et al.* (2018) fornece uma perspectiva global, demonstrando como o aumento do potencial demanda de biomassa florestal em uma ou várias regiões pode alterar as futuras tendências de manejo florestal, mercados e sequestro de carbono nas principais regiões de suprimento de madeira. Os resultados indicam que o potencial crescimento a curto prazo (2015-2030) nos Estados Unidos, Europa e outro lugares pode impulsionar o investimento de recursos florestais. Se os recursos disponíveis forem utilizados de maneira sustentável, a biomassa pode desempenhar um importante papel na produção de energia (HERBERT; KRISHNAN, 2016). Conforme Ferreira *et al.* (2018), a bioenergia florestal encontra-se em estágio inicial, contudo há uma tendência de crescimento de fornecimento de matéria-prima na próxima década devido a disponibilidade de recursos e ao forte apoio do governo.

O estudo de Bilgen *et al.* (2015) mostra que a energia de biomassa tradicional (madeira e esterco) se apresenta como potencial para a mitigação das mudanças climáticas e sustentabilidade na Turquia, além de substituir o petróleo bruto e o gás natural. Contudo, o país não possui experiência em novas tecnologias modernas para conversão da biomassa. Diferentemente da realidade mundial, a geração de eletricidade no Brasil é historicamente baseada em fontes renováveis (DANTAS *et al.*, 2017), e atualmente é fortemente dependente de duas fontes: hidrelétrica e gás natural (FERREIRA *et al.*, 2018).

De acordo com Kammen e Sunter (2016), as hidrelétricas estão cada vez mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas e do clima extremo. Há necessidade de diversificar a matriz energética para garantir a segurança nacional e uma maior inclusão de outras fontes de energia renovável. Assim sendo, a geração distribuída de eletricidade gerada a partir de biomassa poderia auxiliar o país na preservação do meio ambiente e contribuir para a diversificação da matriz energética, o desenvolvimento econômico e a ampliação do acesso à energia em comunidades isoladas (FERREIRA *et al.*, 2018).

### 3.2.4 Biomassa para energia proveniente do gênero *Eucalyptus*

De acordo com Chandorkar *et al.* (2021), são conhecidas 900 espécies e subespécies do gênero *Eucalyptus* da família *Myrtaceae*, que teve origem na Austrália, Tasmânia e em outras ilhas da Oceania. Devido ao grande número de espécies, o que facilita a introdução em diferentes condições edafoclimáticas, a produtividade e características da sua madeira, o gênero *Eucalyptus* tem sido apontado como uma das melhores opções para a produção de energia (PROTÁSIO *et al.*, 2014).

A utilização de madeira para produção de energia no Brasil é resumida basicamente em dois processos em que, um resulta em carvão vegetal através da carbonização e o outro no consumo direto da lenha através da combustão (BORGES *et al.*, 2017). A justificativa para a geração desses dois tipos de energia através da madeira está em sua composição (BRAND, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2016).

As espécies do gênero *Eucalyptus* possuem em geral um alto poder calorífico, propriedade esta que se encontra diretamente relacionada com seu rendimento energético e a sua constituição química, onde os teores de celuloses, hemiceluloses, lignina, extrativos e substâncias minerais variam de uma espécie para outra (BRAND, 2010; REIS *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2014; CARNEIRO *et al.*, 2014; JESUS *et al.*, 2017; MARCHESAN *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2024). A densidade da madeira também é um fator relevante, pois esta é um índice de qualidade da madeira já que está relacionado com a produção de massa seca, propriedades físico-mecânicas e com a qualidade dos produtos (VIEIRA *et al.*, 2013; TORRES *et al.*, 2016; CARNEIRO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018).

O setor brasileiro de florestas tem crescido nos últimos anos, sendo resultante da aplicação de novas tecnologias, como o melhoramento genético de espécies florestais, além dos fatores ambientais favoráveis a silvicultura. Este aprimoramento tem levado o Brasil se destacar na produtividade florestal de espécies plantadas (TORRES *et al.*, 2016). No Brasil predominante encontra-se localizadas nos Estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul, as plantações de *Eucalyptus*, sendo que no ano de 2019, representaram 77% dos 9 milhões de hectares de florestas plantadas no país (IBÁ, 2020). Com produtividade média no Brasil de 33,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> essas plantações foram principalmente destinadas a produção de celulose e papel, comercialização da madeira em toras e para indústria siderúrgica com carvão vegetal (IBÁ, 2024).

Entre as principais espécies cultivadas no Brasil, destacam-se o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* (IBÁ, 2020). Os híbridos mais difundidos no

Brasil são provenientes do cruzamento *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Conforme com Gonzalez *et al.*, (2014) o objetivo do cruzamento entre essas duas espécies é obter plantas com alta resistência a déficit hídrico (característica do *E. urophylla*) e alto potencial de enraizamento e crescimento em campo (características do *E. grandis*). Combinando as características inerentes às duas espécies, obtém-se um híbrido com boas características adaptativas às mais diferentes condições. Na escolha do material genético a ser utilizado deve levar em consideração as suas exigências edafoclimáticas, além do uso final da madeira, que depende de suas características tecnológicas (VECHI *et al.*, 2018).

### 3.2.5 Produção de espécies e materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* no Tocantins

O Tocantins é um estado novo, localizado na região Norte do Brasil, com uma área de 277.620,9 km<sup>2</sup>. O estado foi criado em 05 de outubro de 1988 e atualmente possui 139 municípios. Nos últimos anos o estado tem passado por um processo de crescimento significativo no setor do agronegócio (OLIVEIRA; PIFFER, 2016). Em relação a silvicultura, principalmente do gênero *Eucalyptus*, a região norte apresenta uma participação pequena (5%) dos 7,8 milhões hectares plantados no país. O estado do Tocantins, por sua vez, possui uma área plantada de 101.625 mil hectares com uma produção de lenha de 142856 m<sup>3</sup> (IBÁ, 2024). Vale destacar, que esses plantios são destinados principalmente para produção de carvão vegetal para atender a demanda da indústria de siderúrgica do Pará e Maranhão, como também a demanda de madeira para indústria de celulose (DUARTE; COLLICCHIO, 2020).

Os clones de *Eucalyptus* cultivados no estado do Tocantins são provenientes de outros estados, isso faz com as condições edafoclimáticas sejam diferentes, influenciando na escolha dos materiais genéticos. As principais espécies e respectivos clones de *Eucalyptus* plantados no estado são os clones: H13 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), H224 (*E. urophylla*), 10 (*Corymbia citriodora*) e 20 (*Eucalyptus camaldulensis*).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

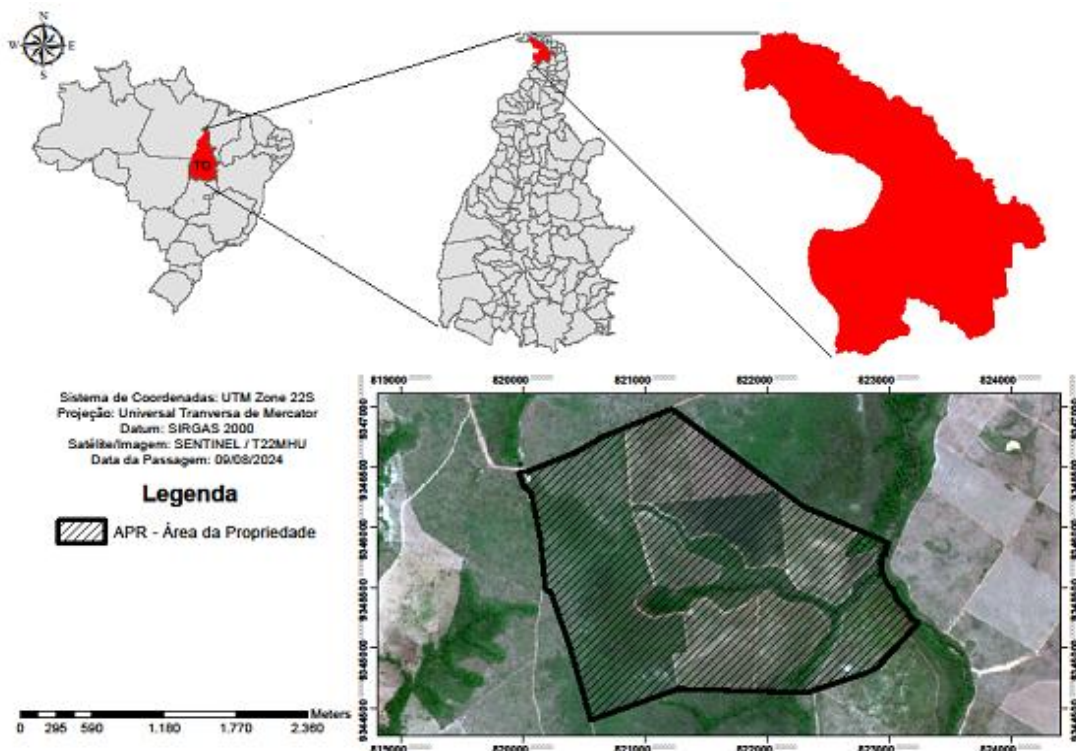
### 4.1 Local e coleta do material

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais do curso de Engenharia Floresta da Universidade Federal do Tocantins - UFT no Campus de Gurupi.

Para a condução dos experimentos, foram utilizadas amostras de quatro clones híbridos *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* -2361, 321, 1250, 1296 e um material genético seminal E1 do *Eucalyptus urophylla*. todos com 14 anos de idade de uma empresa Siderúrgica.

As coletas das amostras ocorreram no município de Araguatins, na fazenda denominada Novo Cerrado, na região norte no estado do Tocantins (Figura 1). A fazenda experimental está situada de acordo com as coordenadas Latitude: -5.65615, Longitude: -48.1189 5° 39' 22" Sul, 48° 7' 8" Oeste. A climatologia, segundo Köppen é o Aw, clima tropical com estação seca, com expressivo período de estiagem, sendo o trimestre mais seco entre os meses de julho a setembro e o mais chuvoso de fevereiro a abril (SEPLAN, 2012). A temperatura média anual é de 29 °C e a precipitação média anual é de 1676 mm, entretanto, há uma amplitude climática na região, podendo a precipitação anual média variar de 1255 a 2152 mm.

Figura 1 - Mapa de localização da fazenda experimental Novo Cerrado ao norte do Estado de Tocantins.

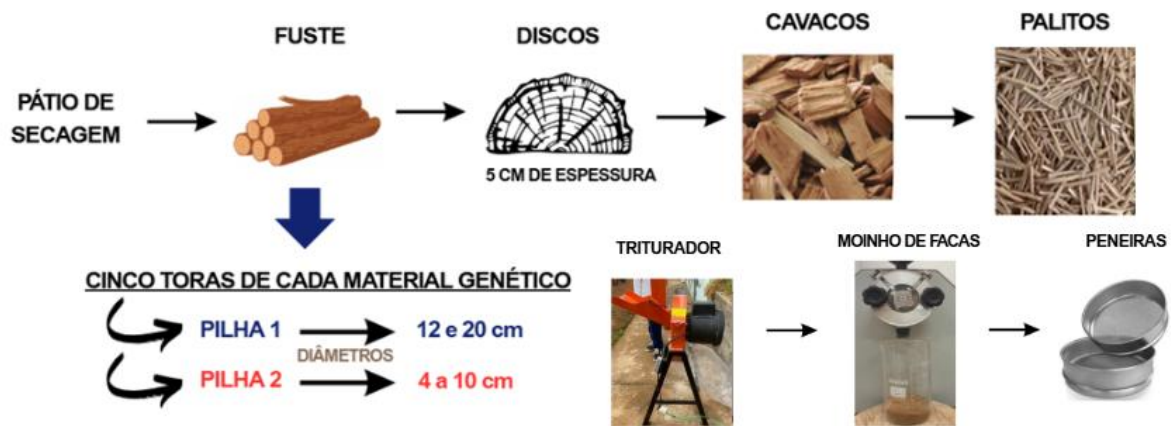


Fonte: Silva (2024).

### 3.2 Preparação das amostras

No pátio de secagem, foram selecionadas cinco amostras (fustes) de cada clone, que posteriormente foram organizadas em classes de diâmetro (Figura 2). A pilha 1 foi composta por fustes com diâmetros entre 12 e 20 cm, enquanto a pilha 2 com fustes de diâmetros variando de 4 a 10 cm. Em seguida, realizou-se a seleção do material e, a partir dos fustes, foram obtidos discos de aproximadamente 5 cm de espessura, devidamente separados de acordo com cada clone.

Figura 2- Preparação das amostras



Fonte: Autor, (2025).

As amostras foram preparadas conforme os procedimentos exigidos para as análises. Para os experimentos, as amostras de madeira dos quatro clones híbridos 2361, 321, 1250, 1296 de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e do material genético seminal (E1), foram transformadas (Figura 2) em cavacos (Figura 2). Na sequência, esses cavacos foram convertidos em palitos, triturados e posteriormente moídos em um moinho de facas. As partículas obtidas foram então classificadas em peneira de 40 mesh, sendo utilizadas para as análises aquelas que permaneceram retidas na peneira de 60 mesh.

### 3.3 Propriedades físicas e químicas da madeira do fuste de clones de *Eucalyptus*.

#### 3.3.1 Propriedades Físicas da Madeira

##### 3.3.1.1 Teor de umidade

Para determinação do Teor de umidade (TU), fez-se o uso da metodologia apresentada por Wastowski (2018). Esse procedimento, consiste em calcular a quantidade de água que está presente na madeira em relação ao seu peso seco, em porcentagem. Nesse processo, foram utilizadas 1,2 g das amostras de cada material clonal. A permanência das amostras em estufa de secagem foi a uma temperatura de  $105 \pm 3$  °C. Este ensaio é necessário para poder expressar os resultados na base seca Equação 1.

$$TU = \left( \frac{Pu - Ps}{Ps} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que:

TU = teor de umidade (%);

Pu = Peso úmido (g);

Ps = Peso seco (g).

### 3.3.1.2 Densidade básica

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método da balança hidrostática, baseado na norma ASTM D-2395 (ASTM, 2005). O cálculo para determinar a densidade básica foi realizado conforme a Equação 2.

$$DB = \frac{PS}{VU} \quad (2)$$

Em que:

DB = densidade básica ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

PS = peso seco da amostra de madeira (g);

VU = volume úmido ( $\text{g.cm}^{-3}$ ).

## 3.3.2 Propriedades Químicas da Madeira

### 3.3.2.1 Teor de extrativos totais

Empregou-se, a metodologia proposta por Wastowski (2018) para determinar o teor de extrativos totais. Para cada amostra, foram confeccionadas triplicatas em papel filtro. Em

seguida, foi acrescentado aproximadamente 2,0000 g das partículas, que foram peneiradas e ficarão retidas na peneira de 60 mesh, e levadas e colocadas em um extrator do tipo Soxhlet (Figura 3-A). No extrator, as amostras foram submetidas a um processo de extração em duas etapas. Na primeira etapa, utilizou-se 200 ml de etanol: tolueno (1:2) em um balão volumétrico de 250 ml por 8 horas. Na segunda etapa, 200 ml de etanol a 95% de concentração foram utilizados por mais 6 horas. Após cada etapa de extração, as amostras foram levadas à estufa a  $80 \pm 2$  °C para remover o excesso de solvente.

Posteriormente, as amostras foram transferidas para béqueres de 500 ml, onde 500 ml de água destilada quente foram adicionados e levadas ao banho maria por 1 hora. Após, foram filtradas em cacinhos filtrantes previamente pesados e secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C até massa constante. O teor de extrativos totais foi então calculado pela Equação 3:

$$T_{Et} = \left( \frac{(P_{as} - (P_{ac} - P_c))}{P_{as}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$T_{Et}$  = teor de extrativos totais (%);

$P_{as}$  = peso da amostra seca (g);

$P_c$  = peso do cacinho filtrante (g);

$P_{ac}$  = peso da amostra + cacinho (g).

### 3.3.2.2 Teor de lignina

Para determinação do teor de lignina foi utilizada a metodologia descrita Wastowski (2018) em que após a remoção dos extrativos totais como descrito no item 2.4.2, foram pesados cerca de 0,30 g de partículas as quais foram transferidas para um Erlenmeyer. Em seguida, foram adicionados 3 ml de ácido sulfúrico 72 % em cada amostra, misturando frequentemente com auxílio de um bastonete por 1 hora. Após esse tempo, foram adicionados 84 ml de água quente sendo encaminhados para autoclave a 120 °C por 1 hora (Figura 3-B-C). Posteriormente as amostras foram filtradas em cacinho de vidro com pesos já conhecidos e a lignina retida no cacinho foi lavada com 700 ml de água destilada quente até a completa remoção do ácido (Figura 3-D). Os cacinhos com as amostras de lignina insolúvel foram acondicionados em estufa a  $103 \pm 2$  °C até massa constante e assim foi determinado o teor de lignina insolúvel da madeira pela Equação 4 (Figura 3).

$$LI (\%) = \frac{\left(\frac{MS}{0,3}\right)}{1 - \left(\frac{ET}{100}\right)} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

$LI (\%)$  = lignina insolúvel (%);

MS = massa de lignina seca já descontando a tara do cadinho (g);

ET = teor de extrativos totais (%)

O líquido filtrado da lignina presença de lignina solúvel analisado com um espectrofotômetro com comprimento de onda de 205 nm. Os teores lignina solúvel, lignina total e holocelulose foram calculados por meio das equações abaixo:

$$LS(\%) = \frac{\frac{A}{110} \times F \times \frac{97}{1000}}{m} \times 100 \quad (5)$$

$$LT(\%) = LI + LS \quad (6)$$

$$TH(\%) = 100 - (ET + LT) \quad (7)$$

Em que:

$LS(\%)$  = teor de lignina solúvel (%);

m = massa da amostra descontada a umidade (g);

A = absorvância lida pelo espectrofotômetro;

F = fator de diluição;

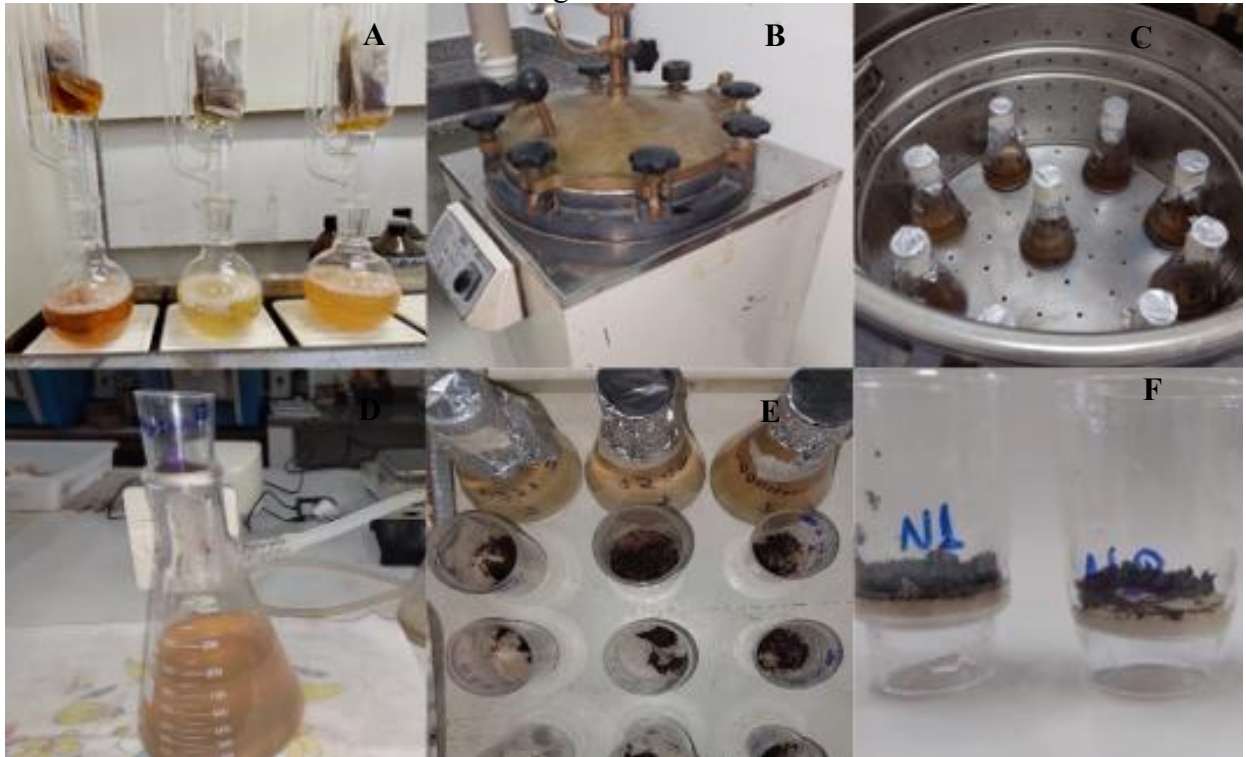
ET = teor de extrativos totais (%);

$LT(\%)$  = teor de lignina total (%);

LI = teor de lignina insolúvel (%);

$TH(\%)$  = teor de holocelulose (%).

Figura 3- Análises químicas molecular da madeira. A: Processo de extração dos extrativos da madeira de clones de *Eucalyptus* em etanol tolueno. B/C: Utilização de autoclave para etapa de determinação do teor de lignina da madeira de clones de *Eucalyptus*. D/E/F: Determinação teor de lignina da madeira.



Fonte: Autor, (2025).

### 3.3.2.3 Solubilidade em Hidróxido (NaOH)

Para determinar a solubilidade em NaOH foram pesados em béqueres na balança analítica aproximadamente 2,0 g de partículas absolutamente secas tanto do galho como do fuste, onde foram adicionados 100 ml de NaOH em solução a 1%, sempre os agitando com um bastão de vidro. As amostras foram mantidas em banho-maria, com água em ebulição durante 1 hora e posteriormente transferidas para o cadinho filtrante, com o auxílio da pisseta de água destilada e da bomba de vácuo, mais 50 ml de ácido acético a 10% para neutralizar, assim filtrando as amostras, lavando-as novamente com água destilada. Os cadinhos com as amostras filtradas foram levados a estufa, para serem secos a  $\pm 103^{\circ}\text{C} \pm 2$  até peso constante, resfriados no dessecador e pesados para a obtenção do teor de solubilidade da madeira em NaOH (Equação 8).

$$\text{Sol. NaOH } (\%) = \left( \frac{A-B}{A} \right) \times 100 \quad (8)$$

Onde:

Sol. NaOH (%) = solubilidade NaOH (%);

A = peso seco a partículas antes da solubilização em NaOH (g);

B = peso seco das partículas após a solubilização em NaOH (g).

### 3.4 Propriedades Energéticas da Madeira da madeira de clones de *Eucalyptus*.

#### 3.4.1 Análise química imediata da madeira (AQI)

Para realizar o procedimento de determinação da análise química imediata, conforme a norma NBR 6923 (1981) as amostras de madeira dos clones de *Eucalyptus*, foram triturados e peneirados, e utilizando-se as partículas que passaram em 40 mesh e ficaram retidas na de 60 mesh, em que foram pesadas em cada cadinho 1,2 gramas do material já classificado, e depois secos em estufa a  $\pm 103 \pm 2^\circ\text{C}$  para obtenção do peso seco das partículas.

Para os cálculos dos percentuais de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ) foi utilizada como base a norma NBR 8112 (ABNT 1986). Já a determinação do estoque de carbono e densidade energética por Brand (2010), enquanto o poder calorífico superior seguiram a metodologia proposta por Channiwala *et al.* (2002).

Para a determinação do teor de materiais voláteis, as amostras totalmente secas nos cadinhos foram encaminhadas para a mufla até atingir temperatura até  $850^\circ\text{C}$ , por 7 horas, depois eles foram colocados em dessecador para o resfriamento e pesagem. O teor de materiais voláteis foi calculado de acordo com a Equação 9.

$$\text{MV} = \left( \frac{M1 - M2}{M1 - M3} \right) \times 100 \quad (9)$$

Em que:

MV = teor de materiais voláteis (%);

M1 = massa da amostra seca + cadinho (g);

M2 = massa da amostra após mufla a  $850^\circ\text{C}$  + cadinho (g);

M3 = massa do cadinho sem material (g).

Após as amostras de madeira dos clones de *Eucalyptus* terem sido submetidas à retirada dos materiais voláteis, as mesmas foram encaminhadas novamente para mufla em temperatura de  $700^\circ\text{C}$  por mais 7 horas, para a obtenção do teor de cinzas calculado por meio da Equação 10.

$$CZ = \left( \frac{M4 - M3}{M1 - M3} \right) \times 100 \quad (10)$$

Em que:

CZ = teor de cinzas (%);

M4 = massa de cinzas + cadinho após 7 horas na mufla (g);

M3 = massa do cadinho vazio (g);

M1 = massa da amostra seca + cadinho (g).

Para a determinação do teor de carbono fixo subtraiu-se de 100 os percentuais dos materiais voláteis e das cinzas, conforme a Equação 11.

$$CF = 100 - MV - CZ \quad (11)$$

Em que:

CF = carbono fixo (%);

MV = teor de materiais voláteis (%);

CZ = teor de cinzas (%).

#### 3.4.2 Poder calorífico superior da madeira de clones de *Eucalyptus*.

Para a determinação do poder calorífico superior da madeira foi utilizado o método descrito por Channiwala *et al.* (2002) conforme a Equação 12.

$$PCS = (84,51 \times CF) + (37,26 \times MV) + (1,86 \times CZ) \quad (12)$$

Em que:

PCS = poder calorífico superior da madeira (kcal/kg);

CF = teor de carbono fixo (%);

MV = matérias voláteis (%);

CZ = teor de cinzas (%).

#### 3.4.3 Densidade energética da madeira e Estoque de carbono da madeira dos clones de *Eucalyptus*.

A densidade energética foi determinada de acordo com a metodologia de Brand (2010) pela Equação 13.

$$DeM = Db \times PCS \quad (13)$$

Em que:

DeM = Densidade energética da madeira (kcal/cm<sup>3</sup>);

Db = Densidade básica da madeira (g/cm<sup>3</sup>);

PCS = Poder calorífico superior da madeira (kcal/kg).

O estoque de carbono na madeira foi calculado multiplicando-se o determinado de acordo com a metodologia utilizada por Brand (2010) por meio da Equação 14.

$$EC = DbM \times \left( \frac{C}{100} \right) \quad (14)$$

Em que:

EC = estoque de carbono da madeira (Kg/m<sup>3</sup>);

Db = densidade básica média da madeira (g/cm<sup>3</sup>);

C = teor de carbono elementar na madeira (%).

#### 3.4.4 Análise química elementar da madeira de clones de *Eucalyptus*.

Para calcular os principais elementos presentes na madeira (C, H, O) se utilizou o trabalho de Parikh *et al.* (2007) que determinou as Equações 15, 16 e 17 apresentadas abaixo.

$$C = (0,637 \times CF) + (0,455 \times MV) \quad (15)$$

$$H = (0,052 \times CF) + (0,062 \times MV) \quad (16)$$

$$O = (0,304 \times CF) + (0,476 \times MV) \quad (17)$$

Em que:

C = Carbono (%);

H = Hidrogênio (%);

O = Oxigênio (%);

CF% = Teor de carbono fixo (%);

MV% = Teor de Materiais voláteis (%).

### 3.4.5 Índice de Valor Combustível da madeira de clones de *Eucalyptus*.

O índice de valor combustível (IVC) foi calculado de acordo com a metodologia descrita por Purohit e Nautiyal (1987) por meio da equação 18.

$$IVC = \left( \frac{PCS * Da}{Tc * TU} \right) \quad (18)$$

Em que:

PCS: Poder calorífico superior (Kcal/g);

Da: Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);

Tc: Teor de cinzas (%);

TU: Teor de umidade (%).

### 3.5 Análises estatísticas dos dados

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, onde realizou-se o teste de normalidade e análise de variância (ANOVA). O teste de Tukey para a comparação das médias a nível de 5% de significância foi realizado no programa estatístico RStudio.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios para propriedades físicas e químicas das madeiras de clones de *Eucalyptus* aos 14 anos de idade.

Tabela 1- Propriedades físicas e químicas da madeira de clones de *Eucalyptus* coletados ao norte do Estado de Tocantins

Parâmetros	Clones				Semente	Pr>Fc
	2361	321	1250	1296	E1 ( <i>E. urophylla</i> )	
TU (%)	10,99 a (7,88)	8,09 b (10,36)	5,23 c (0,55)	5,71 c (26,65)	5,99 c (21,45)	*
Db (Kg/m <sup>3</sup> )	557,71 b (8,67)	611,60 a (11,11)	579,93 ab (5,91)	590,13 a (6,57)	574,33 ab (9,90)	*
Extrativos Totais (%)	5,36 b (20,21)	8,04 a (5,21)	5,73 b (6,66)	7,57 a (19,89)	5,98 b (13,68)	*
Lignina total (%)	27,11 ab (4,42)	26,26 b (4,95)	26,93 b (2,61)	27,71 a (3,22)	26,53 b (4,86)	*
Holocelulose (%)	67,52 a (3,20)	65,74 ab (1,94)	67,27 a (1,67)	64,72 b (1,31)	67,42 a (0,85)	*
Solubilidade NaOH (%)	19,33 b (2,83)	33,16 a (9,12)	19,41 b (2,66)	19,07 b (3,59)	19,91 b (4,94)	*

Fonte: Autor, (2024).

Nota: TU: Teor de umidade; Db: Densidade básica. Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (%): Coeficiente de variação. Fonte:

Observa-se pelo teste de Tukey efeito significativo entre da madeira ( $p \geq 0,05$ ) para o teor de umidade da madeira, densidade básica, teor de extrativos totais, lignina total, holocelulose e solubilidade NaOH, respectivamente.

Dentre os materiais genéticos de *Eucalyptus* avaliados, o clone 2361 apresentou o maior teor de umidade médio (10,99%), conforme demonstrado na Tabela 1. A norma COPAM 227 (2018) determina que o teor de umidade da biomassa para queima direta deve ser inferior a 40%.

Os clones 321 (611,60 Kg/m<sup>3</sup>) e 1296 (590,13 Kg/m<sup>3</sup>) demonstraram maior densidade básica da madeira em comparação aos demais, espera-se um potencial superior para a produção de energia (Tabela 1). A densidade básica é uma propriedade diretamente relacionada ao poder calorífico da madeira, sendo um indicador importante para a escolha de clones para fins energéticos. Vale ressaltar que quanto maior a densidade da madeira maior a quantidade de energia calorífica possível de ser liberada por metro cúbico, para um mesmo valor de poder

calorífico. Protásio *et al.* (2015) destacaram que essa característica é de grande relevância, para a classificação de materiais genéticos visando a queima direta da madeira.

Observa-se na Tabela 1 a análise de variância indicou que o efeito clonal foi significativo para os extrativos totais, lignina total e holocelulose.

A análise do teor de lignina total, foi observado uma baixa variabilidade entre os clones de *Eucalyptus*, que se encontram entre 26,26% e 27,71% nos clones avaliados. A lignina é um composto de elevada estabilidade térmica, sendo o principal componente responsável pelo poder calorífico da madeira (BONFATI JUNIOR *et al.*, 2025). Considerando a correlação positiva entre o teor de lignina e o poder calorífico da madeira, podemos afirmar que um maior teor de lignina é vantajoso para a geração de energia. Isso se deve ao fato de que, entre os componentes químicos da madeira, a lignina possui uma natureza estável e contém uma maior quantidade de carbono, o que contribui para a liberação significativa de energia durante a queima direta.

É importa salientar, que a lignina é um dos principais componentes da madeira. E entre suas funções está transportar água e nutrientes, como também em proteger a planta contra ataques de microrganismos, sendo também responsável pela resistência mecânica (MACEDA *et al.*, 2021, SALIBA *et al.*, 2001). Ademais, neste estudo não foi feita análise do efeito da relação da lignina siringil e guiacil nos clones. Porém, na literatura, a relação entre siringil e guiacil é parâmetro importante na caracterização da lignina, já que pode afetar as propriedades tecnológicas da madeira, degradação térmica, permeabilidade e sua suscetibilidade a ataques de agentes microbianos (ARAÚJO *et al.*, 2026, SANTOS *et al.*, 2016).

A quantidade de extrativos totais nas amostras analisadas apresentou uma faixa de variação entre 5,36 a 7,57% (Tabela 1), valores esses que se encontram próximos aos descritos por Castro (2011) e Pereira (2012) em estudos com espécies *Eucalyptus* com idades entre três e sete anos e meio. Em estudo conduzido com *Eucalyptus grandis* em diferentes idades (10, 14, 20 e 25 anos) observou-se variações entre 2,76% e 6,34% (SILVA *et al.*, 2005). Esses números mostram que árvores mais jovens tendem a ter menos extrativos na madeira, enquanto esse conteúdo aumenta à medida que a árvore envelhece e o tecido lenhoso amadurece.

A presença de elevados teores de extrativos, compostos de menor estabilidade térmica, pode comprometer a qualidade da madeira para determinadas aplicações, uma vez que se degradam a baixas temperaturas, reduzindo a estabilidade térmica do material. Por outro lado, a lignina, um composto de maior estabilidade térmica, é desejável em maiores quantidades para garantir a durabilidade e a resistência da madeira.

Portanto, dependendo da natureza química dos extrativos, como os fenólicos, podem favorecer o aumento do poder calorífico e ter um maior rendimento em carbono fixo. O efeito dos extrativos é variável na qualidade energética da madeira, para queima direta (CARNEIRO *et al.*, 2017).

O teor de holocelulose nas amostras variou de 64,72 a 67,52% (Tabela 1), apresentando valores inferiores aos relatados por Protásio *et al.* (2014). A menor resistência e instabilidade intrínseca da holocelulose podem predispor esse componente a processos de degradação mais acentuados. Teores menores de holocelulose favorecem o uso da biomassa para fins energéticos, uma vez que a celulose e as hemiceluloses apresentam maior instabilidade térmica (TAKAHASHI *et al.*, 2021).

Para a queima direta da madeira, uma baixa concentração de holocelulose, um alto teor de lignina e extrativos influenciam significativamente o desempenho da combustão (MASSUQUE; ASSIS; TRUGILHO, 2020), uma vez que os extrativos facilitam a ignição, enquanto a lignina libera mais energia por um período de tempo mais prolongado em comparação com as holoceluloses.

A análise da solubilidade em hidróxido de sódio (Tabela 1) evidenciou diferenças significativas entre os clones, com o clone 321 apresentando maior solubilidade (33,16%) e o clone 1296 com menor solubilidade (19,07%). A solubilidade em NaOH indica a suscetibilidade do material à degradação por ataques de fungos em situações em que a madeira está exposta ao ambiente (REIS *et al.*, 2023). Neste estudo, o clone 321 apresentou uma maior vulnerabilidade à degradação fúngica em comparação aos outros clones. Isso indica que, em relação aos demais, o clone 321 é menos resistente e mais propenso a perdas de massa e de componentes químicos, o que pode impactar significativamente a geração de energia.

Na Tabela 2 é possível observar os resultados obtidos para as propriedades energéticas das madeiras de clones de *Eucalyptus* aos 14 anos de idade.

Tabela 2- Propriedades energéticas da madeira de clones de *Eucalyptus* como alternativa para produção de energia

Parâmetros	Clones				Semente	Pr>Fc
	2361	321	1250	1296	E1 ( <i>E. urophylla</i> )	
MV (%)	88,42 a (1,71)	87,40 b (2,18)	88,12 a (2,02)	85,64 c (1,71)	86,24 bc (1,85)	*
CF (%)	11,42 c (12,93)	12,45 bc (13,52)	11,73 c (14,38)	14,24 a (12,85)	13,59 b (11,26)	*
CZ(%)	0,15 a (46,75)	0,15 a (42,72)	0,16 a (35,36)	0,12 b (24,40)	0,18 a (23,26)	*

C (%)	47,51 c (0,54)	47,70 c (0,66)	47,57 c (0,71)	48,04 a (0,58)	47,89 ab (0,62)	*
H (%)	6,08 a (0,28)	6,07 a (0,35)	6,08 a (0,27)	6,05 a (0,24)	6,05 a (0,25)	ns
O (%)	45,56 a (0,60)	45,39 a (0,74)	45,51a (0,65)	45,09 a (0,57)	45,18 a (0,59)	ns
PCS (Kcal/kg)	4545,32 c (0,61)	4565,77 bc (0,76)	4551,60 c (0,81)	4602,48 a (0,67)	4586,91 b (0,71)	*
De (Kcal/cm <sup>3</sup> )	2535,33 b (6,80)	2791,34 a (5,10)	2639,66 b (5,99)	2745,36 a (1,83)	2633,74 b (10,75)	*
EC (Kg/m <sup>3</sup> )	265,02 c (6,80)	286,58 a (5,15)	275,87 b (4,80)	286,58 a (1,79)	275,87 b (10,76)	*
IVC	9,17 c (44,86)	10,99 b (44,64)	11,43 b (36,69)	14,60 a (21,26)	12,41 ab (21,63)	*

Fonte: Autor, (2024).

Nota: MV: Teor de materiais voláteis; CF: Teor de carbono fixo; CZ: Teor de cinzas; C, H e O: Carbono, Hidrogênio e Oxigênio (Análise química Elemental estimada); PCS: Poder calorífico superior; De: Densidade energética; EC: Estoque de carbono; IVC: Índice de valor combustível. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente (Teste de Tukey -  $P \geq 0,05$ ). Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%), respectivamente.

A análise química imediata dos clones de *Eucalyptus* apresentou teores de materiais voláteis entre 86,24% e 88,42%, carbono fixo entre 11,42% e 14,60%, e cinzas entre 0,12% e 0,18%. A composição elementar apresentou variações mínimas, com teores de carbono entre 47,51% e 48,04%, hidrogênio entre 6,05% e 6,08%, e oxigênio entre 45,09% e 45,56% (Tabela 2).

A análise de variância indicou que o efeito clonal foi significativo somente para o teor de matérias voláteis e carbono fixo, enquanto o teor de cinzas não apresentou diferenças significativas estatisticamente (Tabela 2). Provavelmente esse fato é devido à baixa variabilidade observada para a composição química molecular, principalmente para os teores de extrativos, lignina total e holocelulose. É possível notar, a partir dos resultados obtidos, que quanto maior o teor de carbono fixo, menor é o valor de materiais voláteis, ou vice-versa, uma vez que estão diretamente relacionados. Esse comportamento é evidenciado de forma mais clara no clone 2361, que apresentou um teor elevado de materiais voláteis e um teor reduzido de carbono fixo.

Os resultados obtidos para o teor de materiais voláteis neste estudo estão em concordância com os encontrados por Silva *et al.* (2024), que reportaram um valor médio de 85,03% para o clone de *E. urophylla* x *E. grandis*. A elevada concentração de voláteis na biomassa favorece a ignição e a combustão, porém dificulta o controle do processo, como

observado em estudos anteriores (CARNEIRO *et al.*, 2014; PROTÁSIO *et al.*, 2014; JESUS *et al.*, 2017).

Os valores de coeficientes de variação apresentaram uma menor dispersão dos dados para os teores de materiais voláteis (1,71%), indicando maior homogeneidade entre os clones em relação a essa propriedade. Por outro lado, os teores de carbono fixo e de cinzas apresentaram coeficientes de variação significativamente maiores (11,26% e 23,26%, respectivamente), evidenciando uma maior variabilidade entre os clones e sugerindo a influência de fatores genéticos e/ou ambientais sobre essas propriedades.

Para a geração de energia, um alto teor de materiais voláteis e oxigênio elementar faz com que a madeira seja consumida mais rapidamente, resultando, assim, em um menor tempo e produção de energia, enquanto o carbono fixo e elementar prolonga a geração de energia e contribui para um maior poder calorífico (SARAIVA *et al.*, 2025). Esse comportamento pode ser observado no clone 2361, que apresentou um baixo poder calorífico superior, devido ao seu maior teor de materiais voláteis e oxigênio elementar, além de um menor teor de carbono fixo e elementar em comparação aos demais clones.

Os valores médios da composição elementar da madeira dos diferentes clones apresentaram efeito clonal significativo para o Carbono, Hidrogênio e oxigênio (Tabela 2). Os teores de Carbono observados no presente estudo são semelhantes aos observados por Protásio *et al.* (2014), que analisando a química elementar da madeira de *Eucalyptus benthamii*, observaram valor médio de carbono de 46,68%. Semelhante também ao valor médio para *E. urophylla* (46,76%) observado por Reis *et al.* (2012). Corroborando com Silva *et al.* (2024) para *E. urophylla* x *E. grandis* com valor médio de 48,20% para o Carbono.

Para fins de geração de energia por combustão ou pirólise, espécies madeireiras com maior teor de carbono e hidrogênio elementar são preferencialmente utilizadas, visto que são os principais elementos responsáveis pela geração de energia (TAKAHASHI *et al.*, 2021). A oxidação exotérmica desses elementos durante a combustão, resultando na formação de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, contribui significativamente para o aumento do poder calorífico do material (CARNEIRO *et al.*, 2017).

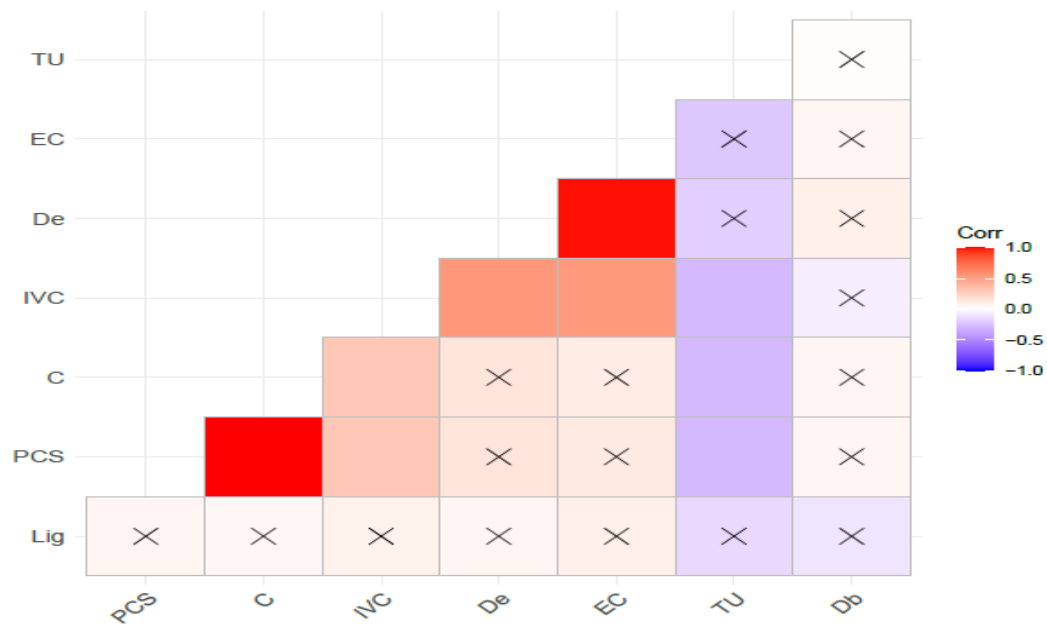
O oxigênio apresenta valor recomendando conforme a literatura para a madeira dos clones avaliados nesta pesquisa (Tabela 2). As pesquisas demonstram que para madeiras de espécies do gênero *Eucalyptus*, a composição química elementar da madeira, em base seca, é de aproximadamente 48% de carbono, 6% de hidrogênio e 45% de oxigênio (PROTÁSIO *et al.*, 2014; PROTÁSIO *et al.*, 2015). Segundo Carneiro *et al.*, (2017) baixos teores de oxigênio

são desejáveis do ponto de vista energético, pois estes elementos interferem negativamente no poder calorífico da biomassa.

Os valores médios obtidos para o poder calorífico superior da madeira dos clones avaliados nesta pesquisa encontram-se próximos aos valores observados para diferentes clones de *Eucalyptus* destinados ao uso energético, que variaram de 4538 a 4867 kcal/kg (BRAND, 2010; SANTOS *et al.*, 2016).

Por meio da análise dos dados observou-se um efeito clonal significativo sobre as propriedades energéticas da madeira. O poder calorífico superior (PCS), um indicador da quantidade de energia liberada pela combustão da madeira, variou significativamente entre os clones estudados. O clone 1296 apresentou o maior valor médio de PCS (4602,48 kcal/kg), indicando um maior potencial energético em comparação aos demais clones. Por outro lado, o clone 2361 apresentou o menor valor médio de PCS (4545,32 kcal/kg). O índice de valor combustível (IVC), que relaciona o poder calorífico superior com o teor de umidade da madeira, também mostrou variação significativa entre os clones, com o clone 1296 apresentando o maior valor médio (14,60) e o clone 2361 o menor (9,17). Esses resultados sugerem que o clone 1296 possui características mais adequadas para fins energéticos, apresentando maior potencial de produção de energia por unidade de massa.

Figura 4- Gráfico da correlação de Pearson entre as variáveis principais referentes as propriedades energéticas da madeira de clones de *Eucalyptus*.



Fonte: Autor, (2024).

A variação do índice de valor combustível (IVC) pode ser explicada pela relação direta dessa variável com o poder calorífico superior, a densidade básica e o teor de cinzas. O clone 1296, com maior poder calorífico superior e densidade básica e menor teor de cinzas, apresentou o maior IVC (Tabela 1), corroborando a literatura (MAYER *et al.*, 2020). Esses resultados indicam que o clone 1296 possui as características mais adequadas para a obtenção de energia.

Na Figura 4 é possível observar as correlações entre as variáveis analisadas. Nota-se que houve forte correlação diretamente proporcionais entre o poder calorífico superior (PCS) e o carbono elementar (C) e entre a densidade energética (De) e o estoque de carbono (EC). Já para o índice de valor combustível houve correlação média e diretamente proporcionais com as variáveis densidade energética e estoque de carbono. De acordo com Soares *et al.*, (2014) correlação positiva entre o poder calorífico superior (PCS) e a relação C/H, pode-se inferir que o aumento da relação C/H está diretamente ligado à maior aromaticidade do material e, portanto, à maior quantidade de ligações C = C, respectivamente.

Em relação a correlação do índice de valor combustível (Figura 4) com os parâmetros de densidade energética e estoque de carbono pode ser explicada pelo dessa variável encontrar-se diretamente relacionada para sua determinação. Segundo Meyer *et al.*, (2020) o índice de valor combustível apresenta influência da densidade energética e do estoque de carbono.

Considerando os resultados apresentados, observa-se a relevância de pesquisas voltadas ao melhoramento genético de espécies florestais, uma vez que características como densidade energética, composição elementar e capacidade de estocagem de carbono apresentam impacto direto sobre o desempenho energético da madeira. Evidencia-se que a falta de políticas públicas e de recursos destinados ao melhoramento genético florestal configura-se como um dos principais obstáculos ao avanço científico e produtivo no estado do Tocantins (DUARTE; COLLICCHIO, 2020). Nesse cenário, o projeto de pesquisa e extensão iniciado em 2024, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPGCFA) e coordenado pelo Prof. Dr. Cristiano Bueno de Moraes, surge como uma iniciativa de grande relevância. A proposta, voltada à conservação, domesticação e produção de espécies de *Eucalyptus* resistentes à seca severa, busca não apenas impulsionar o setor florestal regional, mas também fornecer material genético inovador, como sementes melhoradas e clones adaptados às condições edafoclimáticas locais.

Nesse contexto, recomenda-se que os órgãos governamentais estaduais e federais ampliem os incentivos e mecanismos de fomento à pesquisa, de modo a consolidar programas permanentes de melhoramento genético florestal. Tais ações, aliadas ao trabalho de instituições

de ensino e pesquisa, são fundamentais para garantir não apenas o fornecimento de material genético adaptado às condições edafoclimáticas do estado, mas também para estimular o desenvolvimento socioeconômico sustentável e competitivo do setor florestal no Tocantins e em outras regiões com características semelhantes.

## 6 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. A variabilidade genética exerce influência significativa sobre as características físico-químicas e energéticas da madeira dos clones estudados;
2. O clone 1296 destacou-se como o material genético com maior potencial para fins energéticos, apresentando os maiores valores médios para densidade básica, teor de lignina, teor de carbono fixo e poder calorífico superior;
3. Os demais clones avaliados também apresentaram características promissoras para a produção energética, indicando a viabilidade do uso de todos os materiais genéticos estudados como fonte de biomassa para geração de bioenergia.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, D. H.. **Potencial de uso da Biomassa Florestal na geração de energia térmica e elétrica pela indústria do Estado do Rio De Janeiro**. 2019. 111f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D- 2395**: standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Philadelphia, 2005. 8 p
- ARAÚJO, A. C. C. de; TRUGILHO, P. F; NAPOLI, A; BRAGA, P. P. de C.; LIMA, R.V. de; PROTÁSIO, T. de P. Efeito da relaçãoiringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus spp. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 110, n. 110, p. 405-414, jun. 2016. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n110.13>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6923**: Carvão Vegetal - Amostragem e Preparação da Amostra. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT Editora, 1986.
- BEN-IWO, J.; MANOVIC, V.; LONGHURST, P. Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 63, p. 172–192, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.050>
- BILGEN, S.; KELEŞ, S.; SARIKAYA, İ.; KAYGUSUZ, K. A perspective for potential and technology of bioenergy in Turkey: Present case and future view. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 228–239, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.096>
- BOFF, G. B.; OURIQUES, H. R. Energia e hegemonia dos Estados Unidos: uma análise do petróleo e do gás de xisto a partir da perspectiva dos sistemas-mundo. **Colombia Internacional**, n. 96, p. 149-176, 2018.<https://doi.org/10.7440/colombiaint96.2018.06>
- BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E. P.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365-2378, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.075>
- BORGES, A.C. P.; SILVA, M. S., ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE-Revista Eletrônica do Prodema**, v. 10, n. 2, 2017. <https://doi.org/10.22411/rede2016.1002.02>
- BONFATTI JÚNIOR, E. A; OLIVEIRA, R. S; LENGOWSKI, E. C; ANDRADE, A. S.de; SILVA, D. A. da. Correlation between the heating value and the chemical characteristics of Eucalyptus biomass. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 55, n. 4, e20240100. 2025. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20240100>.
- BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; DE FREIAS FIALHO, L.; DA SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), v. 8, n. 3, p. 127-135, 2017. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135>

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, O. R. V; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R.. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos, **Revista Árvore**- Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p.375-381, 2014.

CASTRO, A.F.N.M. Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal. 2011. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CHANNIWALA, S.A.; PARIKH, P.P. A Unified Correlation for Estimating HHV of Solid, Liquid and Gaseous Fuels. **Combustível**, v. 81, n. 8, p. 1051-1063, mai. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)

CHANDORKAR, N; TAMBE, S; AMIN, P; MADANKAR, C. A systematic and comprehensive review on current understanding of the pharmacological actions, molecular mechanisms, and clinical implications of the genus *Eucalyptus*. *Phytomedicine Plus*, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 100089, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100089>

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação Normativa COPAM, nº 227, de 29 de agosto de 2018. Estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências. **Diário do executivo**, Minas Gerais, Brasil. Disponível em: <<https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=46681> >. Acesso em: Abr. 2024.

CRISP, M. D.; MINH, B. Q.; CHOI, B.; EDWARDS, R. D.; HERWARD, J.; KULHEIM, C.; LIN, Y. P.; MEUSEMANN, K.; THORNHILL, A. H.; TOON, A.; COOK, L. G. Perianth evolution and implications for generic delimitation in the eucalypts (*Myrtaceae*), including the description of the new genus, *Blakella*. **Journal of Systematics and Evolution**, v. 00, p 1-21, 2024. <https://doi.org/10.1111/jse.13047>.

DANTAS, G. A. CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; ROSENAL, R.; LAFRANQUE, A. Prospects for the Brazilian electricity sector in the 2030s: scenarios and guidelines for its transformation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 997-1007, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.003>

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; BRAND, M. A.; LOPES, G. P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1291-1302, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.039>

DUARTE, F. A.; COLLICCHIO, E. Desafios e perspectivas do cultivo do *Eucalyptus*, para fins energéticos no estado do Tocantins. **Revista Liberato**, [S. l.], v. 21, n. 35, p. 15–26, 2020. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/636>. Acesso em: 2 jul. 2025

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. - EPE (Brasil). **Balço Energético Nacional (BEN) 2025: ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. p. 315. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final\\_BEN%202025.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf). Acesso em: 24 de junho de 2024.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>

FRIGOTTO, T., NAVROSKI, M. C., AGUIAR, N. S., FELIPPE, D., BORSOI, G. A., PEREIRA, M. O., & LOVATEL, Q. C. (2020). Desempenho de espécies e procedências de *Eucalyptus* no Planalto Norte Catarinense, Brasil. **Scientia Forestalis**, 48(127), e3273. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.14>

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. *Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação. IPEF, Piracicaba, 2016, p 448.

FURLAN, R.A.; MORAES, C.B.; TAMBARUSSI, E.V. GENETIC PARAMETERS OF *Eucalyptus* spp. CLONES IN NORTHEASTERN BRAZIL. **Floresta**, v. 50, n. 2, p. 1267-1278, 2020. <https://doi.org/10.5380/ufv.v50i2.62524>

FOELKEL, C. **Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade**. 2016. Disponível em: <[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44\\_Geracao\\_Calor\\_Vapor\\_Eletricidade.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44_Geracao_Calor_Vapor_Eletricidade.pdf)>. Acesso em: 29 de maio de 2024.

GONÇALEZ, J. C; SANTOS, G. L. dos; SILVA JUNIOR, F. G. da; MARTINS, I. S; COSTA, J. de A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestali**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, mar. 2014. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr101/cap08.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

GOLDEMBERG, J. Current and prospects in the use of biomass for energy generation. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 15-28, 2017.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C. B.; SEBBENN, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 45, p. 119-128, 2017. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n113.11>

HERBERT, G. M. J.; KRISHNAN, A. U. Quantifying environmental performance of biomass energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 292-308, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2020**. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2019. 66p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 24 de maio de 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2024**. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2023. 99p. Disponível em: < <https://iba.org/relatorio2024.pdf>>. Acesso em: 02 de julho de 2025.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.

JÚNIOR, A. F. D.; LANA, A. Q.; BERNARDES, F. F.; BRITO, J. O. Madeira, energia e geração de termoeletricidade. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 2, p. 157-163, 2017.

KAMMEN, D. M.; SUNTER, D. A.. City-integrated renewable energy for urban sustainability. **Science**, [S.L.], v. 352, n. 6288, p. 922-928, 20 maio 2016. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad9302>.

KIM, S. J.; BAKER, J. S.; SOHNGEN, B. L.; SHELL, M. Cumulative global forest carbon implications of regional bioenergy expansion policies. **Resource and Energy Economics**, v. 53, p. 198-219, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2018.04.003>

LOPES, E. D.; GONÇALVES, J. F.; DE SOUZA MARTINS, N.; PENA, C. A. A.; COELHO, D. A. F.; LAIA, M. L. Potencial energético da madeira de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes espaçamentos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 17, n. 3, p. 1278-1278, 2022. <https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a1278>

MACEDA, A; SOTO-HERNÁNDEZ, Marcos; PEÑA-VALDIVIA, C.; TREJO, C; TERRAZAS, T. Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*. Lignina: composición, síntesis y evolución. **Madera bosques**, Xalapa, v.27, n. 2, p. 657-669, 2021. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>.

MAHESH, A.; SHOBA JASMIN, K. S. Role of renewable energy investment in India: an alternative to CO2 mitigation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 414-424, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.069>

MASSUQUE, J.; ASSIS, P.; TRUGILHO, P. Characterization of Miombo species used by rural communities as fuelwood in Northern Mozambique. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, Philadelphia*, v. 42, n. 23, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1815910>

MAYER, S. L. S.; OLIVEIRA, R. S.; FERRAZ, F. A.; SILVA, I. C.; SILVA, D. A. Avaliação tecnológica da biomassa residual de pupunheira para a produção de bioenergia. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 4, p. 549-561, 2020. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n4p549-561>

MARCHESAN, R.; DE OLIVEIRA, D. N.; SILVA, R. C.; CARVALHO, L. A.; GOMES, R. T.; ALMEIDA, V. C. Quality of charcoal from three species of the *Eucalyptus* AND THE *Corymbia citriodora* species planted in the south of Tocantins. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 50, n. 3, p. 1643 -1652, 2020.

MATZENBERGER, J.; KRANZL, L.; TROMBORG, E.; JUNGINGER, M.; DAIIOGLOU, V.; GOH, C. S.; KERAMIDAS, K. Future perspectives of international bioenergy trade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 926–941, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.106>

MORAES, C.B.; FREITAS, T.C.M.; PIERONI, G.B.; ZIMBACK, L.; RESENDE, M.D.V.; MORI, E.S. Estimativas dos parâmetros genéticos para seleção precoce de clones de *Eucalyptus* para região com ocorrência de geadas. **Scientia Forestalis**, 42(102):219-227, 2014.

MORAES, W.; DIONISIO, L.F.S.; SCHWARTZ, G.; PEREIRA, J.A.; DAMASCENA, J.F.; RIZZO, F.A.; BRASIL NETO, A.B.; MILHOMEM, C.A.; ALVES, J.M.A.; ARAÚJO FILHO, R.N.; SARMENTO, R.A.; SILVA, A.; MORAES, C.B. Carbon and nitrogen, humic and labile fractions in soil under clonal *Eucalyptus* stands from cerrado. **European Journal of Forest Research**. v.143 p. 971-984, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01669-x>

NICOLLE, D. Classification of the eucalypts (*Angophora*, *Corymbia* and *Eucalyptus*) Version 6. 2022. <http://www.dn.com.au/Classification-Of-The-Eucalypts.pdf>

OLIVEIRA, N. M. de; PIFFER, M. Conjuntura do desenvolvimento regional dos municípios do estado do Tocantins. *Drd – Desenvolvimento Regional em Debate*, **Canoinhas**, v. 6, n. 3, p. 32-61, nov. 2016 <http://hdl.handle.net/11612/2583> . Acesso em: 03 de julho de 2025.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A. correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1710-1719, 2007.

PEYERL, Dr.; NETTO, A. L. A.; SANTOS, E. M. Introductory remarks on the opportunities and challenges of natural gas and liquefied natural gas in Brazil. **Opportunities and challenges of natural gas and liquefied natural gas in Brazil**, p. 11-36, 2020.

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; JUNIOR, J. B. G.; DE LIMA JUNIOR, P. H.; SILVA, M. M. O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 801-816, 2015.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; DE SOUZA BRITES, L. M. R. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

PUROHIT, N.; NAUTIYAL, A. R. (1987) Fuelwood value index of indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal*, 1987.p.177-182, DOI: <https://10.1080/01435698.1987.9752821>.

REIS, L. B. D. **Geração de energia elétrica**. 2ª. Ed. Barueri, Sp: Manole, 2011.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

REIS, G. D. M. F.; MARCHESAN, R.; SARAIVA, K. F.; DA SILVA, R. C.; COLARES, C. J. G.; DE MORAES, C. B.; MORAES, C. B.; OLIVEIRA, G. G.; DE 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.

RIBEIRO, G. B. D.; ISBAEX, C.; VALVERDE, S. R. Produção de biomassa florestal para energia em sistemas agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 605-618, 2017.

RIBEIRO, G. B. D. & VALVERDE, S. R. Breve elucidación sobre os leilões de energia e o potencial da biomassa florestal. **Revista Madeira**, Palmas, p. 43-45, 2016.

RODRÍGUEZ-MONROY, C.; MÁRMOL-ACITORES, G.; NILSSON-CIFUENTES, G. Electricity generation in Chile using non-conventional renewable energy sources – A focus on biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 937–945, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.059>

SALIBA, Eloísa de Oliveira Simões; RODRIGUEZ, Norberto Mário; MORAIS, Sérgio Antônio Lemos de; PILÓ-VELOSO, Dorila. Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 917-928, out. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782001000500031>

SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B., TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SARAIVA, K. F.; MARCHESAN, R.; MORAES, T. P. E. de; REIS, G. de M. F.; LIMA, V. O. de; PRISCILA BEZERRA DE SOUZA, P. B. de. Influence of time exposure to soil on the properties of wood and charcoal from *Myracrodruon urundeuva* fr. all. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 55, e-94753, 2025. <https://doi.org/10.5380/ufpr.v55i1.94753>

SEARCHINGER, T. D.; BERINGER, T.; STRONG, A. Does the world have low-carbon bioenergy potential from the dedicated use of land? **Energy Policy**, v. 110, p. 434-446, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.016>

SETTE Jr, C. R., HANSTED, A. L. S., NOVAES, E., e LIMA, P. A. F., RODRIGUES, A. C., SANTOS, D. R. DE S., & YAMAJI, F. M. (2018). Energy enhancement of the eucalyptus bark

by briquette production. *Industrial crops and products*, 122, 209-213.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>

SILVA, R. C.; SILVA, G. C. R., MARCHESAN, R., SOUZA, P. B., COLARES, C. J. G., REIS, G. D. M. F., FERRAZ, F. A.; SILVA, D. A. Energy potential of *Eucalyptus* spp. Clone biomass. in the northern region of the legal Amazon. **Observatório de La Economía Latino Americana**, v. 22, n. 3, p. 3958-3958, 2024.

SILVA, R. C., MARCHESAN, R., MENDES, G. A.; CARVALHO, L. A.; SANTOS, W. M. F. L.; SOUZA, P. B. Effect of the final carbonization temperature on the quality of five species of cerrado. **Floresta**, v. 50, n. 4, p. 1902-1911, 2020.

SILVA, R. C.; MARCHESAN, R.; FONSECA, M. R.; DIAS, A. C. C.; VIANA, L. C. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 2018. v. 38. p. 1-10, dez. 2018.  
<https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801573>

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; FIGUEIRÓ, C. G.; DE FREITAS FIALHO, L.; DE MAGALHÃES, M. A.; CÂNDIDO, W. L. Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2426–2432, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.095>

SILVA, J. de C.; MATOS, J. L. M. de; OLIVEIRA, J. T. da S.; EVANGELISTA, W. V. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 455-460, jun. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622005000300013>.

SILVA, S. P. da; COSTA, A. S. V. da; SANTOS, S. L. B. dos; LAIA, M. L. de. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 557-583, abr. 2021. Disponível em: <https://pensaracademico.unifacig.edu.br/index.php/pensaracademico/article/view/2306/0>. Acesso em: 25 jun. 2025

SOUZA, A. C.; NUNES, M. P. M.; VISSOCI, P. H. S. O Problema da Acessibilidade e o Furto de Energia Elétrica. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 2, n. 1, 2022.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

TAKAHASHI, V. M.; FERREIRA, V. R. D. S.; CADEMARTORI, P. H. G. D.; CARNEIRO, M. E.; SILVA, D. A. D. Qualidade energética de resíduos madeireiros paricá e pinus. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 36, n. 2, p. 230-238, 2021.  
<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2021v36n2p230-238>

TEIXEIRA, R. L. B. C.; SILVA, W. A. Energia de fontes renováveis na matriz energética brasileira: uma revisão sobre o panorama atual e perspectivas futuras. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 20, p. 1515-1532, 2021.

TIMKO, J.; LE BILLON, P.; ZERRIFFI, H., HONEY-ROSÉS, J., DE LA ROCHE, I., GASTON, C.; KOZAK, R. A. A policy nexus approach to forests and the SDGs: tradeoffs and synergies. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 34, p. 7–12, 2018.

TORRES, P. M. D. A.; PAES, J. B.; NASCIMENTO, J. W. B. D.; BRITO, F. M. S. Caracterização Físico-Mecânica da Madeira Jovem de *Eucalyptus camaldulensis* para Aplicação na Arquitetura Rural. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 1, p. 109–117, 2016.

VECHI, A.; JÚNIOR, C. A. O. M. Aspectos positivos e negativos da cultura do eucalipto e os efeitos ambientais do seu cultivo. **Revista Valore**, v. 3, n. 1, p. 495-507, 2018.

VIEIRA, A. C. F. Energias renováveis e sua eficiência na nova economia energética no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 18, p. 211-223, 2021.

VIEIRA, R. D. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. D. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Revista Cerne**, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.

WASTOWSKI, A. D. **Química da madeira**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2018. 566p.

WIT, M.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A. Learning in dedicated wood production systems: Past trends, future outlook and implications for bioenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 417–432, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.038>

YEO, J.Y.; CHIN, B.L.F.; TAN, J.K.; LOH, Y.S. Comparative studies on the pyrolysis of cellulose, hemicellulose, and lignin based on combined kinetics. **Journal of the Energy Institute**, v. 92, p. 27–37, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.12.003>

## ANEXO- ANÁLISE ESTATÍSTICA

---

### Quadro da análise de variância DB

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	31751	7937.8	3.1534	0.017602
Resíduo	95	239133	2517.2		
Total	99	270884			

---

CV = 8.61 %

---

### Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.01150746

ATENCAO: a 5% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais!

---

### Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.05690992

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---

### Teste de Tukey

---

#### Grupos Tratamentos Medias

a	321	611.6013
ab	1296	590.1309
ab	1250	579.9364
ab	1	574.3336
b	2361	557.8114

---



---

### Quadro da análise de variância de TU

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	136.650	34.163	37.303	3.3819e-10
Resíduo	25	22.895	0.916		
Total	29	159.545			

---

CV = 13.29 %

---

### Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.251641

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 1.530294e-05

ATENCAO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas!

---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	2361	10.99534
b	321	8.093333
c	1	5.989057
c	1296	5.708333
c	1250	5.229989

---

Quadro da análise de variância Extrativos

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	34.108	8.5270	10.844	3.0817e-05
Resíduo	25	19.658	0.7863		
Total	29	53.766			

---

CV = 13.56 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.09003883

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.0681736

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	321	8.042947
a	1296	7.57296
b	1	5.977189

b 1250 5.732393  
 b 2361 5.361083

---



---

Quadro da análise de variância da Lignina

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	7.496	1.8740	1.5132	0.22861
Resíduo	25	30.961	1.2384		
Total	29	38.457			

---

CV = 4.14 %

---



---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.1634755

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---



---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.5873213

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---

De acordo com o teste F, as medias não podem ser consideradas diferentes.

---

Níveis	Medias
1	1 26.52609
2	1250 26.92969
3	1296 27.70722
4	2361 27.10796
5	321 26.25662

---



---

Quadro da análise de variância da Holocelulose

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	37.327	9.3317	5.3886	0.0028604
Resíduo	25	43.293	1.7317		
Total	29	80.620			

---

CV = 1.98 %

-----  
 Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.9636223

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

-----

-----  
 Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.06392567

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

-----

Teste de Tukey

-----

Grupos Tratamentos Medias

a	2361	67.52172
a	1	67.41957
a	1250	67.26914
ab	321	65.74049
b	1296	64.71982

-----

-----  
 Quadro da análise de variância da Solubilidade em NaOH

-----

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1198.44	299.610	267.17	4.067e-20
Resíduo	25	28.04	1.121		
Total	29	1226.48			

-----

CV = 5 %

-----

-----  
 Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.3754333

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

-----

-----  
 Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.03180696

ATENCAO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas.

-----

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias		
a	321	33.16483
b	1	19.90878
b	1250	19.40934
b	1296	19.07264
c	2361	14.33079

---



---

Quadro da análise de variância MV%

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	69.126	17.2814	6.3097	0.0002978
Residuo	55	150.638	2.7389		
Total	59	219.763			

---

CV = 1.9 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.4692814

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---



---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.9327127

De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---



---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	2361	88.42536
ab	1250	88.12466
abc	321	87.39829
bc	1	86.23463
c	1296	85.63823

---

Quadro da análise de variância Carbono fixo

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	69.329	17.332	6.3675	0.00027669
Resíduo	55	149.710	2.722		
Total	59	219.039			

---

CV = 13 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.4587231

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.9333366

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

---

a	1296	14.23792
ab	1	13.58815
abc	321	12.45313
bc	1250	11.73072
c	2361	11.4257

---

Quadro da análise de variância das Cinzas

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	0.01752	0.0043800	1.4011	0.24575
Resíduo	55	0.17194	0.0031261		
Total	59	0.18946			

-----

CV = 37.05 %

-----

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.00308157

ATENCAO: a 5% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais!

-----

-----

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.01436019

ATENCAO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas!

-----

De acordo com o teste F, as medias nao podem ser consideradas diferentes.

-----

Niveis	Medias
1	1 0.1772264
2	1250 0.1559983
3	1296 0.1238455
4	2361 0.1489398
5	321 0.1486339

-----

-----

Quadro da análise de variância do PCS

-----

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	27671	6917.7	6.4657	0.00024428
Resíduo	55	58845	1069.9		
Total	59	86516			

-----

CV = 0.72 %

-----

-----

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.593794

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

-----

-----

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.9010463

De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

-----

-----

Teste de Tukey

-----

Grupos Tratamentos Medias

a	1296	4602.485
ab	1	4586.912
abc	321	4565.768
bc	1250	4551.601
c	2361	4545.321

-----

-----

Quadro da análise de variância de PCI

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	27671	6917.7	6.4657	0.00024428
Resíduo	55	58845	1069.9		
Total	59	86516			

---

CV = 0.77 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.593794

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.9010463

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogênea.

---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	1296	4278.485
ab	1	4262.912
abc	321	4241.768
bc	1250	4227.601
c	2361	4221.321

---

---

Quadro da análise de variância de H

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	0.0068627	0.00171567	5.8678	0.00052531
Residuo	55	0.0160813	0.00029239		
Total	59	0.0229439			

---

CV = 0.28 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.7179191

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.7651738

De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---

Teste de Tukey H

---

Grupos Tratamentos Medias

a	2361	6.076509
a	1250	6.073727
ab	321	6.066257
b	1	6.053131
b	1296	6.049942

---

Quadro da análise de variância de O

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	2.0369	0.50922	6.184	0.00034966
Resíduo	55	4.5290	0.08235		
Total	59	6.5659			

---

CV = 0.63 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.673638

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---



---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.910541

De acordo com o teste de bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---



---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	2361	45.56388
a	1250	45.51348
ab	321	45.38734
b	1	45.17848
b	1296	45.09213

---

---

Quadro da análise de variância

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	2.3184	0.57959	6.4657	0.00024428
Resíduo	55	4.9302	0.08964		
Total	59	7.2486			

---

CV = 0.63 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.593794

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.9010463

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	1296	48.03495
ab	1	47.8924
abc	321	47.69886
bc	1250	47.56919

c 2361 47.51171

---



---

Quadro da análise de variância de DE

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	489221	122305	3.7051	0.0096682
Resíduo	55	1815548	33010		
Total	59	2304769			

---

CV = 6.81 %

---

Teste CV = 6.81 %

de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 1.801214e-05

ATENCAO: a 5% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais

---



---

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 1.81647e-05

ATENCAO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas

---

Teste de Tukey

---

Grupos Tratamentos Medias

a	321	2791.34
a	1296	2745.357
ab	1250	2639.662
ab	1	2633.739
b	2361	2535.333

---



---

Quadro da análise de variância IVC

---

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	3939.6	984.89	2.9144	0.029391
Resíduo	55	18586.3	337.93		
Total	59	22525.9			

---

CV = 6.62 %

---

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 1.857547e-05

ATENCAO: a 5% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais!

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 7.675856e-06

ATENCAO: a 5% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

a	321	286.5802
a	1296	286.5315
ab	1250	275.8732
ab	1	275
b	2361	265.0167

Quadro da análise de variância IVC

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	190.22	47.555	2.9811	0.026747
Resíduo	55	877.38	15.952		
Total	59	1067.60			

CV = 34.08 %

Teste de normalidade dos resíduos ( Shapiro-Wilk )

Valor-p: 0.2867667

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variância

valor-p: 0.1012584

De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas.

Teste de Tukey

Grupos Tratamentos Medias

a	1296	14.59644
---	------	----------

ab	1	12.4111
ab	1250	11.43351
ab	321	10.98958
b	2361	9.173513

---