



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**JONATHAN CHAVES DE LEMOS**

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE**  
***Schizolobium parahyba* VAR. *Amazonicum* CULTIVADO EM SISTEMA**  
**SILVIPASTORIL E INDICAÇÕES DE USO**

**BELÉM**  
**2026**

**JONATHAN CHAVES DE LEMOS**

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE  
*Schizolobium parahyba* VAR. *Amazonicum* CULTIVADO EM SISTEMA  
SILVIPASTORIL E INDICAÇÕES DE USO**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção e título de Mestre.

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Bufalino

**BELÉM  
2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L555c Lemos, Jonathan Chaves de  
CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE *Schizolobium parahyba* VAR. *Amazonicum* CULTIVADO EM SISTEMA SILVIPASTORIL E INDICAÇÕES DE USO / Jonathan Chaves de Lemos. - 2026.  
64 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2026.  
Orientador: Prof. Dr. Lina Bufalino

1. Paricá. 2. Sistemas agroflorestais. 3. Combustão. 4. Carbonização. I. Bufalino, Lina, *orient.* II. Título

---

CDD 621.042


**JONATHAN CHAVES DE LEMOS**

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE  
*Schizolobium parahyba* VAR. *Amazonicum* CULTIVADO EM SISTEMA  
SILVIPASTORIL E INDICAÇÕES DE USO**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção e título de Mestre.


Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lina Bufalino

**BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente  
 LINA BUFALINO  
Data: 13/04/2026 15:59:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Lina Bufalino - Presidente  
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 MARCELA GOMES DA SILVA  
Data: 10/04/2026 13:57:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Marcela Gomas da Silva  
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA  
1º Examinador

Documento assinado digitalmente  
 JOABEL RAABE  
Data: 08/04/2026 08:48:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>o</sup> Dr. Joabel Raabe  
2º Examinador (a)  
Universidade Federal do Piauí – UFPI

Documento assinado digitalmente  
 JOAO RODRIGO COIMBRA NOBRE  
Data: 09/04/2026 09:52:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof.<sup>o</sup> Dr. João Rodrigo Coimbra Nobre  
3º Examinador (a)  
Universidade do Estado do Pará - UEPA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço todo o apoio, indefinidamente, seja ele divino, carnal, presencial, remoto, e esse embaralhado todo de conceitos. Agradeço à minha família: meu pai, minha mãe e minha irmã; aos meus amigos mais íntimos: Thais, Jeymmy e Otávio; à minha orientadora, Lina Bufalino, que em momento algum me fez sentir desesperado, mesmo quando as coisas davam errado. Agradeço ao AmazonChar, meu grupo de pesquisa; eu me diverti muito nas palestras, confrás, conversas e até nos nossos momentos de tédio, em especial à Laís, à Suellen e ao Cris.

Eu poderia ficar citando um por um, mas corro o risco de esquecer um nome ou outro; então, se você parou para ler: obrigado!

“Se você não correr riscos, não pode criar um futuro.” — Monkey D. Luffy

## RESUMO

O *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, conhecido como paricá, é uma espécie florestal nativa da Amazônia, amplamente cultivada em sistemas agroflorestais devido ao seu rápido crescimento e ao potencial de produção de biomassa. Avaliar a qualidade energética da madeira e do carvão vegetal de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* cultivado em diferentes estratos silviculturais, bem como o diâmetro adequado para o aproveitamento energético dos resíduos, visando sua utilização em processos de combustão e carbonização. Foram realizadas análises de densidade básica, composição química (molecular e imediata), poder calorífico, densidade energética e análise termogravimétrica da madeira, além da carbonização controlada de amostras com diâmetro superior a 10 cm para determinação dos rendimentos gravimétricos e caracterização do carvão vegetal. A densidade básica média da madeira foi de 314,50 kg.m<sup>-3</sup>, não apresentando diferença estatística significativa entre os estratos. O teor médio de extrativos totais foi de 3,82%, com diferença estatisticamente significativa entre os estratos 1 e 3. Os teores médios de lignina total e holocelulose foram de 27,94% e 67,84%, respectivamente. Os demais parâmetros não apresentaram diferença significativas entre os estratos para as respectivas análises. A composição química imediata da madeira apresentou valores médios de 83,26% de materiais voláteis, 16,33% de carbono fixo e 0,40% de cinzas. O poder calorífico médio superior da madeira foi de 4600,95 kcal.kg<sup>-1</sup> e a densidade energética média foi de 1447,04 Mcal.m<sup>-3</sup>. A carbonização resultou em rendimento gravimétrico médio de 30,50% e carvão vegetal com densidade aparente média de 142 kg.m<sup>-3</sup>. A composição química imediata do carvão apresentou valores médios de 20,79% de materiais voláteis, 76,57% de carbono fixo e 2,64% de cinzas, enquanto o poder calorífico médio superior foi de 7240,66 kcal.kg<sup>-1</sup> e densidade energética média do carvão foi de 1021,01 Mcal.m<sup>-3</sup>. A madeira de paricá indica potencial para uso em combustão direta, devido à maior densidade energética em relação ao carvão vegetal, podendo também ser destinada à geração de calor em caldeiras e à produção de combustíveis densificados, como pellets e briquetes. Por outro lado, embora o carvão vegetal apresente menor densidade energética, suas características químicas indicam potencial para aplicações específicas, como biocarvão ou carvão ativado. Dessa forma, o paricá demonstra versatilidade para múltiplos usos energéticos, permitindo o aproveitamento diferenciado da biomassa conforme o diâmetro das frações e a finalidade energética desejada em sistemas agroflorestais.

Palavras-chave: Paricá, Sistemas agroflorestais, Combustão, Carbonização.

## ABSTRACT

*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, known as paricá, is a forest species native to the Amazon, widely cultivated in agroforestry systems due to its rapid growth and biomass production potential. To evaluate the energetic quality of the wood and charcoal of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* cultivated in different silvicultural strata, as well as the suitable diameter for energetic use of residues, aiming at their utilization in combustion and carbonization processes. Analyses of basic density, chemical composition (molecular and proximate), calorific value, energy density, and thermogravimetric analysis of the wood were performed, in addition to controlled carbonization of samples with diameters greater than 10 cm to determine gravimetric yields and characterize the charcoal. The average basic density of the wood was  $314.50 \text{ kg m}^{-3}$ , showing no statistically significant difference among the strata. The average total extractives content was 3.82%, with statistically significant difference between strata 1 and 3. The average total lignin and holocellulose contents were 27.94% and 67.84%, respectively. The remaining parameters showed no significant differences among the strata for the respective analyses. The proximate chemical composition of the wood presented average values of 83.26% volatile materials, 16.33% fixed carbon, and 0.40% ash. The average higher heating value of the wood was  $4600.95 \text{ kcal kg}^{-1}$  and the average energy density was  $1447.04 \text{ Mcal m}^{-3}$ . Carbonization resulted in an average gravimetric yield of 30.50% and charcoal with an average apparent density of  $142 \text{ kg m}^{-3}$ . The proximate chemical composition of the charcoal presented average values of 20.79% volatile materials, 76.57% fixed carbon, and 2.64% ash, while the average higher heating value was  $7240.66 \text{ kcal kg}^{-1}$  and the average energy density of the charcoal was  $1021.01 \text{ Mcal m}^{-3}$ . Paricá wood indicates potential for use in direct combustion, due to the higher energy density in relation to charcoal, and may also be destined for heat generation in boilers and for the production of densified fuels, such as pellets and briquettes. On the other hand, although charcoal presents lower energy density, its chemical characteristics indicate potential for specific applications, such as biochar or activated carbon. Thus, paricá demonstrates versatility for multiple energy uses, allowing differentiated biomass utilization according to the diameter of the fractions and the intended energetic purpose in agroforestry systems.

Keywords: Paricá, Agroforestry systems, Combustion, Carbonization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Rotas de conversão da biomassa e seus principais produtos.....	15
<b>Figura 2</b> – Curva de análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTA).....	20
<b>Figura 3</b> – Mapa de localização da fazenda Cinco Águas.....	21
<b>Figura 4</b> – Esquema da definição dos estratos e cubagem das amostras de <i>S.amazonicum</i> ....	23
<b>Figura 5</b> – Densidade básica e umidade do <i>Schizolobium amazonicum</i> em função dos estratos .....	30
<b>Figura 6</b> – Poder calorífico superior e densidade energética da madeira de <i>S.amazonicum</i> ...	35
<b>Figura 7</b> – Análise de componentes principais (PCA) da madeira de <i>S.amazonicum</i> .....	38
<b>Figura 8</b> – Curvas de TG (A) e DTG (B) da madeira de <i>S.amazonicum</i> em atmosfera de oxigênio.....	39
<b>Figura 9</b> – Curva de TG (A) e DTG (B) da madeira de <i>S.amazonicum</i> em atmosfera de nitrogênio.....	42
<b>Figura 10</b> – Densidade do carvão.....	45
<b>Figura 11</b> – Composição química imediata do carvão.....	47
<b>Figura 12</b> – Poder calorífico superior do carvão da madeira de paricá.....	49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Propriedades da madeira de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> .....	13
<b>Tabela 2</b> – Estratos do plantio de <i>S. amazonicum</i> .....	22
<b>Tabela 3</b> – Intervalo de classes das árvores de <i>S. parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> .....	22
<b>Tabela 4</b> – Estatística descritiva das características morfológicas das fibras de madeira <i>S. amazonicum</i> .....	32
<b>Tabela 5</b> – Estatística descritiva da composição química molecular da madeira de <i>S. amazonicum</i> .....	32
<b>Tabela 6</b> – Estatística descritiva da composição química elementar de madeira <i>S. amazonicum</i> .....	34
<b>Tabela 7</b> – Análise de componentes principais da madeira de <i>S. amazonicum</i> .....	37
<b>Tabela 8</b> – Parâmetros da combustão da madeira do <i>S. amazonicum</i> .....	40
<b>Tabela 9</b> – Parâmetros da análise térmica da pirólise da madeira do <i>S. amazonicum</i> .....	43
<b>Tabela 10</b> – Estatística descritiva do rendimento gravimétrico do carvão de <i>S. amazonicum</i> .....	44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Integração lavoura-pecuária-floresta.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2</b>	<b><i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Ducke) Barneby.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3</b>	<b>Processos de combustão e carbonização.....</b>	<b>15</b>
<b>3.4</b>	<b>Qualidade da madeira para combustão.....</b>	<b>17</b>
<b>3.5</b>	<b>Qualidade da madeira para carbonização.....</b>	<b>19</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise termogravimétrica da madeira e do carvão.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Área de estudo e coleta das amostras.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2</b>	<b>Preparo do material.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterização da madeira.....</b>	<b>26</b>
4.3.1	Densidade básica da madeira.....	26
4.3.2	Biometria das fibras.....	26
4.3.3	Composição química.....	27
4.3.4	Poder calorífico superior.....	28
<b>4.4</b>	<b>Carbonização em escala de laboratório.....</b>	<b>28</b>
<b>4.5</b>	<b>Caracterização do carvão.....</b>	<b>29</b>
4.5.1	Densidade aparente.....	29
4.5.2	Química imediata e poder calorífico.....	29
<b>4.6</b>	<b>Análise termogravimétrica.....</b>	<b>30</b>
<b>4.7</b>	<b>Análise estatística.....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Características físicas e anatômicas.....</b>	<b>31</b>
5.1.1	Densidade básica da madeira.....	31
5.1.2	Biometria das fibras da madeira.....	33
<b>5.2</b>	<b>Composição química da madeira.....</b>	<b>34</b>
5.2.1	Química molecular da madeira.....	34
5.2.2	Composição química imediata da madeira.....	36
<b>5.3</b>	<b>Propriedades energéticas da madeira.....</b>	<b>37</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise de componentes principais.....</b>	<b>38</b>

<b>5.5</b>	<b>Análise térmica da madeira.....</b>	<b>40</b>
<b>5.6</b>	<b>Rendimento gravimétrico da carbonização.....</b>	<b>45</b>
<b>5.7</b>	<b>Densidade aparente do carvão.....</b>	<b>47</b>
<b>5.8</b>	<b>Composição química imediata do carvão.....</b>	<b>48</b>
<b>5.9</b>	<b>Propriedades energéticas do carvão.....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis têm sido amplamente estudadas por sua capacidade de mitigar o aquecimento global e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Cheah et al., 2020). Entre essas fontes, destacam-se os resíduos florestais e agrícolas, oriundos de serrarias, indústria de processamento de madeira ou da exploração florestal e agrícola (Santos et al., 2017). Essas biomassas apresentam características quase neutras em carbono, tornando-se opções atrativas para gerar energia renovável mais limpa em relação a combustíveis fósseis (Wang et al., 2018).

Na Amazônia, o manejo florestal sustentável gera, em média, 2,13 t de resíduos madeireiros para cada tonelada de fuste comercial extraída em sistemas de Exploração de Impacto Reduzido de alta intensidade até 30 m<sup>3</sup> (Numazawa et al., 2017). Entretanto, a grande extensão territorial, os elevados custos logísticos e a baixa eficiência dos fornos limitam seu aproveitamento em larga escala (Souza et al., 2021). Nesse contexto, florestas plantadas representam alternativa estratégica para ampliar a oferta de biomassa e suprir a demanda por madeira.

Entre os modelos de manejo florestal sustentável, a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) tem ganhado notoriedade por seus benefícios ambientais, sociais e econômicos. Esse sistema contribui para a diversificação da produção (Alves; Madari; Boddey, 2017), aumenta a fertilidade do solo por meio da excreta animal (Assmann et al., 2017) e reduz a necessidade de insumos agrícolas. A presença de árvores também contribui para a conservação e fertilidade do solo, além de melhorar o rendimento dos cultivos agrícolas (Cordeiro et al., 2015).

O *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, conhecido como paricá, destaca-se pelo seu fuste reto e densidade baixa, o que dispensa o cozimento da madeira para produção de laminados (Sousa et al., 2005). Trata-se de uma espécie de rápido crescimento, com rendimento volumétrico de até 45 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> até os 10 anos (Nisgoski et al., 2012). Adicionalmente, em sistemas agroflorestais, o paricá auxilia no crescimento de outras espécies comerciais e apresenta boa competitividade com lianas e espécies não pioneiras (Schwartz et al., 2017). Além do seu uso na indústria madeireira, a espécie também possui aptidão energética nas rotas de conversão energética.

A demanda contínua por matéria-prima resulta em grandes volumes de resíduos nas fases de exploração e beneficiamento. Na indústria de laminação, por exemplo, o rendimento médio do paricá é de aproximadamente 50,31%, indicando que cerca de metade do volume

processado é convertida em resíduos. Esse rendimento tende a aumentar com o diâmetro e a idade das árvores, em função da menor incidência de defeitos e da redução proporcional das perdas no processo (Silva et al., 2015). Portanto, o aproveitamento desses resíduos como fonte de energia é uma estratégia viável, que promove o uso eficiente dos recursos e reduz impactos ambientais (Delucis et al., 2018).

Nesse contexto, as propriedades anatômicas, físicas e químicas da madeira influenciam diretamente seu potencial energético, incluindo a densidade básica, teor de lignina e poder calorífico (Araújo et al., 2018). Para produção de carvão para siderurgia, a madeira ideal deve apresentar, preferencialmente, elevado poder calorífico, alto teor de carbono fixo, baixa concentração de cinzas e alta densidade básica (Protásio et al., 2021), fatores que determinam sua qualidade para combustão e produção de subprodutos.

Apesar disso, no Brasil, espécies de ciclo curto como o gênero *Eucalyptus* sp., são amplamente utilizadas na produção de energia pelo seu ciclo de corte de 4 ou 5 anos e comumente possuem densidade abaixo de  $500 \text{ kg.m}^{-3}$ , o que não descarta sua eficiência energética (Loureiro et al., 2021; Lopes et al., 2022). Além disso, podem ser utilizadas na produção de pellets e briquetes, o que aumenta sua densidade energética (Ramos et al., 2024).

O carvão vegetal desempenha um papel fundamental na matriz energética brasileira. O Brasil passou a liderar a produção mundial, com 6,6 milhões de toneladas produzidas em 2024, destinadas principalmente à produção de ferro-gusa (IBÁ, 2025). As propriedades do carvão vegetal dependem da matéria-prima, das condições de carbonização e dos sistemas de produção (Bailis et al., 2013).

A madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, em diferentes condições de plantio, apresenta potencial para usos energéticos (Ferreira et al., 2020). Resíduos com diâmetro inferior aos exigidos pela indústria de laminação geralmente são descartados, mas podem ser aproveitados em rotas energéticas, como a combustão ou a carbonização.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a qualidade energética da madeira e do carvão vegetal de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* cultivado em diferentes estratos silviculturais, bem como o diâmetro adequado para o aproveitamento energético dos resíduos, visando sua utilização em processos de combustão e carbonização.

## 2.2 Objetivos específicos

- Comparar a qualidade energética da madeira de paricá com diâmetro inferior a 10 cm, proveniente de árvores cultivadas em três estratos com variação de idade, espaçamento e presença de gado, para fins de combustão.
- Comparar a qualidade energética da madeira de paricá com diâmetro superior a 10 cm, proveniente de árvores cultivadas em três estratos com variação de idade, espaçamento e presença de gado, para fins de carbonização.
- Avaliar a qualidade energética dos carvões produzidos a partir da madeira de paricá cultivada em três estratos com variação de idade, espaçamento e presença de gado.

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 Integração lavoura-pecuária-floresta

A Lei N° 12.805/2013 classifica o ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta) em quatro modelos: integração lavoura-pecuária-floresta (agrossilvipastoril); Integração lavoura-pecuária (agropastoril); integração pecuária-floresta (silvipastoril) e integração lavoura-floresta (silvoagrícola) (Brasil, 2013). A expansão desse sistema de integração se dá também pela implementação de políticas públicas como o plano ABC (Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura), lançado com o objetivo de atender ao compromisso de combate às mudanças climáticas (Camargo et al., 2023).

O ILPF vem sendo implantado no Brasil desde a década de 1970 com o objetivo de recuperar áreas degradadas e foi amplamente desenvolvido nos anos de 1980 e 1990. É um sistema agroflorestal (SAF) que integra a produção de espécies agrônômicas e florestais, além de gado destinado à produção de carne ou leite (Balbino; Barcellos; Stone, 2011). Esse sistema é uma alternativa viável para fornecer forragem e nutrientes a ruminantes, melhorar a qualidade do solo, promover sua cobertura e garantir a subsistência de pequenos produtores (Venkatesh et al., 2024). Nesse contexto, o modelo do ILPF assegura o uso sustentável da terra e a diversificação dos produtos do plantio (Cordeiro et al., 2015), o que garante ganhos ambientais e aumento de renda por meio da diversificação de produtos.

Apesar dos inúmeros benefícios do sistema integrado, um dos pilares para o sucesso do sistema é a gestão adequada da floresta em pé, o que gera tanto pontos positivos quanto desafios para os componentes do sistema. Por integrar culturas perenes e anuais, é essencial que o sombreamento seja controlado, evitando a redução da taxa de fotossíntese das plantas (Camargo et al., 2023) ou a eficiência da produção de grão e forragem (Moreira et al., 2018). Além disso, o custo inicial para implantação do sistema é elevado, pois engloba espécies arbóreas, forrageiras e animais que compartilharão o espaço. No entanto, esses gastos são compensados pela produção agrícola e pelas receitas futuras do sistema (Mota, 2010).

O uso de árvores em áreas de pastagem é indicado para melhorar o comportamento de vacas leiteiras no pastejo, bem como o tempo que o animal passa deitado ou ruminando. Isso auxilia na absorção de nutrientes pelo animal, além de promover seu bem-estar (Moreira et al., 2018). Apesar dos benefícios ao gado, a presença de árvores pode afetar o rendimento de grão. No estudo de Domiciano et al. (2023), a presença de árvores afetou negativamente o rendimento de grãos e a altura do milho, além de reduzir a massa de forragem, quando comparada aos sistemas a pleno sol.

Aumentar a diversidade desses sistemas de integração não é suficiente para melhorar seu funcionamento, logo, é indicada a introdução de pastagem em nível moderado (Congio et al., 2023). Isso se dá devido ao alcance dos bovinos em partes mais digeríveis das plantas, permitindo uma seleção mais adequada e nutritiva (Carvalho, 2013). Além disso, pastagens manejadas sob pastejo moderado com ou sem novilhos, em sistemas com culturas anuais ou perenes não afetam a emissão de CH<sub>4</sub>, rendimento ou intensidade da produção (Portugal et al., 2023).

### **3.2 *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby**

O *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby é uma espécie florestal da família Fabaceae, sendo conhecida na região amazônica como paricá, pinho cubano, bandarra, dentre outros (Modes, 2015). É considerada uma árvore de grande porte, com altura entre 20 a 30 m, ocorrendo naturalmente em mata primária de terra firme, várzea alta e florestas secundárias. A distribuição geográfica da espécie se dá nos seguintes estados: Acre, Amapá, Pará, Rondônia e Mato Grosso (ROMÃO E MANSANO, 2026).

O paricá integra o grupo de espécies florestais plantadas no Brasil, após os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, compondo o conjunto de outras espécies que, juntamente com seringueira, acácia e teca, totaliza aproximadamente 640 mil hectares de área plantada (IBÁ,

2025). O valor mínimo de referência para comercialização interestadual de madeira de paricá oriunda de reflorestamento é de R\$ 115,80 m<sup>-3</sup> para toras com diâmetro entre 10 e 30 cm e comprimento de 1,15 a 2,30 m. Para toras com diâmetro igual ou inferior a 10 cm, nas mesmas condições de comprimento, o valor mínimo estabelecido é de R\$ 30,71 m<sup>-3</sup> (Sefaz, 2025).

A madeira de paricá é utilizada principalmente na indústria de laminação e compensado, devido à necessidade de reduzir as pressões sobre espécies nativas oriundas do manejo florestal, destinadas à indústria madeireira, incluindo madeira serrada e laminação (Modes et al., 2020). Além disso, o interesse pela espécie se dá pela boa aceitação no mercado madeireiro, sendo empregada na produção de forros, palitos, móveis e peças de acabamento, além de aplicações em molduras e outros produtos de baixo peso (Silveira et al., 2017).

Na indústria, a espécie apresenta fuste retilíneo, com poucos galhos, sem necessidade de cozimento, com superfície lisa e coloração clara (Sousa; Carvalho; Ramos, 2005). Além disso, a madeira apresenta um poder calorífico em torno de 4600 kcal.kg<sup>-1</sup>, o que é adequado para utilização como combustível (Takahashi et al., 2021), além de ser valiosa pela sua relevância ambiental e capacidade de acúmulo de carbono (Neves et al., 2022).

A espécie *S. amazonicum* também tem potencial para a recuperação de clareiras em florestas degradadas devido ao seu rápido crescimento e à capacidade de competir eficientemente com lianas e espécies pioneiras não-comerciais. Além disso, pode auxiliar no crescimento de outras espécies comerciais (Schwartz et al., 2017). Desta forma, os usos múltiplos do paricá, tanto no manejo florestal quanto na aplicação tecnológica da madeira, destacam sua versatilidade e importância econômica.

O incremento médio anual do diâmetro à altura do peito (IMADAP) do paricá até os 5 anos de idade pode variar conforme o plantio. Em consórcio com outras espécies ou sistemas agroflorestais, os valores observados foram de 2,50 e 3,38 cm.ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Cordeiro et al., 2020). Em outro trabalho foram encontrados valores próximos de 3,56 (*Cordia alliodora*), 2,89 (*Tectona grandis*) e 2,61 cm.ano<sup>-1</sup> (*Swietenia macrophylla*) em associação com outras espécies florestais (Piotto et al., 2020).

Os principais critérios para utilização da madeira como fonte de energia são densidade básica, composição química elementar, composição química imediata e poder calorífico (Santos et al., 2013). Para a densidade básica da madeira de paricá, foram encontrados valores variando de 262 kg.m<sup>-3</sup> em plantios de 5 anos de idade (Vidaurre et al., 2012) a 510 kg.m<sup>-3</sup>, em árvores de 10 a 33 anos provenientes de florestas naturais (Lobão et al., 2012). Esses valores são próximos aos encontrados para *Tachigali vulgaris* (Santos et al., 2021), que variaram de

454 a 516 kg.m<sup>-3</sup> e clones de *Eucalyptus* sp., que variaram de 531 a 585 kg.m<sup>-3</sup> (Pereira et al., 2016).

Apesar de madeiras de baixa densidade não serem ideais para a produção de carvão (Vidaurre et al., 2012), esta propriedade não deve ser considerada como critério isolado (Santos et al., 2013). No caso da madeira de paricá, diversos fatores favorecem sua aplicação bioenergética (Tabela 1).

**Tabela 1** – Propriedades da madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

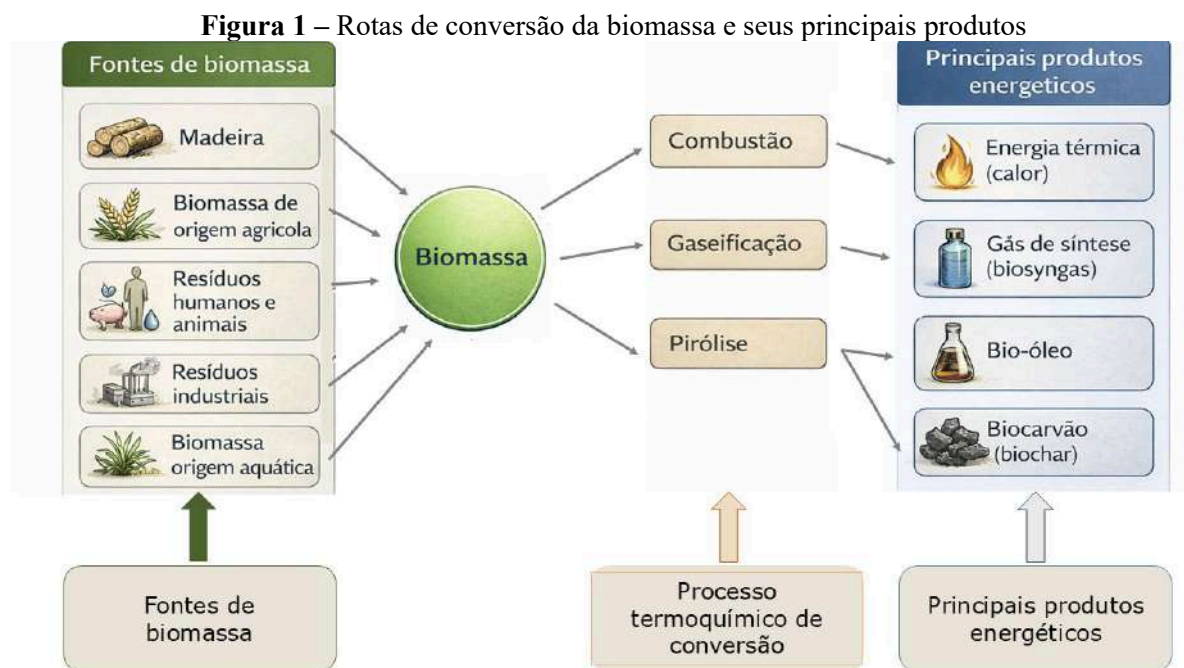
Parâmetro	Vidaurre et al. (2012)	Ferreira et al. (2020)	Takahashi et al. (2021)	Modes et al. (2015)	Freitas et al. (2016)
Densidade básica (kg/m <sup>-3</sup> )	262 – 303	–	–	–	–
Umidade (%, bs)	–	–	9,65	–	11,43
Extrativos totais (%, bs)	4,41	–	4,19	6,54 – 6,77	–
Lignina total (%, bs)	29,50	–	26,16	28,30 – 28,97	–
Holocelulose (%, bs)	–	–	69,65	64,27 – 65,16	–
Materiais voláteis (%, bs)	–	78,41 – 82,5	80,48	–	85,82
Cinzas (%, bs)	–	0,35 – 0,86	0,62	0,49 – 0,74	0,50
Carbono fixo (%, bs)	–	17,50 – 20,73	18,90	–	13,17
N (%, bs)	–	–	0,12	–	–
C (%, bs)	–	–	47,22	–	–
H (%, bs)	–	–	7,71	–	–
S (%, bs)	–	–	0,06	–	–
O (%, bs)	–	–	44,70	–	–
PCS (kcal.kg <sup>-1</sup> )	4436,22 – 4652,02	4357,59 – 4422,35	4609,36	–	4579,70
PCU (kcal.kg <sup>-1</sup> )	–	–	–	–	3758,80

Onde: (% , bs) = Porcentagem, base seca; PCS: Poder calorífico superior; PCU: Poder calorífico útil.

### 3.3 Processos de combustão e carbonização

A avaliação do potencial energético da biomassa florestal, por meio de testes de combustão e carbonização, é fundamental para determinar sua viabilidade como fonte de energia renovável. A necessidade de pesquisas sobre o uso da biomassa como combustível é motivada principalmente pelos problemas decorrentes do uso excessivo de combustíveis fósseis (Brunerová et al., 2017).

A combustão é um processo antigo para utilização da biomassa como fonte de energia. Neste processo, a energia química é obtida na forma de calor, por meio da queima direta do material (Tripathi et al., 2016). A combustão completa da biomassa ocorre em faixas de temperatura de 800 a 1000 °C, o que permite a queima de diferentes tipos de biomassa, sendo recomendada a secagem prévia do material para maior eficiência (Porpatham et al., 2002). A madeira ou a biomassa pode ser utilizada de forma direta ou convertida em outros produtos bioenergéticos, como biocarvão, bio-óleo, biogás, entre outros (Figura 1).



Fonte: O autor (2026)

As etapas de combustão descritas por Nogueira e Lora (2002) são: secagem, emissão de voláteis, queima dos voláteis, extinção das chamas dos voláteis e combustão dos resíduos de carbono. Durante a combustão, ocorre inicialmente a pirólise da madeira, uma vez que a degradação térmica dos componentes orgânicos antecede a oxidação completa dos gases e do carbono residual (Trugilho et al., 2017).

A carbonização, também denominada pirólise lenta, é um processo termoquímico de conversão da madeira em carvão vegetal. Nessa transformação, a biomassa se decompõe em três frações: carvão vegetal, bio-óleo e gases não condensáveis (Figura 1), cujos rendimentos e proporções são dependentes dos parâmetros operacionais, como temperatura, tempo de residência e características da biomassa (Dilks; Monette; Glaus, 2016).

O processo de carbonização ocorre em quatro etapas. A primeira, abaixo de 200 °C, corresponde à secagem da madeira, com evaporação da água livre e de adesão. A segunda, entre 200 °C a 280 °C, envolve reações endotérmicas com liberação de materiais voláteis e início da degradação parcial da celulose, hemiceluloses e lignina. Na terceira etapa, de 280 a 500 °C, ocorre intensa decomposição dos componentes químicos moleculares, liberando alcatrão, ácido pirolenhoso e gases voláteis. A última etapa ocorre acima de 500 °C, quando o carbono é fixado e a emissão de voláteis é mínima (Oliveira et al., 2013; Pereira et al., 2017).

Embora ambos sejam processos termoquímicos de conversão da biomassa, combustão e carbonização apresentam objetivos distintos, o que implica diferenças nos critérios de qualidade da matéria-prima.

### **3.4 Qualidade da madeira para combustão**

Os índices de qualidade da madeira para produção de energia incluem a composição química da madeira (molecular, elementar e imediata), que varia entre as espécies (Delucis et al., 2017), além de características como densidade básica, umidade e poder calorífico (Araújo et al., 2018).

A umidade é uma das propriedades mais sensíveis às variações do ambiente, sendo influenciada pela temperatura, pela umidade relativa e pela velocidade do ar (Zen et al., 2019). A secagem da madeira desempenha um papel fundamental na qualidade energética, reduzindo o teor de água e aumentando o poder calorífico (Bianchini e Simioni, 2021).

A densidade básica da madeira é diretamente proporcional à densidade energética do material, que, por sua vez, influencia a massa de combustível consumido durante a queima (Pereira et al., 2016). Madeiras de maior densidade são ideais para fins energéticos, pois aumentam sua eficiência em fornos, maior energia estocada, maior rendimento no processo de conversão e menor custo operacional (Rodrigues e Rousset, 2009).

Os fatores anatômicos da madeira são determinantes para suas aplicações tecnológicas, inclusive energéticas. De acordo com Pereira et al. (2016), a avaliação dos parâmetros

morfológicos, como as dimensões das fibras e dos vasos, principais elementos anatômicos do lenho, é importante para definir possíveis utilizações.

A fração de parede pode ser calculada a partir da espessura da parede e do diâmetro das fibras, conforme a equação proposta por Foelkel et al. (1975). Valores elevados de fração de parede indicam menor volume de espaços vazios (Damásio et al., 2013). Paula (2003) recomenda que madeiras com frações de parede superiores a 60% e densidade média a partir de  $600 \text{ kg.m}^{-3}$  sejam indicadas para geração de energia.

Preston et al. (2006) relatam que a influência dos vasos na densidade da madeira pode ser explicada por dois critérios principais: o número de vasos por área transversal e a área do lúmen de cada vaso. No trabalho de Vicentin et al. (2021), foi identificada correlação positiva entre a densidade básica e a espessura da parede das fibras, o comprimento das fibras e a frequência de vasos em *Curatella americana*. Essas características são desejáveis, uma vez que a densidade do material influencia diretamente a densidade energética.

A composição química molecular é um índice importante para a combustibilidade da madeira, pois inclui teores de extrativos totais, lignina (solúvel e insolúvel), celulose e hemiceluloses. A lignina é responsável por 10 a 35% da biomassa lenhosa e é a macromolécula aromática mais abundante na natureza (Park et al., 2022). Quando empregada como combustível, pode gerar mais energia ao sistema em comparação com a celulose (Sharma et al., 2021). Essa macromolécula resulta da polimerização desidrogenativa de três álcoois precursores: (i) trans-p-cumárico, (ii) trans-coniferílico e (iii) trans-sinápico (Beauchet et al., 2012).

Enquanto a lignina é um componente estrutural da parede celular, os extrativos são componentes acidentais, solúveis em diferentes solventes e pertencentes a grupos químicos variados, como taninos, açúcares, resinas, entre outros (Gonçalves et al., 2022). Sua ocorrência varia conforme a idade da árvore, o tipo de corte, o local de coleta e o tipo de resíduo (Verkasalo et al., 2021). Apesar de presentes em proporções menores, os extrativos influenciam positivamente a degradação térmica, reduzindo a temperatura inicial de pirólise e favorecendo as taxas de desvolatilização da biomassa (Protásio et al., 2022; Moya, 2017).

A composição química imediata avalia os componentes que fornecem energia ao sistema durante o processo de combustão. Os materiais voláteis correspondem aos gases expelidos durante o aquecimento do material a  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto a parte sólida não volatilizada é conhecida como carbono fixo (Nasser et al., 2016). A composição química complexa dos materiais voláteis gera uma série de reações consecutivas durante a pirólise do material lignocelulósico, favorecendo a ignição do combustível (Alves et al., 2019). O teor de

materiais voláteis está associado aos extrativos e às hemiceluloses, favorecendo a ignição, enquanto o carbono fixo, relacionado à lignina, contribui para a estabilidade térmica (Vieira et al., 2023).

O teor de cinzas corresponde aos óxidos minerais gerados após a combustão completa da madeira (Souza et al., 2016). Valores elevados de cinzas prejudicam a longevidade dos reatores e aumentam a periodicidade das manutenções, devido a incrustações nos sistemas de conversão (Alves et al., 2019). Čubars e Poiša (2017) reportam que o teor de cinzas de até 5% é aceitável para certos padrões de qualidade energética, para que não haja perdas energéticas ao sistema.

O poder calorífico corresponde à quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa de uma unidade de massa de combustível. Esse parâmetro é importante para determinar a quantidade de energia liberada durante a combustão (Munshi et al., 2024). Madeiras com poder calorífico mais elevado são desejáveis para fins energéticos (Parveen e Ullah, 2023).

O poder calorífico é dividido em três tipos: (i) poder calorífico superior, (ii) inferior e (iii) útil, sendo fundamental distingui-los durante os cálculos de eficiência dos fornos ou caldeiras (Nogueira e Lora, 2002). O PCS é mais usual para fins de comparação de materiais. Por outro lado, o PCU considera a energia corrente devido a presença de umidade. O poder calorífico inferior considera a energia liberada na combustão desconsiderando o vapor da água.

Enquanto o poder calorífico expressa a energia liberada por unidade de massa, a densidade energética representa a quantidade de energia disponível por unidade de volume, sendo especialmente relevante para combustão direta da madeira. Essa propriedade resulta da combinação entre a densidade básica e o poder calorífico do material. Assim, madeiras com maior densidade energética concentram maior quantidade de energia no mesmo volume, favorecendo o transporte, o armazenamento e a eficiência do processo de combustão, particularmente quando utilizadas como lenha (Protásio et al., 2014; Protásio et al., 2021).

### **3.5 Qualidade da madeira para carbonização**

A biomassa pode ser utilizada na produção de carvão vegetal para aplicações domésticas e industriais, especialmente como alternativa aos combustíveis fósseis (Brunerová et al., 2017). A caracterização desses materiais é fundamental para otimizar o rendimento do processo de carbonização e a qualidade do carvão produzido (Lima, 2020).

O objetivo da carbonização é aumentar a densidade energética do material sólido em relação à madeira original e concentrar o carbono na forma de carbono fixo. Esse processo promove a remoção de compostos voláteis e a formação de uma matriz carbonácea mais estável, resultando em combustível com maior teor de carbono e melhor desempenho energético.(Trugilho et al., 2017).

Durante a decomposição térmica, compostos voláteis são liberados, enquanto parte do carbono permanece concentrada na fração sólida, gerando diversas substâncias químicas com potencial para uso como substitutos de combustíveis fósseis (Mohan et al., 2006). Assim, a qualidade da madeira para carbonização está diretamente relacionada ao rendimento gravimétrico do carvão e às suas características físico-químicas.

Fatores como a matéria prima, o sistema de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento do forno influenciam diretamente a qualidade e rendimento do carvão vegetal. O material lignocelulósico tem uma estrutura complexa, composta por celulose, hemiceluloses e lignina. Essa heterogeneidade torna o processo de pirólise complexo, pois cada componente tem uma reatividade diferente em diferentes temperaturas (Segers et al., 2024).

Além disso, propriedades físicas da madeira, como a umidade, afetam negativamente o processo de carbonização. Elevados níveis de umidade prolongam o ciclo de carbonização, favorecem a formação de gases não condensáveis, diminuem a taxa de aquecimento do forno e comprometem o rendimento gravimétrico do carvão (Canal et al., 2020).

Madeiras com maior densidade básica tendem a apresentar maior massa enfiada por unidade de volume, sendo frequentemente indicadas para a produção de carvão vegetal destinado ao uso siderúrgico (Gouvêa et al., 2015). Entretanto, essa propriedade não deve ser considerada de forma isolada, uma vez que o rendimento e a qualidade do carvão também dependem da composição química da madeira e das condições do processo de carbonização.

A composição rica em carbono da lignina é altamente desejável, pois gera uma quantidade significativa de energia durante o processo de produção do carvão. Pereira et al. (2012) indicam biomassa com teor de lignina na faixa de 28% para produção de carvão vegetal.

O teor de carbono fixo é um dos principais indicadores da qualidade do carvão vegetal, pois corresponde à fração sólida rica em carbono remanescente após a liberação dos materiais voláteis durante a carbonização. Valores mais elevados indicam maior concentração de carbono e melhor desempenho do carvão, especialmente para uso industrial (Protásio et al., 2021).

### 3.6 Análise termogravimétrica da madeira e do carvão

A liberação de energia térmica da madeira ocorre quando determinadas condições físico-químicas são atingidas. Esse processo ocorre, em geral, em uma ampla faixa de temperatura, entre aproximadamente 250 °C e 800 °C, dependendo das características do combustível e das condições operacionais (García et al., 2012).

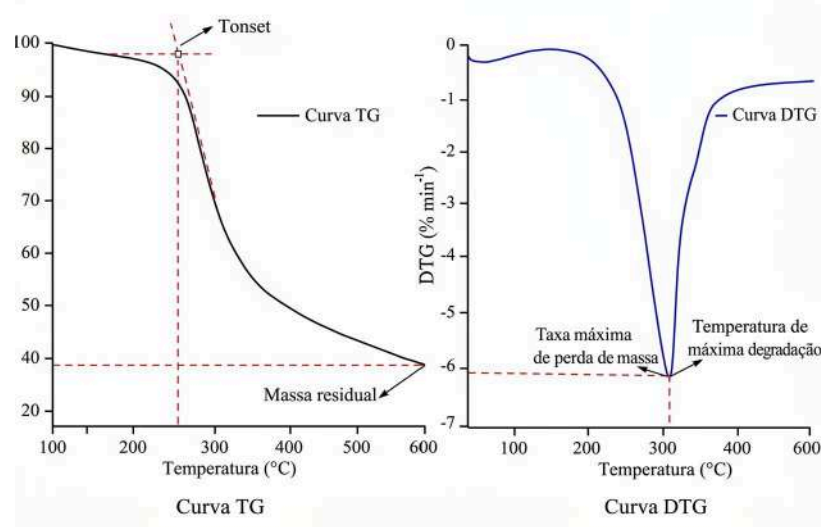
Durante a combustão, os principais elementos presentes na madeira, como carbono e hidrogênio, reagem com o oxigênio atmosférico, resultando principalmente na formação de dióxido de carbono e vapor de água. Além disso, outros gases são formados em menor quantidade, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos de baixa massa molecular (Demirbas, 2002).

A análise de combustão da madeira pode ser agrupada em três etapas. A primeira etapa analisa a volatilização dos constituintes da biomassa, o que pode englobar a umidade, a holocelulose e materiais voláteis (Jia et al., 2021; Mian et al., 2020). Em seguida ocorre a decomposição da lignina e a formação do carvão vegetal. A terceira etapa consiste da combustão do carbono sólido remanescente, processo conhecido como combustão heterogênea, no qual o oxigênio reage diretamente com o carvão formado nos estágios iniciais. Essa etapa está fortemente associada à decomposição da lignina, componente de maior estabilidade térmica da madeira (García et al., 2012).

As análises termogravimétricas (TG) permitem avaliar o comportamento térmico da biomassa por meio da variação de massa em função da temperatura ou do tempo. Quando realizadas em atmosfera inerte, como nitrogênio, a análise é análoga à pirólise, resultando na formação de material carbonáceo residual. Nessa condição, o ponto denominado Tonset corresponde à temperatura inicial de perda de massa detectável associada à degradação térmica do material, indicando o início da decomposição dos constituintes estruturais (Figura 2). Já a massa residual observada ao final do ensaio representa o carvão formado durante a degradação térmica (Lazzari et al., 2022).

Em atmosfera oxidativa, por outro lado, a análise é análoga à combustão, ocorrendo a oxidação do material carbonáceo formado nas etapas iniciais e resultando predominantemente na formação de cinzas. Assim, a interpretação dos resultados termogravimétricos deve considerar o tipo de atmosfera empregada no ensaio.

**Figura 2** – Curva de análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTA)



Fonte: O autor (2026)

A curva derivada termogravimétrica (DTG) é a derivada da curva de TG e representa a taxa de perda de massa em função da temperatura, permitindo identificar com maior precisão os eventos térmicos associados à decomposição da biomassa. O ponto correspondente ao valor máximo da taxa de perda de massa ( $dm/dt_{max}$ ), também denominado temperatura de máxima degradação ( $T_{max}$ ), está associado principalmente à decomposição da celulose (Figura 2) e representa a fase de maior reatividade térmica do material (Yang et al., 2007).

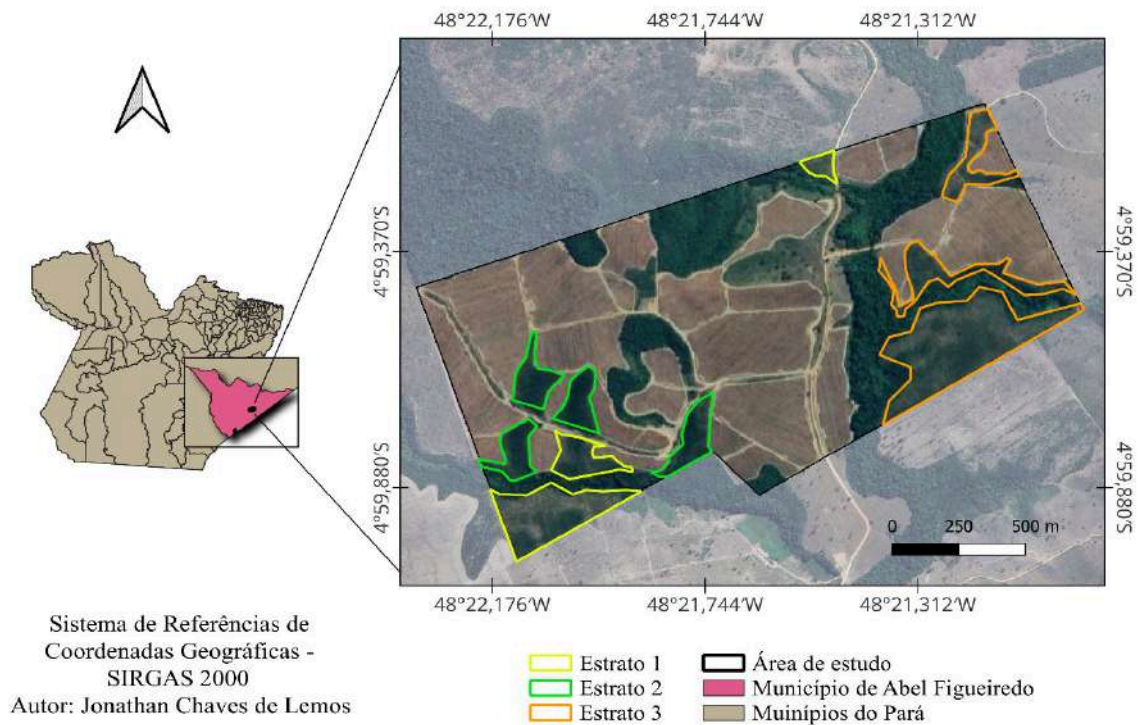
Segundo Protásio et al. (2022), o comportamento térmico e a decomposição da biomassa sob condições oxidativas são fortemente influenciados por suas propriedades físicas e químicas. Essas propriedades podem variar significativamente em função da espécie, da posição da madeira no tronco e das condições de crescimento, refletindo diretamente no desempenho energético durante os processos de combustão e conversão termoquímica. Essas propriedades são utilizadas como critérios técnicos para a seleção de espécies e para a análise da qualidade da biomassa destinada à produção de energia (Barcellos et al., 2005; Paula et al., 2011; García et al., 2012; Santos et al., 2013).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo e coleta das amostras

As amostras foram coletadas na fazenda Cinco Águas, localizada no município de Abel Figueiredo no sudeste do Estado do Pará (Figura 3).

**Figura 3** – Mapa de localização da fazenda Cinco Águas



Fonte: Veras (2024)

A fazenda Cinco Águas possui área total de 254 ha, dos quais 170 ha são destinados a fins comerciais. Desta área, 50 ha correspondem ao plantio de paricá, implantado em um sistema de integração lavoura pecuária e floresta (ILPF). O plantio é composto por duas áreas, uma com 6 anos e outra com 5 anos. A área de 5 anos foi subdividida em dois grupos, com base na presença ou ausência de gado. Assim, a seleção dessas duas áreas, resultou em três estratos (Tabela 2). A espécie *Panicum maximum* é a espécie forrageira que acompanha o plantio.

**Tabela 2** – Estratos do plantio de *S. amazonicum*

Estrato	Idade (anos)	Espaçamento (m)	Presença de gado
1	5	4,0 x 2,0	Sim
2	5	4,0 x 2,0	Não
3	6	3,5 x 3,5	Sim

Fonte: Adaptado de Veras (2024).

A coleta das amostras foi realizada com base na distribuição das classes diamétricas existentes em cada estrato, conforme a disponibilidade real das árvores no momento da coleta.

Foram utilizadas sete classes diamétricas para organizar a variabilidade estrutural do povoamento (Tabela 3).

**Tabela 3** – Intervalo de classes das árvores de *S. parahyba var. amazonicum*

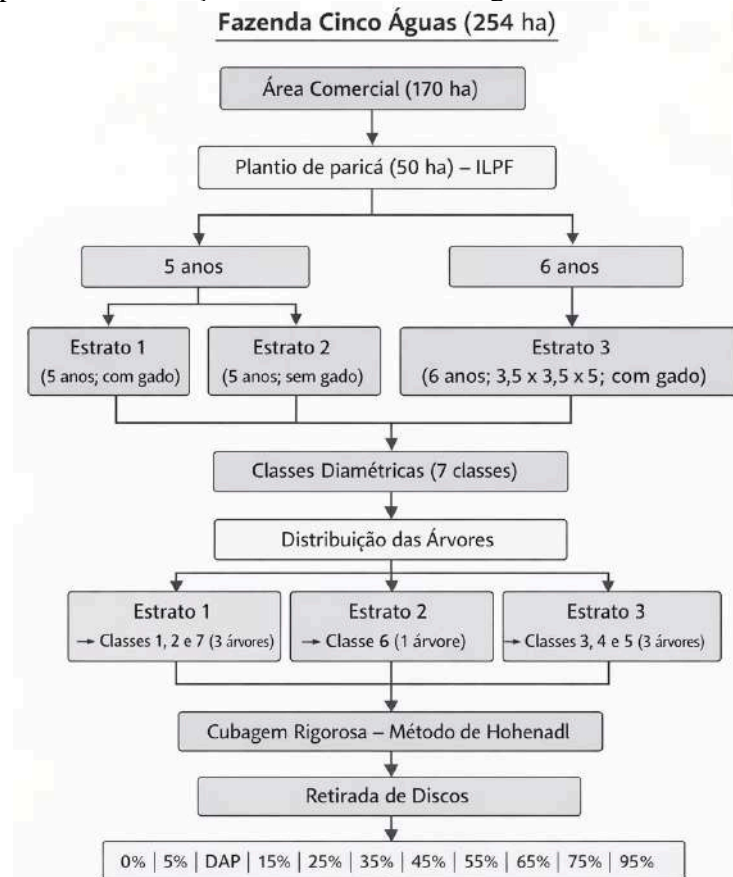
<b>Classes</b>	<b>Limites dos intervalos (cm)</b>	<b>Estrato</b>
1	0,0 – 3,3	1
2	3,4 – 7,1	1
3	7,2 – 10,9	3
4	11,0 – 14,7	3
5	14,8 – 18,6	3
6	18,7 – 22,4	2
7	22,5 – 26,2	1

Fonte: O autor (2026).

No estrato 1, foram amostradas três árvores das classes 1, 2 e 7, enquanto no estrato 3, foram coletadas três árvores das classes 3, 4 e 5. O estrato 2 apresentou apenas uma árvore amostrada, devido a limitação imposta pelo produtor quanto a retirada das árvores.

A cubagem rigorosa foi realizada pelo método de Hohenadl, utilizando-se as sete árvores amostradas, distribuídas em diferentes classes diamétricas. De cada árvore, foram retirados discos em 12 seções ao longo da altura comercial (primeira inserção de galhos), correspondentes a 0%, 5%, DAP, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95% da altura comercial (Figura 4), conforme descrito por Veras (2024).

**Figura 4** – Esquema da definição dos estratos e cubagem das amostras de *S. amazonicum*



Fonte: O autor (2026)

## 4.2 Preparo do material

Cada disco foi seccionado em quatro cunhas, sendo duas cunhas opostas destinadas à determinação da densidade básica. Para as análises químicas e energéticas, foi preparada uma amostra composta por árvore, obtida pela mistura dos materiais de todos os discos. Para os ensaios de carbonização, foram selecionados apenas os discos com diâmetro superior a 10 cm. Isso foi justificado pela elevada perda de massa durante a pirólise da madeira de paricá, como relatado por Vidaurre et al. (2012), que observam perdas superiores a 50% da massa inicial. Essa seleção buscou minimizar perdas e garantir amostras representativas para a produção de carvão vegetal.

Para a caracterização da madeira, os discos de cada árvore foram seccionados em quatro cunhas. As cunhas remanescentes foram utilizadas para compor amostras compostas por árvore. As cunhas foram moídas em moinho de facas tipo Willey (TECNAL, modelo TE-650), sendo as frações retidas entre 40 e 60 mesh destinadas às análises químicas e aquelas frações que passaram na peneira 60 mesh foram utilizadas nas de análises de poder calorífico superior e termogravimétrica.

### 4.3 Caracterização da madeira

#### 4.3.1 Densidade básica da madeira

A densidade básica foi determinada a partir de cunhas opostas retiradas dos discos correspondentes às diferentes alturas do fuste, conforme a norma NBR 11941. As cunhas foram imersas em água até a saturação. O volume saturado foi determinado por meio do método de deslocamento de água. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingir massa constante. A densidade básica média foi determinada pela razão entre a massa seca e o volume saturado, sendo o valor médio obtido pela média aritmética das cunhas opostas.

#### 4.3.2 Biometria das fibras

Para a mensuração das fibras, foi preparada uma amostra composta por árvore, com fragmentos de cada posição longitudinal amostrada. As fibras foram dissociadas pelo método Franklin (1945), alocando-as em frascos de vidro contendo uma solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio na proporção 1:1 e mantendo-as em estufa a 60 °C por aproximadamente 48 h, até a dissociação das fibras.

Após a maceração, o material foi lavado com hipoclorito de sódio a 10% e água destilada, corado com Safranina a 1% e disposto em lâminas contendo glicerina diluída em água destilada. As imagens foram obtidas em microscópio óptico trinocular Motic BA310E, acoplado a uma câmera, utilizando objetiva de 4x para medir o comprimento ( $\mu\text{m}$ ) e de 40x para medir a largura total e a largura do lúmen ( $\mu\text{m}$ ) das fibras.

Foram obtidas 50 medições por árvore para cada parâmetro, utilizando o software Motic Images Plus 3.0. A espessura e fração da parede foram obtidas por meio das Equações 1 e 2:

$$EP = \frac{D - DL}{2} \quad (1)$$

$$FP = \frac{(2 \times EP) / D \times 100}{1} \quad (1)$$

Onde:

EP é a espessura da parede da fibra ( $\mu\text{m}$ );  
 D é o diâmetro da fibra ( $\mu\text{m}$ );  
 DL é o diâmetro do lume da fibra ( $\mu\text{m}$ );  
 FP é a fração de parede em (%).

#### 4.3.3 Composição química

O teor de extrativos totais foi determinado em extrator Soxhlet, seguindo a norma NBR 14853, utilizando-se, sucessivamente, os solventes etanol/tolueno (2:1 v/v) por 6 h, etanol por 6 h e água quente por 6 h. Após a extração, as amostras foram secas em estufa a  $100 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 h para obtenção da massa seca. O teor de extrativos totais foi calculado pela diferença entre a massa seca inicial e a massa seca após a extração, sendo expresso em porcentagem da massa seca inicial.

A quantificação da lignina insolúvel (análise de lignina Klason) foi realizada pelo método TAPPI T222 om-88, utilizando amostras livres de extrativos. Aproximadamente 0,35 g de amostra seca foram tratadas com 3 mL de ácido sulfúrico a 72%, em temperatura ambiente  $30^\circ\text{C}$  por 1 h, sob agitação periódica. Em seguida, o material foi diluído com água deionizada e submetido a hidrólise em autoclave a  $120^\circ\text{C}$  por 1 h. Após o resfriamento, a solução foi filtrada a vácuo, sendo o resíduo retido correspondente a lignina insolúvel. A lignina solúvel foi determinada a partir da lignina Klason, conforme o método TAPPI UM 250, por meio de espectroscopia UV, com leitura de absorbância a 205 nm. A lignina total foi calculada somando os teores de lignina solúvel e insolúvel. A holocelulose foi calculada pela diferença entre 100% e o teor de lignina total.

Os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo da madeira foram determinados com base na norma ASTM D1762-84, sendo expressos na base seca. O teor de materiais voláteis foi determinado utilizando 2 g de amostras secas em cadinhos tampados, os quais foram colocados na mufla a  $950^\circ\text{C}$  por 6 min. O teor de cinzas foi obtido a partir do resíduo remanescente dos materiais voláteis, em forno mufla a  $750^\circ\text{C}$  por 6 h, sendo ambos calculados por diferença de massa em relação à massa seca inicial. O teor de carbono fixo (TCF) foi determinado indiretamente, conforme a Equação 3.

$$TCF = 100 - (TMV + TCZ) \quad (2)$$

Onde:

TCF: Teor de carbono fixo (% , base seca);

TMV: Teor de materiais voláteis (% , base seca);

TCZ: Teor de cinzas (% , base seca).

#### 4.3.4 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) da madeira foi determinado por meio de bomba calorimétrica digital (modelo IKA C-200®), de acordo com a norma NBR 8633, com três repetições por amostra, e os resultados foram expressos em base seca. A análise foi realizada no Laboratório da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

#### 4.4 Carbonização em escala de laboratório

Para o processo de carbonização, foram separados apenas os discos com diâmetro superior a 10 cm. Nessa etapa, foi feita uma amostra composta de discos por árvores de seus respectivos estratos. A carbonização foi realizada em um forno elétrico de câmara (mufla) GmbH (Linn Elektro Therm®, Alemanha) com controlador digital de tempo e temperatura.

Para a carbonização, adotou-se a temperatura final de carbonização de 450 °C. Foram utilizados 1,5 kg de material por processo, sendo realizadas três repetições para cada um dos estratos. Após a carbonização, foram calculados o rendimento gravimétrico em carvão (RGC), rendimento em líquido pirolenhoso (RLP) e gases não condensáveis (RGNC), por meio das Equações 4, 5 e 6, respectivamente:

$$RGC = \left( \frac{MCV}{MSM} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (% , base seca);

MCV: Massa seca de carvão vegetal (g);

MSM: Massa seca de madeira (g).

$$RLP = \left( \frac{MLP}{MSM} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso (% , base seca);

MLP: Massa de líquido pirolenhoso (g);

MSM: Massa seca de madeira (g).

$$RGNC = 100 - (RGC + RLP) \quad (6)$$

Onde:

RGNC: Rendimento em gases não condensáveis (% , base seca);

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso (%).

O rendimento em carbono fixo foi determinado a partir da Equação 7,

$$RCF = \frac{RGC \times TCF}{100} \quad (7)$$

Onde: RCF: Rendimento em carbono fixo (% , na base seca);

TCF: Teor de carbono fixo (% , na base seca);

RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (% , na base seca)

## 4.5 Caracterização do carvão

### 4.5.1 Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente do carvão vegetal, foram preparados 15 corpos de prova para cada carbonização. O procedimento seguiu os princípios descritos na NBR 11941 (ABNT, 2003). Os corpos de prova foram submetidos à saturação por imersão em água sob vácuo. Em seguida, o volume foi determinado pelo método de deslocamento de água. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até massa constante para obtenção da massa seca. A densidade aparente foi calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado, conforme a Equação 8.

$$D(ap) = \frac{PC(0)}{VC(sat)} \quad (8)$$

Onde:

D(ap) – densidade relativa aparente do carvão, (g/cm<sup>3</sup>);

PC(0) – peso do carvão seco, g;

VC(sat) – volume do carvão saturado, g.

### 4.5.2 Química imediata e poder calorífico

Os carvões foram caracterizados quanto à química imediata e poder calorífico, segundo as mesmas normas e metodologias descritas anteriormente para a madeira. O PCS do

carvão vegetal foi estimado seguindo a equação proposta por Parikh et al. (2005), através da Equação 9.

$$PCS = 84,51 \times TCF + 37,2601 \times TMV - 1,8642 \times TCZ \quad (9)$$

Onde:

PCS: poder calorífico superior do carvão ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ );

TCF: teor de carbono fixo contido no carvão (%);

TMV: teor de materiais voláteis contidos no carvão (%);

TCZ: teor de cinzas contidas no carvão (%).

#### 4.6 Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas utilizando amostras compostas de diferentes posições longitudinais das árvores, agrupadas por estrato. Foram utilizadas frações moídas e peneiradas que passaram na peneira de 60 mesh. Os ensaios foram conduzidos em analisador termogravimétrico modelo DTG-60H (Shimadzu), empregando aproximadamente 5 mg de amostra por ensaio.

O programa térmico consistiu em aquecimento inicial à taxa de  $20 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  até  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , seguido de patamar isotérmico de 30 minutos para remoção da umidade residual. Posteriormente, a temperatura foi elevada à razão de  $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$  até  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ , sem patamar final.

Para a avaliação da pirólise, os ensaios foram realizados sob atmosfera de nitrogênio, com fluxo constante de  $65 \text{ mL min}^{-1}$ . Embora o aquecimento tenha atingido  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ , as análises foram consideradas até  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , faixa em que se concentram os principais eventos de degradação térmica da madeira. As perdas de massa foram expressas em porcentagem da massa inicial e avaliadas nos intervalos de  $30\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $300\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $400\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $500\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$ . A curva DTG foi utilizada para identificação dos eventos térmicos e da temperatura de máxima degradação ( $T_{\text{max}}$ ).

Para a combustão, os ensaios foram conduzidos sob atmosfera de oxigênio, mantendo-se as mesmas condições de aquecimento. A partir das curvas TG e DTG foram determinados a temperatura de ignição ( $T_i$ ), a temperatura final da combustão ( $T_f$ ), os tempos  $t_p$  e  $t_{ig}$ , bem como as taxas máxima e média de perda de massa. A  $T_i$  e a  $T_f$  foram definidas pelo critério de  $1\% \text{ min}^{-1}$  da taxa de perda de massa. Os índices de combustão (S) e de ignição ( $D_i$ ) foram calculados (Moon et al., 2013).

## 4.7 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R, versão 4.5.2 (R Core Team, 2023). Foram realizadas estatísticas descritivas para todas as variáveis analisadas, considerando as unidades experimentais correspondentes a cada árvore, para a madeira, e a cada carbonização, para o carvão vegetal. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk.

As análises inferenciais foram realizadas apenas para os estratos 1 e 3, uma vez que o estrato 2 apresentou apenas uma árvore amostrada. Logo, as médias destes estratos foram comparadas utilizando o teste t de Welch, com nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Assim, cada árvore dos estratos 1 e 3 foi considerada uma repetição independente para fins de análise estatística.

A relação entre as variáveis físicas, químicas e energéticas da madeira foi avaliada por meio da análise de correlação de Pearson. Para complementar a interpretação multivariada dos dados, foi realizada a análise de componentes principais (PCA), utilizando a matriz de correlação. Essa análise permitiu identificar os principais padrões de variação e avaliar a contribuição relativa de cada variável na formação dos componentes principais.

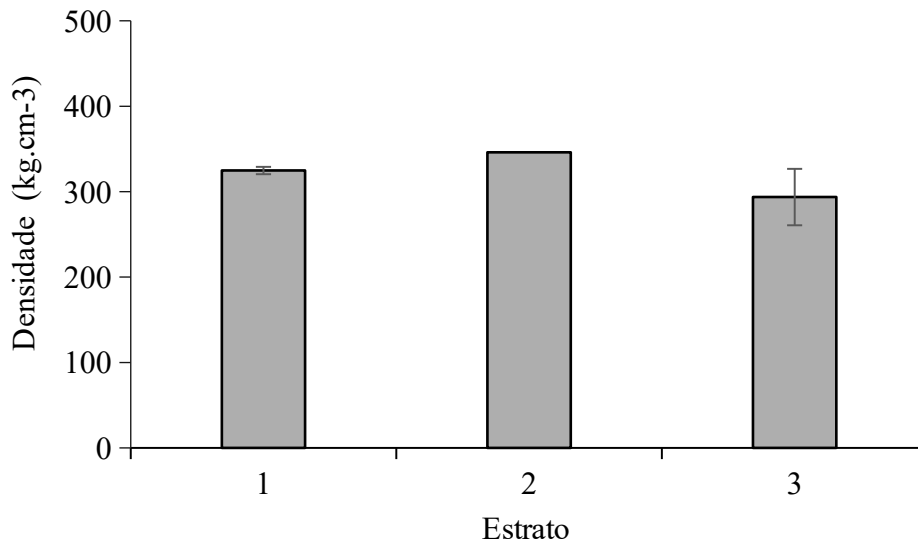
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Características físicas e anatômicas

#### 5.1.1 Densidade básica da madeira

Não foram identificadas diferenças significativas entre os estratos 1 e 3 quanto à densidade básica e ao teor de umidade da madeira de paricá. A densidade média básica variou entre os estratos, com valores de  $325 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $346 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $294 \text{ kg.m}^{-3}$  para os estratos 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 5).

**Figura 5** – Densidade básica do *Schizolobium amazonicum* em função dos estratos



Fonte: O autor (2026)

Torres et al. (2016) relatam que o espaçamento pode influenciar a densidade da madeira em função da competição entre indivíduos. No entanto, no presente estudo, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os estratos, apesar das variações de idade, espaçamento e presença de gado. Embora os valores médios tenham sido numericamente maiores nos estratos 1 e 2, essa variação não foi estatisticamente significativa, indicando comportamento semelhante entre os estratos quanto à densidade básica. Dessa forma, não é possível afirmar superioridade de um estrato em relação aos demais.

Em estudo com paricá em espaçamento de 4 x 4 m, Vidaurre et al. (2012) encontram densidades médias de 262 kg.m<sup>-3</sup> e 303 kg.m<sup>-3</sup> aos 5 e 11 anos, respectivamente, valores relativamente próximos aos obtidos no presente trabalho. Esse resultado indica que, nas condições avaliadas, foi possível atingir densidade similar ou superior em menor idade, o que pode representar vantagem silvicultural e energética para o produtor.

De acordo com a classificação proposta por Csanády et al. (2015), a madeira de paricá pode ser considerada muito leve. Considerando a variabilidade da densidade entre espécies, mesmo madeiras classificadas como de baixa densidade podem apresentar propriedades adequadas para produção de carvão vegetal, especialmente quando analisadas no contexto do aproveitamento de resíduos e da diversificação de usos da biomassa (Fortaleza et al., 2019). Embora autores como Vidaurre et al. (2012) questionem a viabilidade econômica do uso da madeira de paricá para a produção de carvão vegetal, os resíduos gerados pela sua exploração podem ser aproveitados, otimizando os processos de conversão.

Embora a literatura reporte que espaçamentos maiores favoreçam o aumento da densidade básica (Silva et al., 2021; Torres et al., 2016), os resultados do presente trabalho não seguiram esse padrão. Esse comportamento pode estar relacionado à própria composição dos estratos, que diferem não apenas quanto ao arranjo espacial, mas também quanto à idade das árvores e à presença de gado no sistema.

A densidade básica média geral encontrada neste estudo foi de 321 kg.m<sup>3</sup>. Modes et al. (2020) relatam valor semelhante, de 310 kg.m<sup>-3</sup>, para árvores de paricá com 14 anos em áreas de cultivo, indicando que, apesar da diferença de idade, os valores médios de densidade foram próximos. Por outro lado, Lobão et al. (2012) observaram densidades médias mais elevadas, variando de 424 a 510 kg.m<sup>-3</sup> em florestas em diferentes estágios sucessionais, possivelmente em função das condições ecológicas das áreas de ocorrência.

### 5.1.2 Biometria das fibras da madeira

Não foi observada diferença estatística entre os estratos para os parâmetros anatômicos estudados no presente trabalho. O comprimento médio das fibras, o diâmetro médio das fibras e do lúmen, foram de 1005,4 µm, 34,6 µm e 31,5 µm, respectivamente. A espessura média da parede foi de 3,1 µm, resultado em fração de parede média de aproximadamente de 18%, indicando que cerca de 82% de espaços vazios correspondentes ao lúmen (Tabela 4).

**Tabela 4** – Estatística descritiva das características morfológicas das fibras de madeira *S.amazonicum*

Estrato	C (µm)	D (µm)	DL (µm)	E (µm)	FP (%)
1	1028,0 ( <sup>±84,51</sup> ) a	34,7 ( <sup>±0,95</sup> ) a	31,6 ( <sup>±0,92</sup> ) a	3,1 ( <sup>±0,04</sup> ) a	18,2 ( <sup>±0,40</sup> ) a
2	1064,4	35,0	31,8	3,2	18,5
3	962,0 ( <sup>±120,67</sup> ) a	34,4 ( <sup>±0,68</sup> ) a	31,3 ( <sup>±0,71</sup> ) a	3,1 ( <sup>±0,04</sup> ) a	18,2 ( <sup>±0,51</sup> ) a
Média	1005,4	34,6	31,5	3,1	18,2
CV (%)	16,3	9,1	10,0	12,2	14,8

C = comprimento da fibra (µm); D = diâmetro da fibra (µm); DL = diâmetro do lúmen (µm); E = espessura da parede da fibra (µm); FP = fração de parede (%); CV = Coeficiente de variação.

Os valores observados entre os estratos foram semelhantes, indicando que o efeito do estrato não influenciou as dimensões das fibras. Nisgoski et al. (2012) encontraram fração de parede média de 21% pra *Schizolobium pahahyba*, enquanto Modes et al. (2015) reportaram valor de 18,71% para árvores de 15 e 14 anos para *S.amazonicum*. De acordo com IAWA, (1989), fibras com lúmen três vezes maior que a espessura da parede são classificadas como fibras de parede muito fina, característica associada a madeiras de baixa densidade.

A espessura da parede celular é um indicativo da quantidade de massa sólida por volume de madeira, influenciando diretamente a massa disponível para o processo de combustão (Paula, 2003). A densidade da madeira é influenciada principalmente pelas características anatômicas das células, como a espessura da parede celular e as dimensões do lúmen, bem como pela proporção dos diferentes elementos celulares (Janssen et al., 2020). No caso do paricá, a espessura reduzida da parede observada no presente estudo contribui para os baixos valores de densidade observados, característica típica de espécies de rápido crescimento.

O comprimento médio encontrado foi superior ao reportado por Eloy et al. (2024) para *Schizolobium parahyba*, com valor médio de 882,71  $\mu\text{m}$ , porém inferior ao encontrado por Silva et al. (2016) de 1191,96  $\mu\text{m}$  para o *S. amazonicum*. (Vidaurre et al., 2018) citam que o paricá possui comprimento médio da fibra similar ao de espécies comercialmente utilizadas no Brasil para fins tecnológicos, como *Eucalyptus* sp. e *Pinus*.

Apesar disso, em comparação com espécies de rápido crescimento, Melo et al. (2016) encontraram valores médios de comprimento de fibra de 875,5 e 886,2  $\mu\text{m}$  e fração de parede de 38,7 e 38,2% para espécies do gênero *Eucalyptus*. Embora essas espécies apresentem menor comprimento de fibra em comparação ao paricá, destacam-se pelos maiores valores de fração de parede, indicando maior proporção de material sólido nas fibras.

Vidaurre et al. (2018) ao avaliarem a anatomia da madeira de *S. amazonicum* em dois municípios do Estado do Pará, não observaram influência significativa do sítio nas dimensões das fibras. Em contra partida, Silva et al. (2016) e Lobão et al. (2012) verificaram em seus estudos sobre o paricá, em localidades diferentes em um mesmo Estado, o efeito do sítio, condição hídrica a até da qualidade genética das sementes como fatores que influenciam nas dimensões das fibras.

## 5.2 Composição química da madeira

### 5.2.1 Química molecular da madeira

A análise da química molecular do material mostrou que apenas o teor de extrativos apresentou diferença significativa entre os estratos, com maior valor médio no estrato 1, de 4,05%, e menor média no estrato 3, com valor de 3,6%. Não foram observadas diferenças significativas entre os estratos nos teores de ligninas (insolúvel, solúvel e total) e de

holocelulose. O teor médio de lignina total foi de 27,94%, enquanto o teor médio de holocelulose foi de 67,84%, com valores semelhantes entre os estratos avaliados (Tabela 5).

**Tabela 5** – Estatística descritiva da composição química molecular da madeira de *S.amazonicum*

<b>Estrato</b>	<b>Extrativos</b>	<b>Lignina solúvel</b>	<b>Lignina insolúvel</b>	<b>Lignina total</b>	<b>Holocelulose</b>
	----- % -----				
1	4,05 ( $\pm 0,04$ ) a	26,36 ( $\pm 2,90$ ) a	1,46 ( $\pm 0,01$ ) a	27,82 ( $\pm 2,90$ ) a	72,18 ( $\pm 4,02$ ) a
2	3,76	27,17	1,43	28,60	71,40
3	3,60 ( $\pm 0,16$ ) b	26,38 ( $\pm 3,08$ ) a	1,47 ( $\pm 0,08$ ) a	27,85 ( $\pm 3,03$ ) a	72,15 ( $\pm 4,20$ ) a
Média	3,82	26,48	1,46	27,94	72,06
CV (%)	6,44	9,66	3,73	9,12	3,54

Fonte: O autor (2026)

Apesar da diferença estatisticamente significativa para os extrativos entre os estratos 1 e 3, os valores observados ainda são considerados baixos. Vidaurre et al. (2018) reportam que a madeira de paricá apresenta baixo teor de extrativos em idades jovens, pois até os 11 anos ainda é classificada como juvenil.

Trugilho et al. (1996) observaram uma redução do teor de extrativos com o aumento da idade em *Eucalyptus saligna*, algo similar pode ser observado no presente estudo no estrato 3. O teor de extrativos apresenta relação positiva com o poder calorífico (Telmo, 2011) e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Protásio et al., 2014). Os extrativos possuem compostos orgânicos, principalmente fenólicos que contribuem diretamente para o aumento da energia liberada durante a combustão (Moulin et al., 2015).

Valores médios de lignina a partir de 28% para madeira podem ser considerados adequados para a produção de carvão (Pereira et al., 2012), demonstrando a viabilidade da madeira de paricá para esta finalidade.

Takahashi et al. (2021) e Vidaurre et al. (2012) encontram valores médios de lignina total para o paricá, similares aos encontrados no presente trabalho, de 26,16% e 29,5%, respectivamente. Vieira et al. (2023) consideram adequado o teor médio de lignina de 29,15% para seleção de clones de *Eucalyptus* sp. destinados a produção de energia, uma vez que a lignina contribui diretamente para o aumento do poder calorífico e para o rendimento na geração de bioenergia.

A lignina é o componente mais importante da madeira para aplicações bioenergéticas, contribuindo diretamente para o aumento do rendimento em carvão vegetal e do teor de carbono fixo, devido à sua estrutura aromática complexa, rica em carbono e mais resistente à degradação térmica (Protásio et al., 2022; Vidaurre et al., 2012). Dessa forma, os valores de

lignina semelhantes aos reportados para espécies comumente utilizadas na produção de bioenergia, reforçam o potencial de uso do paricá para esta finalidade.

Por outro lado, menores teores de holocelulose podem favorecer o uso energético da biomassa, uma vez que a celulose e as hemiceluloses apresentam menor estabilidade térmica e se decompõem em temperaturas mais baixas (Takahashi et al., 2021). Esse comportamento resulta em maior liberação de energia nas etapas iniciais da combustão, associada principalmente à liberação de voláteis, embora essa fração contribua menos para a formação de carbono fixo durante a degradação térmica (Vieira et al., 2023).

### 5.2.2 Composição química imediata da madeira

Não foi observado efeito significativo dos estratos sobre a composição química imediata da madeira. Os valores médios da composição química imediata de paricá foram de 83,23% para materiais voláteis, 16,33% para carbono fixo e 0,4% para cinzas (Tabela 6).

**Tabela 6** – Estatística descritiva da composição química imediata de madeira *S. amazonicum*

Estrato	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)
1	82,69 ( $\pm 0,48$ ) a	0,43 ( $\pm 0,48$ ) a	16,89 ( $\pm 0,02$ ) a
2	83,61	0,33	16,06
3	83,73 ( $\pm 0,54$ ) a	0,4 ( $\pm 0,51$ ) a	15,87 ( $\pm 0,04$ ) a
Média	83,26	0,4	16,33
CV (%)	0,82	10,54	4,02

TMV= teor de materiais voláteis; TCF= teor de carbono fixo; TCZ = teor de cinzas.

Resultados semelhantes foram encontrados por Takahashi et al. (2021) para a mesma espécie em um plantio de cinco anos, com médias de 80,48% de materiais voláteis, 18,90% de carbono fixo, 0,62% de cinzas. O teor de materiais voláteis representa a fração da biomassa que é liberada na fase gasosa durante o aquecimento e queima inicial do combustível, enquanto o carbono fixo corresponde à fração sólida remanescente, consumida de forma mais lenta durante a combustão. Teores mais elevados de carbono fixo tendem a prolongar o tempo de queima do material (Silva et al., 2021). Por outro lado, maiores conteúdos de materiais voláteis favorecem a ignição e a propagação da chama (Narita et al., 2018).

Os resultados obtidos neste estudo diferem dos encontrados para o *Schizolobium parahyba*, cujas médias foram de 76,25% para voláteis e 20,83% para carbono fixo (Narita et al., 2018). Em contraste, para clones de *Eucalyptus* sp., foram observadas médias entre 82,5% a 84,47% para materiais voláteis e entre 15,42 a 17,9% para carbono fixo (Vieira et al., 2023).

Os valores encontrados no presente trabalho mostram resultados típicos de espécies de rápido crescimento utilizadas para fins energéticos, indicando potencial para produção energética.

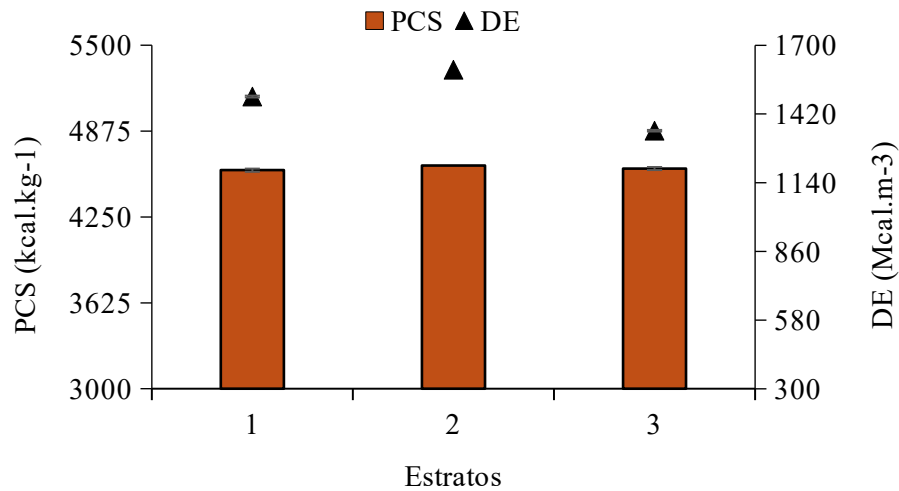
Embora o teor de cinzas não tenha diferido entre os estratos, pequenas variações numéricas podem estar associadas a fatores ambientais, como tipo de solo e regime hídrico. Por exemplo, Mogeia et al. (2023) reportam valores médios de cinzas variando entre 1,02 e 0,55% em *E. grandis* de mesma idade cultivados em sítios com diferentes tipos de solo e regimes de precipitação. De modo semelhante, Santos et al. (2013) registraram valores de 1,64% para catingueira e 1,3% para Imburana, enquanto valores mais baixos, como 0,19%, foram observados para madeira de pinus.

Baixos teores de cinzas são desejáveis, uma vez que este componente não contribui para a combustão e pode comprometer a operação do equipamento, dificultando a queima e aumentando o acúmulo de resíduos (Puri et al., 2024). O teor ideal de cinzas em biomassas para fins energéticos deve ser inferior a 5% (Santos et al., 2013).

### **5.3 Propriedades energéticas da madeira**

Não foram observadas diferenças significativas entre os estratos para o poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (DE) da madeira de paricá, de acordo com o teste t de Welch ( $p > 0,05$ ). Os valores médios de PCS foram semelhantes entre os estratos, com 4591 kcal.kg<sup>-1</sup> no estrato 1, 4625 kcal.kg<sup>-1</sup> no estrato 2 e 4603 kcal.kg<sup>-1</sup> no estrato 3. A densidade energética (DE) apresentou maior variação entre os estratos, com valor médio mais elevado no estrato 2, de 1600 Mcal.m<sup>-3</sup>. O estrato 1 apresentou valor intermediário, de 1490 Mcal.m<sup>-3</sup>, enquanto o estrato 3 apresentou o menor valor médio, de 1350 Mcal.m<sup>-3</sup> (Figura 6).

**Figura 6** – Poder calorífico superior e densidade energética da madeira de *S.amazonicum*



**Fonte:** O autor (2026)

Os valores de poder calorífico superior observados no presente trabalho apresentaram média de aproximadamente 4600 kcal.kg<sup>-1</sup>, próximos aos reportados na literatura para a espécie de estudo. Vidaurre et al. (2012) encontraram valor médio de 4652 kcal.kg<sup>-1</sup> para madeira de *S. amazonicum*, enquanto Narita et al. (2018) reportaram valor médio de 4513 kcal.kg<sup>-1</sup> para *Schizolobium parahyba*. Protásio et al. (2014) também observaram valores médios próximos para clones de *Eucalyptus* sp., com média de 4626 kcal.kg<sup>-1</sup>, evidenciando a proximidade dos resultados obtidos neste trabalho com espécies de rápido crescimento.

A baixa variação do PCS entre os estratos pode ser explicada pela semelhança dos resultados da composição química da madeira. Kulak et al. (2024) afirmam que o PCS é intrinsecamente dependente da composição química da madeira. No presente estudo, os teores de lignina, holocelulose, extrativos e carbono fixo foram semelhantes entre os estratos, explicando a baixa variação do PCS. Esses resultados indicam que a madeira de paricá apresenta perfil energético semelhante a espécies tradicionalmente utilizadas para fins energéticos, reforçando sua viabilidade para este fim.

Por outro lado, a densidade energética apresentou maior variação de valores entre estratos, embora não tenha apresentado diferença estatística significativa. A densidade energética é diretamente influenciada pela densidade básica da madeira. O estrato 2 apresentou valores maiores de densidade energética, em função da sua maior densidade, enquanto o estrato 3 apresentou menores valores. A densidade energética é importante para combustão direta, pois quanto maior a densidade energética do material, maior a

disponibilidade de energia, sendo até mais representativo que o poder calorífico do material para avaliar a viabilidade energética (Protásio et al., 2014).

Quando o objetivo é a utilização da madeira para fins energéticos, a densidade energética indica a madeira com maior quantidade de energia por volume, o que permite transportar maior quantidade de energia, reduzindo seus custos e facilitando o armazenamento (Protásio et al., 2021). Embora o paricá apresente densidade básica inferior à de espécies tradicionalmente utilizadas para energia, como *Eucalyptus*, seus valores de densidade energética podem ser considerados adequados para combustão direta, especialmente em aplicações locais, nas quais a facilidade de ignição e a rápida liberação de energia também são características desejáveis.

#### 5.4 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais revelou que as duas primeiras componentes principais explicaram 75,5% da variabilidade total dos dados, sendo 50,1% pela primeira componente principal (CP1) e 25,4% pela segunda componente principal (CP2) (Tabela 7; Figura 7). Dessa forma, as informações mais relevantes sobre as variáveis estudadas estão nos dois componentes.

**Tabela 7** – Análise de componentes principais da madeira de *S.amazonicum*

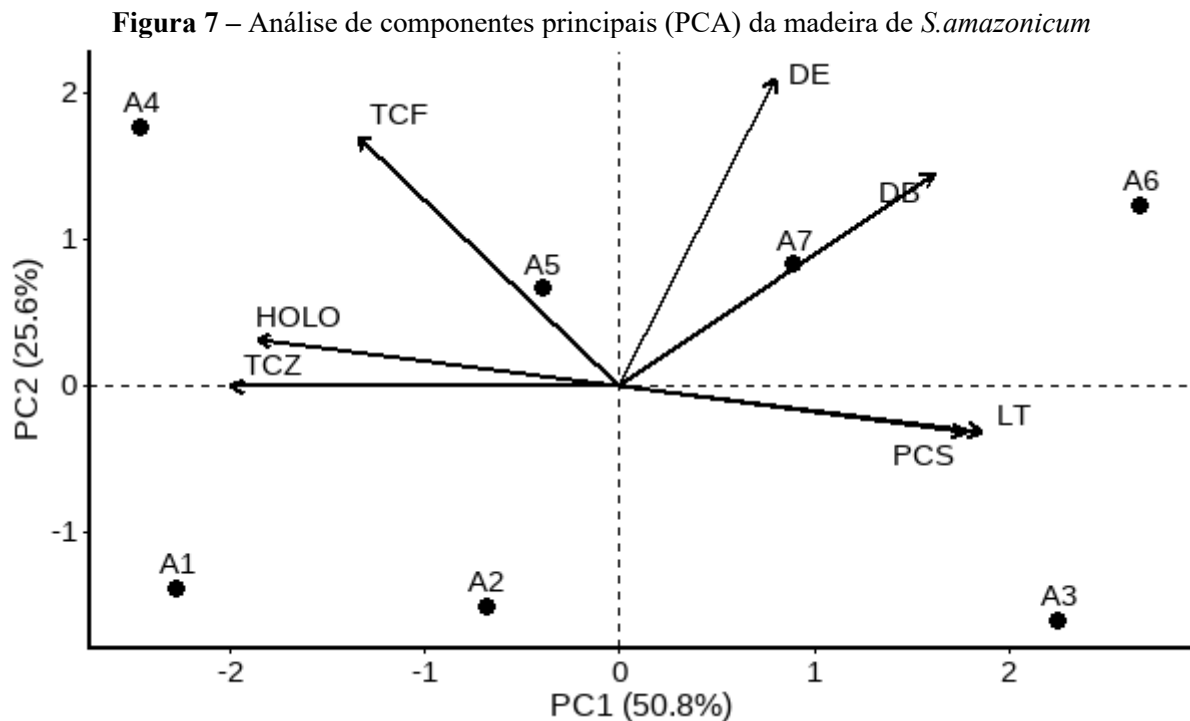
Variável	CP1	CP2
Densidade básica	0,7199	0,6039
PCS	0,7551	-0,2161
Densidade energética	0,3788	0,8721
Lignina total (LT)	0,8030	-0,1158
Teor de carbono fixo (TCF)	-0,5508	0,7674
Teor de cinzas (TCZ)	-0,8533	0,0702
Holocelulose (HOLO)	-0,7729	0,0342

CP1 = primeira componente principal; CP2 = segunda componente principal; PCS: Poder calorífico superior.

A CP1 apresentou correlação positiva com a densidade básica, o poder calorífico superior e o teor de lignina total, no entanto, apresentou correlação negativa com os teores de cinzas, holocelulose e carbono fixo. As árvores com maiores escores na componente principal 1 terão maiores valores de densidade e de lignina, diretamente associados ao aumento do poder calorífico da madeira, e menores teores de cinzas e de holocelulose.

Para a CP2, observou-se correlação positiva com a densidade básica e energética e com o teor de carbono fixo. Esse comportamento indica que, quanto maiores os escores da componente principal 2, maiores serão os valores de densidade e de carbono fixo, sendo dois parâmetros importantes para avaliar o potencial energético da biomassa.

A dispersão das árvores estudadas em função dos escores obtidos na análise de componentes principais pode ser observada na (Figura 7). As amostras com maiores valores de densidade básica, lignina e poder calorífico foram posicionadas no sentido positivo em ambos os componentes principais, com destaque para as árvores A6 (estrato 2) e A7 (estrato 1), que apresentaram as características mais adequadas para produção de energia.



Fonte: O autor (2026)

Por outro lado, as árvores A1 e A2 foram posicionadas no sentido negativo das componentes principais, indicando que apresentaram maiores valores de holocelulose e teores de cinza, o que afeta significativamente o seu potencial energético. A árvore A4 apresentou o maior teor de carbono fixo entre as árvores estudadas, porém, não acompanhou o eixo energético principal 1 (CP1).

A árvore A5 apresentou uma leve associação positiva com o segundo componente principal, indicando maior relação com o teor de carbono fixo. No entanto, apresentou menor associação com as variáveis densidade básica, poder calorífico superior e teor de lignina. A

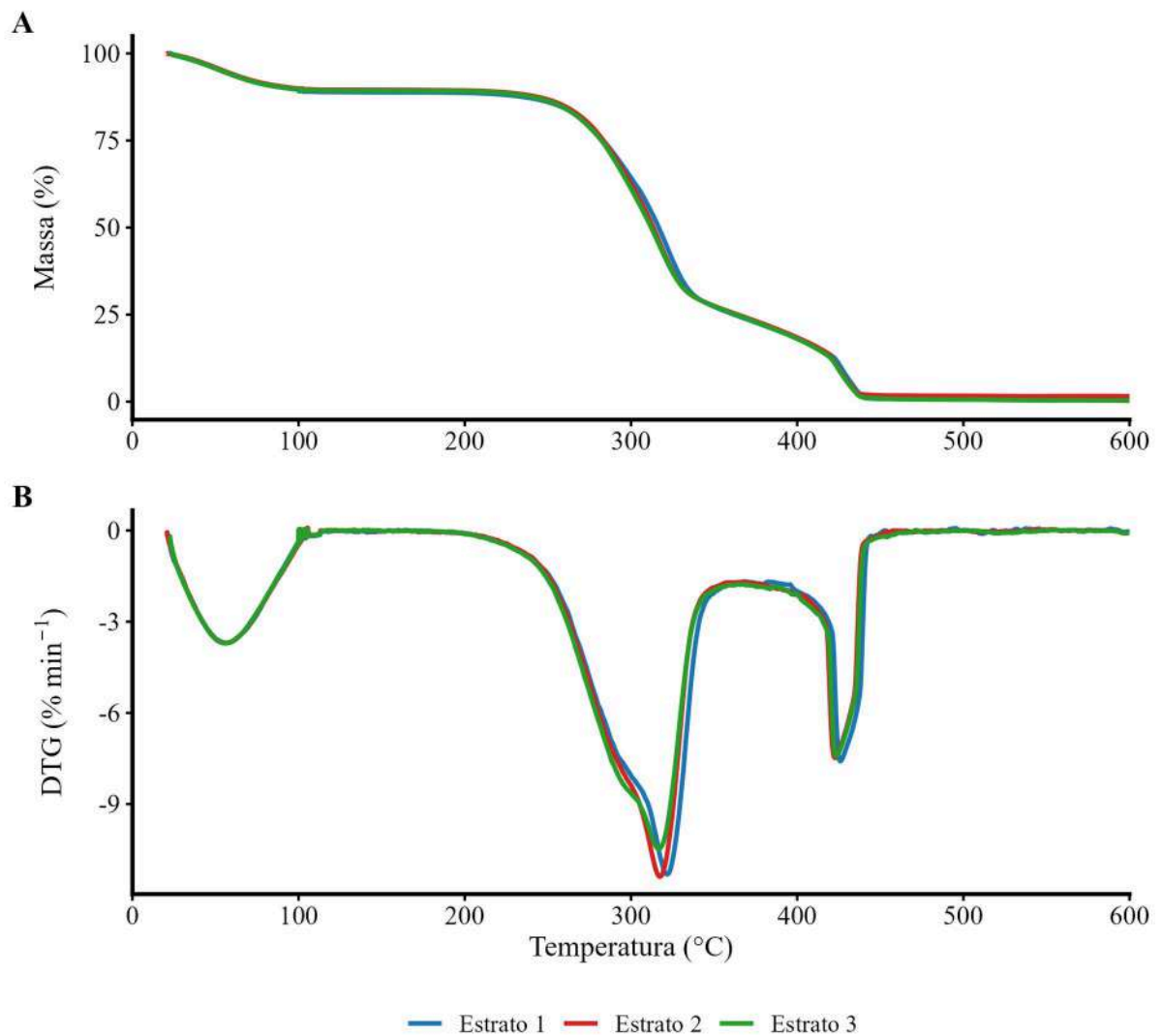
árvore A3 apresentou forte associação positiva com o primeiro componente principal, com forte associação ao poder calorífico.

A ausência de diferença significativa entre os estratos indica que as condições silviculturais avaliadas não influenciaram a formação estrutural da madeira em nível suficiente para alterar sua qualidade energética. Esse resultado sugere que o cultivo em sistemas silvipastoris não compromete o potencial energético da biomassa, reforçando sua viabilidade como fonte de energia.

### **5.5 Análise térmica da madeira**

A análise termogravimétrica da madeira de paricá em atmosfera de oxigênio evidenciou comportamento térmico semelhante entre os estratos avaliados (Figura 8).

**Figura 8** – Curvas de TG (A) e DTG (B) da madeira de *S.amazonicum* em atmosfera de oxigênio



Fonte: O autor (2026)

A combustão da biomassa pode ser agrupada em duas reações principais: inicialmente ocorre a volatilização dos constituintes da madeira e formação do carbono fixo e, posteriormente, a combustão desse carbono sólido formado nos estágios iniciais (García et al., 2012; López-González et al., 2013). No entanto, do ponto de vista termogravimétrico, três eventos térmicos podem ser identificados.

A primeira etapa ocorreu até aproximadamente 84,36 °C, com perda de massa de 10,69%, atribuída à evaporação da água e remoção de compostos voláteis de baixa massa molar, caracterizando a fase de secagem da biomassa (Yang et al., 2007).

O principal evento de degradação ocorreu entre 261,12 °C e 333,29 °C, quando a massa reduziu de 89,31% para 29,97%, correspondendo a uma perda de aproximadamente 59%. Nessa etapa, observou-se a maior taxa de degradação térmica, associada à

decomposição das hemiceluloses e da celulose, além da degradação parcial da lignina. A temperatura de máxima taxa de perda de massa ocorreu próxima de 300 °C, atribuída principalmente à degradação da celulose, principal constituinte químico da madeira (Tenorio Moya, 2013; Pereira et al., 2013). Segundo López-González et al. (2013), essa etapa corresponde à liberação e ignição dos voláteis, culminando na formação do carbono fixo.

A terceira etapa ocorreu entre 333,29 °C e 437,73 °C, com perda adicional de 28,75%, reduzindo a massa remanescente para aproximadamente 1,22%. Essa fase está associada à decomposição da lignina remanescente e à combustão do carbono fixo formado na etapa anterior. A menor perda de massa nessa faixa de temperatura deve-se à maior estabilidade térmica do material carbonáceo oxidado no estado sólido (Brand e Muñiz, 2010). Ao final do ensaio, cerca de 98% da massa inicial foi degradada até 600 °C.

A temperatura de ignição (Ti) apresentou média de 242 °C entre os estratos, indicando o início do primeiro estágio da combustão. A temperatura final da combustão (Tf) foi, em média, 439,3 °C, com variação reduzida entre os estratos (438 a 441 °C), evidenciando término semelhante do processo oxidativo. O tempo correspondente à máxima taxa de combustão (tp) foi de 55,73 min, enquanto o tempo de ignição (tig) foi de 48,47 min. A taxa máxima de perda de massa  $[(dm/dt)_{m\acute{a}x}]$  apresentou média de 11,07 % min<sup>-1</sup>, com valores ligeiramente superiores nos estratos 1 e 2 e menor no estrato 3, enquanto a taxa média  $[(dm/dt)_{m\acute{e}d}]$  manteve-se estável (4,40 a 4,43 % min<sup>-1</sup>). O índice de combustão (S) foi de  $0,97 \times 10^7$  %<sup>2</sup>/(min<sup>2</sup> °C<sup>3</sup>) e o índice de ignição (Di) de  $1,14 \times 10^3$  % min<sup>-3</sup> (Tabela 8).

**Tabela 8** – Parâmetros da combustão da madeira do *S.amazonicum*

Estrato	Ti (°C)	Tf (°C)	tp (min)	tig (min)	$(dm/dt)_{m\acute{a}x}$ (% min <sup>-1</sup> )	$(dm/dt)_{m\acute{e}d}$ (% min <sup>-1</sup> )	S ( $\times 10^7$ % <sup>2</sup> /(min <sup>2</sup> °C <sup>3</sup> ))	Di ( $\times 10^3$ % min <sup>-3</sup> )
1	243,0	441,0	55,90	48,50	11,30	4,40	0,99	1,16
2	242,0	438,0	55,90	48,70	11,40	4,43	1,00	1,16
3	241,0	439,0	55,40	48,20	10,50	4,42	0,93	1,09
Média	242,0	439,3	55,73	48,47	11,07	4,42	0,97	1,14

Ti = temperatura de ignição; Tf = temperatura final de combustão;  $(dm/dt)_{m\acute{a}x}$  = taxa máxima de perda de massa;  $(dm/dt)_{m\acute{e}d}$  = taxa média de perda de massa; S = índice de combustão; Di = índice de ignição.

Os valores de temperatura de ignição observados no presente trabalho estão próximos às temperaturas de degradação inicial reportadas por Protásio et al. (2022) para resíduos de palmeiras e espiga de milho, com valores de 230 e 258 °C, respectivamente. De acordo com

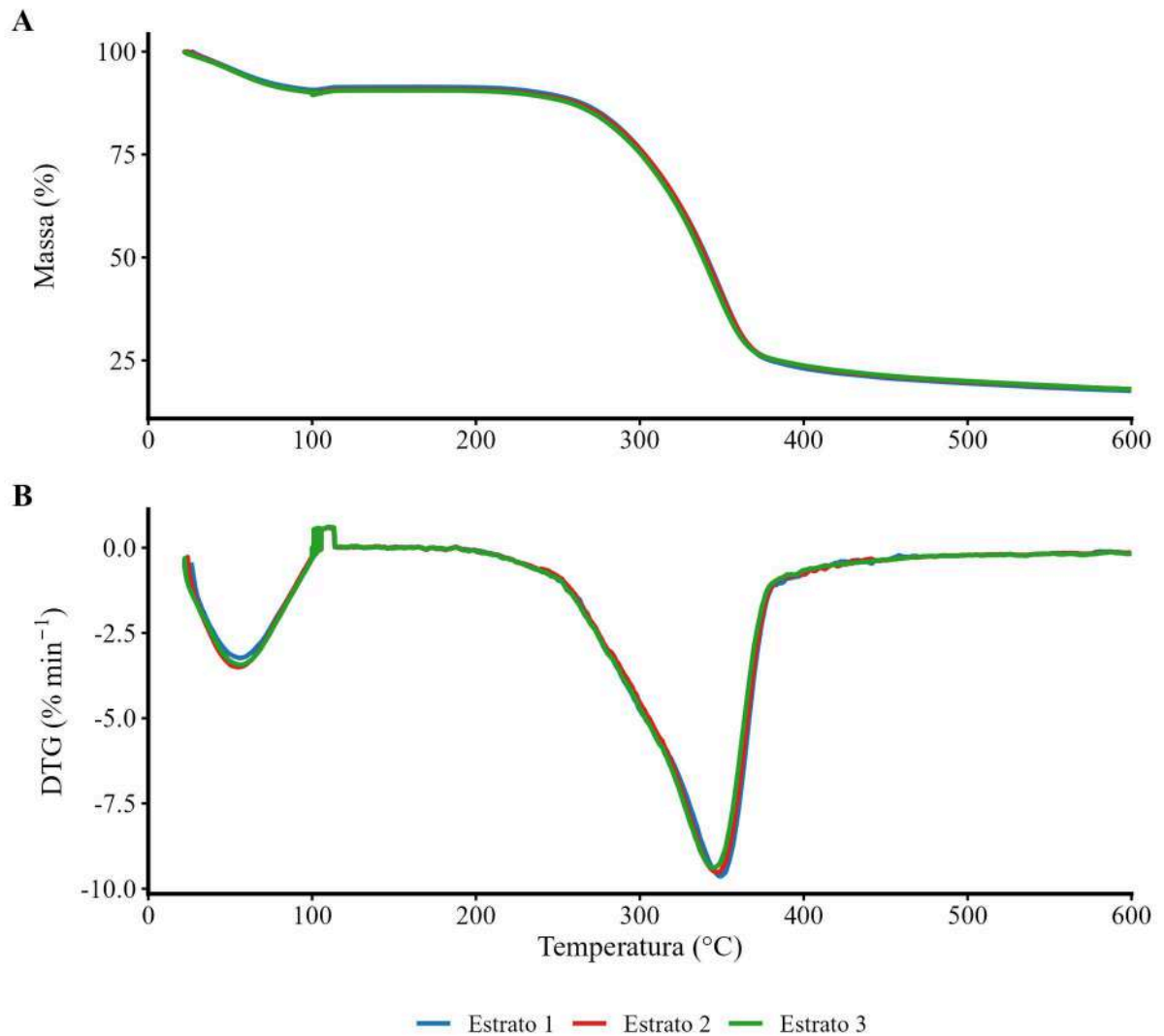
Leroy et al. (2006), quanto menor a temperatura de ignição, maior será a facilidade de início da combustão do combustível. Assim, o valor observado indica boa reatividade térmica da madeira de paricá, favorecendo sua utilização energética.

A temperatura final da combustão foi, em média, 439,3 °C. Esse parâmetro está associado à estabilidade térmica do combustível, sendo que temperaturas finais mais elevadas podem indicar maior resistência da fração sólida à oxidação. Segundo Tenorio e Moya (2013), a temperatura final de combustão pode apresentar relação com a composição química da madeira, especialmente com o teor de extrativos e lignina, componentes que influenciam a resistência térmica do material.

O tempo correspondente à máxima taxa de combustão ( $t_p$ ) foi de 55,73 min, enquanto o tempo de ignição ( $t_{ig}$ ) foi de 48,47 min, demonstrando perfil de queima relativamente estável ao longo do ensaio. O índice de combustão (S), com média de  $0,97 \times 10^7 \text{ \%}^2/(\text{min}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^3)$ , reflete a reatividade global da biomassa durante todo o processo de combustão (Xiong et al., 2014), enquanto o índice de ignição ( $D_i$ ), de  $1,14 \times 10^3 \text{ \% min}^{-3}$ , está relacionado à facilidade de início da queima. Os valores obtidos indicam comportamento térmico adequado para fins energéticos, reforçando o potencial da madeira de paricá como combustível sólido

A análise termogravimétrica da madeira de paricá em atmosfera de nitrogênio evidenciou comportamento térmico semelhante entre os estratos avaliados (Figura 9).

**Figura 9** – Curva de TG (A) e DTG (B) da madeira de *S.amazonicum* em atmosfera de nitrogênio



Fonte: O autor (2026)

As curvas TG e DTG em atmosfera de nitrogênio evidenciaram três estágios principais de degradação térmica da madeira, associados aos seus constituintes estruturais. O primeiro estágio ocorreu entre 30 e 100 °C, com perda média de massa de aproximadamente 8,6%, atribuída à remoção da água livre e de adesão presente na parede celular. Entre 100 e 200 °C, a perda foi de aproximadamente 1%, caracterizando uma zona de estabilidade térmica, na qual os componentes estruturais permanecem praticamente inalterados (Raad et al., 2006).

O principal evento de degradação concentrou-se entre 300 e 400 °C, faixa em que ocorreu a maior taxa de perda de massa, associada à decomposição da celulose. Esse pico indica que a maior parte das transformações térmicas responsáveis pela formação do material carbonáceo ocorre abaixo de 400 °C. Acima dessa temperatura, a degradação torna-se menos

intensa, sendo atribuída principalmente à decomposição gradual da lignina, com menores variações de massa.

A massa residual variou entre 15,1% e 16,2% entre os estratos avaliados, indicando comportamento térmico semelhante sob atmosfera inerte. O estrato 3 apresentou ligeiramente maior resíduo, sugerindo maior estabilidade térmica relativa. De modo geral, maiores massas residuais estão associadas a maior potencial de rendimento em carvão vegetal (Santos et al., 2012), o que está coerente com os resultados de carbonização observados.

Considerando que a maior perda de massa ocorreu abaixo de 400 °C e que acima dessa faixa as variações foram reduzidas, os resultados indicam que temperaturas de carbonização inferiores a 450 °C podem ser suficientes para a conversão térmica da madeira de paricá, sem ganhos expressivos com elevação adicional da temperatura.

Os valores percentuais de perda de massa nas diferentes faixas de temperatura, bem como a massa residual da pirólise da madeira de *S. amazonicum* sob atmosfera de nitrogênio, estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** – Parâmetros da análise térmica da pirólise da madeira do *S. amazonicum*

C	Faixa de temperatura (°C)						Massa residual
	30–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	
1	8,56	1,01	14,9	53,3	3,63	1,81	15,9
2	8,83	1,00	14,3	52,7	3,80	1,80	15,1
3	8,57	1,02	15,0	51,6	3,77	1,97	16,2

Fonte: O autor (2026)

Os valores de massa residual variaram entre 15,1% e 16,2% entre os estratos avaliados, indicando comportamento térmico semelhante sob atmosfera de nitrogênio. O estrato 3 apresentou o maior valor (16,2%), sugerindo ligeiramente maior estabilidade térmica, enquanto o estrato 2 apresentou o menor valor (15,1%). No entanto, as diferenças foram pouco expressivas, evidenciando que o estrato não exerceu influência marcante sobre a formação de resíduo carbonáceo até 600 °C. De modo geral, maiores massas residuais indicam maior estabilidade térmica e maior potencial de rendimento em carvão vegetal (Santos et al., 2012), o que está coerente com os resultados de carbonização observados neste estudo.

## 5.6 Rendimento gravimétrico da carbonização

Para os rendimentos do processo de carbonização, não foram observadas diferenças estatísticas entre os estratos avaliados. O rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) apresentou média de 30,5%, enquanto o rendimento em líquido pirolenhoso (RLP) foi de 47,85% e o rendimento em gases não condensáveis (RGNC) de 21,65%. O rendimento em carbono fixo (RCF) apresentou média de 23,35% e o rendimento energético com base no poder calorífico superior (REPCS) foi de 47,94% (Tabela 10).

**Tabela 10** – Estatística descritiva do rendimento gravimétrico do carvão de *S.amazonicum*

Estrato	RGC (%)	RLP (%)	RGNC (%)	RCF (%)	REPCS (%)
1	30,96 ( $\pm 0,47$ )	44,84 ( $\pm 2,85$ )	24,2 ( $\pm 2,60$ )	23,71 ( $\pm 0,36$ )	48,67 ( $\pm 0,73$ )
2	31,00 ( $\pm 0,50$ )	51,19 ( $\pm 6,20$ )	17,82 ( $\pm 6,67$ )	23,73 ( $\pm 0,39$ )	48,72 ( $\pm 0,79$ )
3	29,54 ( $\pm 1,59$ )	47,54 ( $\pm 7,30$ )	22,93 ( $\pm 8,89$ )	22,62 ( $\pm 1,21$ )	46,43 ( $\pm 2,49$ )
Média	30,5	47,85	21,65	23,35	47,94
CV (%)	3,69	11,93	29,62	3,69	3,69

RGC, RLP, RGNC e RCF = rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso, gases não condensáveis e carbono fixo, respectivamente; REPCS = rendimentos energéticos base PCS; CV = coeficiente de variação.

Os resultados de rendimento gravimétrico foram próximos aos encontrados por Vidaurre et al. (2012), que encontrou média de 35,2%, para madeira de *S.amazonicum* de plantios comerciais de cinco anos de idade. O estrato 2 apresentou valores ligeiramente superiores de lignina total, espessura da parede e densidade energética, o que pode estar relacionado ao maior rendimento gravimétrico em carvão. O rendimento gravimétrico pode ser influenciado muito mais pela temperatura final do processo de carbonização do que pelas propriedades da madeira (Andrade et al., 2018).

O rendimento em gases não condensáveis apresentou média de 21,65%, com maior valor no estrato 1 e menor no estrato 2. Como os teores de holocelulose foram semelhantes entre os estratos, os rendimentos em líquido pirolenhoso também apresentaram baixa variação, e podem variar conforme a decomposição térmica dos carboidratos da madeira (Yang et al., 2007).

O rendimento em gases não condensáveis apresentou comportamento complementar ao rendimento em líquido pirolenhoso, uma vez que ambas as frações são originadas da degradação térmica dos componentes menos estáveis da madeira, como hemiceluloses e celulose. A formação desses gases está diretamente relacionada à decomposição de compostos orgânicos de menor estabilidade térmica, resultando na liberação de produtos como monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves (Pereira et al., 2013).

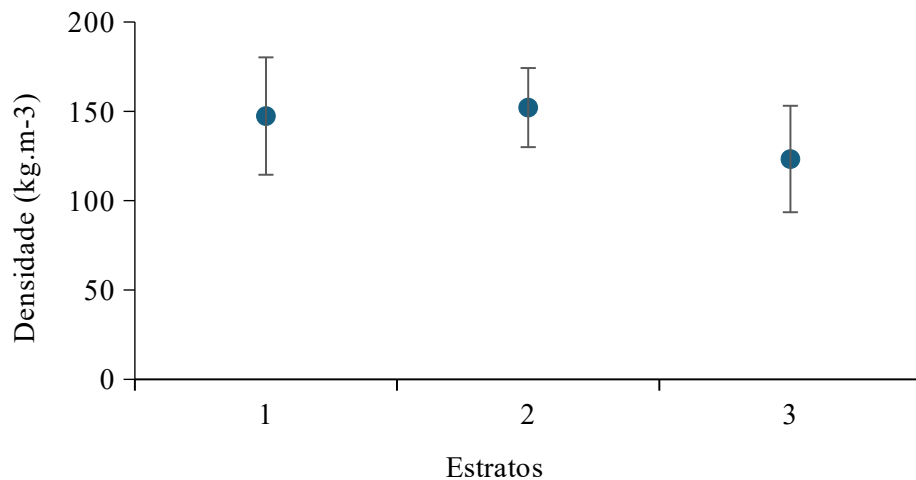
O rendimento em carbono fixo apresentou média de 23,35%, com valores variando entre 22,80% e 23,87% entre os estratos. O estrato 2 apresentou o maior valor médio, enquanto o estrato 3, o menor. Esse comportamento acompanha a pequena variação observada no rendimento gravimétrico do carvão vegetal e na composição química da madeira.

O comportamento semelhante entre os estratos é esperado uma vez que o rendimento em carbono fixo é o produto entre o rendimento gravimétrico e o teor de carbono fixo do carvão, que não apresentou variação significativa. Resultados próximos foram encontrados por Protásio et al. (2022) para clones de *Eucalyptus* sp., com valor de 25%, enquanto Vidaurre et al. (2012) encontram valor de 26,4%, próximos ao encontrado no presente artigo.

O rendimento energético, baseado no poder calorífico superior, apresentou média de 47,94%, com valores variando entre 46,65% e 48,80%, sem diferença significativa entre os estratos. O rendimento energético depende diretamente do rendimento gravimétrico e do poder calorífico do carvão vegetal, representando a eficiência da conversão energética da madeira em carvão (Protásio et al., 2014; Pereira et al., 2013).

## 5.7 Densidade aparente do carvão

A densidade média variou entre 123 e 152 kg.m<sup>-3</sup> entre os estratos avaliados. O estrato 2 apresentou o maior valor médio, de 152 kg.m<sup>-3</sup>, seguido pelo estrato 1, com 147 kg.m<sup>-3</sup>, enquanto o estrato 3 apresentou o menor valor médio, de 123 kg.m<sup>-3</sup>. Verificou-se que a maior dispersão de dados foi registrada no estrato 1, com coeficiente de variação de 33 kg.m<sup>-3</sup>, seguido por 30 kg.m<sup>-3</sup> no estrato 3 e 22 kg.m<sup>-3</sup> no estrato 2 (Figura 11).

**Figura 10** – Densidade do carvão

**Fonte:** O autor (2026)

A densidade aparente do carvão vegetal apresentou comportamento semelhante ao observado para a densidade básica da madeira, com valores próximos entre os estratos estudados. Esse resultado indica que a densidade do carvão está diretamente relacionada às características da madeira de origem, uma vez que a carbonização promove alterações químicas, mas preserva parcialmente a organização estrutural do material (Protásio et al., 2014; Pereira et al., 2013). Dessa forma, madeiras de menor densidade básica, como o paricá, tendem a originar carvões de menor densidade.

Vidaurre et al. (2012) encontraram densidade aparente média de 170 kg.m<sup>-3</sup> para carvões da mesma espécie, valor superior aos encontrados no presente trabalho, embora ambos os trabalhos tenham adotado temperatura final de carbonização de 450 °C. Dessa forma, a diferença observada pode estar associada às características da madeira utilizada, ao sistema de carbonização ou às condições operacionais do processo.

Ramos et al. (2024) relataram que a densidade aparente do carvão de espécies nativas variou entre 255 e 600 kg.m<sup>-3</sup>, enquanto para clones de *Eucalyptus* sp. os valores variaram entre 227 e 491 kg.m<sup>-3</sup>. A densidade do carvão encontrada no presente estudo foi baixa em comparação a outras espécies.

Assis et al. (2016) afirmam que, para produção de aço, são recomendados carvões a partir de 250 kg.m<sup>-3</sup>, abaixo disso, não é recomendado para indústria. Isso direciona o carvão do paricá para o uso doméstico. Além disso, carvões com maior densidade energética são

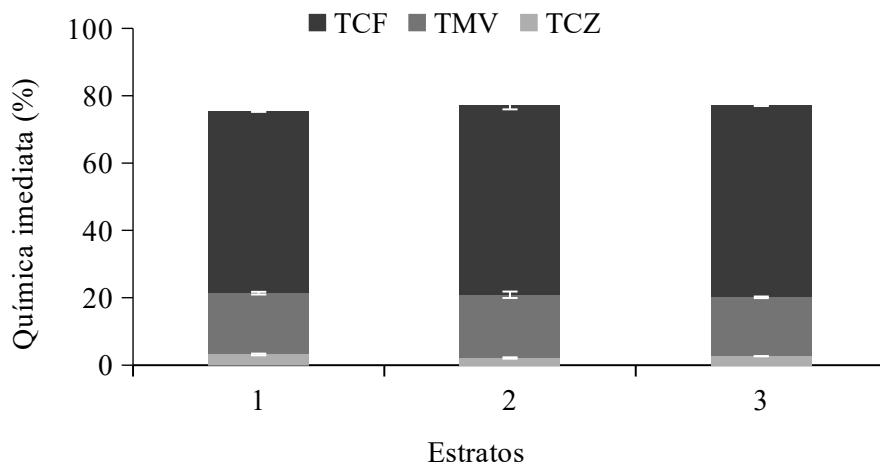
desejáveis, pois apresentam maior quantidade de carbono fixo, aumentando a produtividade e tempo de permanência no forno (Pereira et al., 2012).

A densidade do carvão vegetal e o rendimento gravimétrico são influenciados tanto pelas características anatômicas e físicas da madeira quanto pelos parâmetros adotados na carbonização. Madeiras com maior densidade básica tendem a originar carvões mais densos, embora o rendimento também dependa das condições operacionais do processo (Protásio et al., 2014). No caso do paricá, a baixa densidade básica da madeira contribui para a obtenção de carvão de menor densidade, característica comum em espécies de rápido crescimento (Vidaurre et al., 2012; Protásio et al., 2014).

### 5.8 Composição química imediata do carvão

Não foram observadas diferenças estatísticas na composição química imediata do carvão vegetal entre os estratos avaliados. O teor médio de materiais voláteis foi de 20,79%, com valores de 21,35% no estrato 1, 20,87% no estrato 2 e 20,14% no estrato 3. O teor de carbono fixo apresentou média de 76,57%, sendo observado valor de 75,50% no estrato 1, 77,01% no estrato 2 e 77,20% no estrato 3. O teor de cinzas apresentou média de 2,64%, com variação de 2,12% no estrato 2 a 3,15% no estrato 1 (Figura 12).

**Figura 11** – Composição química imediata do carvão



Fonte: O autor (2026)

Barros et al. (2023) encontram valores entre 28,05% e 38,15% para carvões produzidos de resíduos de madeiras amazônicas de diferentes densidades. Vidaurre et al. (2012) encontraram teor médio de carbono fixo de 75,8%, enquanto Oliveira (2025) reportou valores variando entre 74% e 78% para carvão produzido a partir da mesma espécie, indicando comportamento semelhante durante o processo de carbonização.

Resultados semelhantes também foram observados em espécies do mesmo gênero. Narita et al. (2018), ao avaliarem carvão vegetal de *Schizolobium parahyba*, encontraram teores médios de carbono fixo de 73,9% e de materiais voláteis de 23,6%, valores próximos aos observados no presente estudo. Esse resultado está associado às características comuns do gênero *Schizolobium*.

A quantidade de materiais voláteis no carvão influencia diretamente a sua quantidade de carbono fixo, que é responsável pela eficiência do carvão no processo de queima. O ideal é que o carvão vegetal apresente uma menor porcentagem de voláteis e elevado teor de carbono fixo, o que possibilita uma maior eficiência no processo (Lins et al., 2023).

Para clones de *Eucalyptus* sp., Protásio et al. (2014) observaram teores de carbono fixo variando entre 74% e 80%, com materiais voláteis entre 18% e 24%, valores próximos aos observados no presente estudo. Apesar de o *Eucalyptus* sp apresentar maior densidade básica que o paricá, o processo de carbonização resulta em carvão com composição química semelhante, evidenciando semelhanças entre espécies de rápido crescimento.

Os resultados obtidos para carbono fixo estão dentro da faixa considerada adequada para utilização na siderurgia. Segundo Silva e Ataíde (2019), o carvão vegetal destinado à indústria siderúrgica deve apresentar teor de carbono fixo entre 70% e 80%. A partir dessa faixa, encontram-se carvões de maior estabilidade térmica e maior capacidade de liberação de energia em forma de calor, o que favorece sua utilização como combustível.

O teor de cinzas do carvão seguiu a mesma tendência observada na madeira entre os estratos, sendo o estrato 1 o que apresentou maiores valores e o estrato 2 os menores. O teor de cinzas apresentou média de 2,64%, com o maior valor observado no estrato 1, de 3,15%, e o menor no estrato 2, de 2,12%. Embora haja aumento absoluto do teor de cinzas após a carbonização devido à concentração dos minerais, a variação relativa entre os estratos foi mantida.

O aumento do teor de cinzas no carvão vegetal, em relação à madeira, é atribuído à concentração de minerais inorgânicos durante o processo de carbonização. Os componentes orgânicos são degradados e liberados na forma de compostos voláteis, ocorre uma redução da

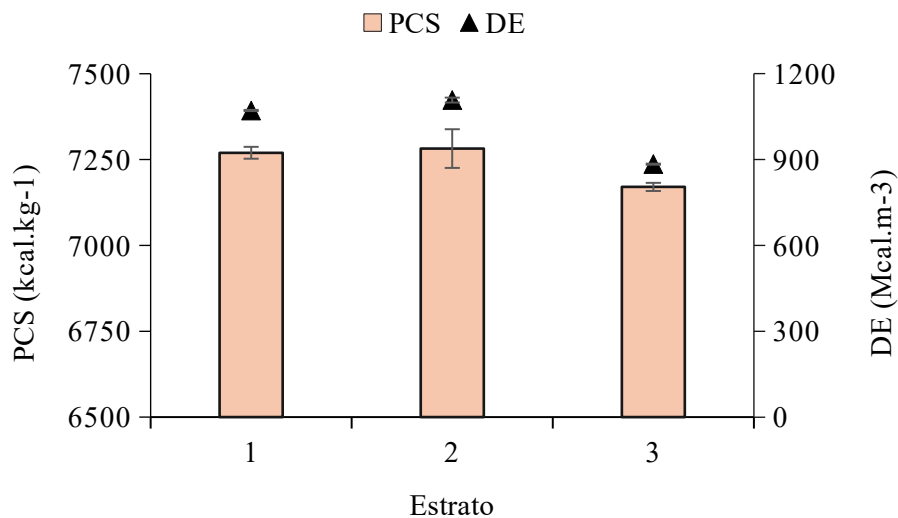
massa total e um aumento relativo da fração inorgânica, resultando em maior teor de cinzas no carvão vegetal (Olukunle et al., 2025).

Loureiro et al. (2021) afirmam que à medida que o aumento do teor de minerais no carvão, afeta o poder calorífico, uma vez que os minerais não participam da combustão, mas são contabilizados na massa do combustível.

## 5.9 Propriedades energéticas do carvão

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi de 7240,66 kcal.kg<sup>-1</sup>, com valores de 7170,44 kcal.kg<sup>-1</sup> no estrato 1, 7281,92 kcal.kg<sup>-1</sup> no estrato 2 e 7269,61 kcal.kg<sup>-1</sup> no estrato 3, indicando baixa variação entre os estratos. A densidade energética do carvão vegetal variou entre os estratos, com valores médios de 1071,24 Mcal.m<sup>-3</sup> para o estrato 1, 1107,75 Mcal.m<sup>-3</sup> para o estrato 2 e 884,04 Mcal.m<sup>-3</sup> para o estrato 3 (Figura 12).

**Figura 12** – Poder calorífico superior do carvão da madeira de paricá



Fonte: O autor (2026)

Os valores de poder calorífico superior do carvão vegetal observados no presente trabalho, com média de 7240,66 kcal.kg<sup>-1</sup>, estão de acordo com os reportados na literatura para a espécie. Vidaurre et al. (2012) encontraram um valor médio de 7313 kcal.kg<sup>-1</sup> para carvão vegetal de *S. amazonicum*, enquanto Narita et al. (2018) reportaram valores próximos a 7200 kcal.kg<sup>-1</sup> para carvão produzido a partir de *S. parahyba*. Esses resultados indicam que o carvão vegetal de paricá apresenta características energéticas semelhantes ao de outros gêneros.

Protásio et al. (2014) e Pereira et al. (2013) reportaram valores de poder calorífico superiores para o carvão vegetal, variando entre 7000 e 7500 kcal.kg<sup>-1</sup>, faixa considerada adequada para aplicações energéticas e industriais. Essa semelhança indica que, apesar da baixa densidade básica da madeira de paricá, o carvão vegetal produzido apresenta elevado conteúdo energético por unidade de massa.

O elevado poder calorífico do carvão vegetal está diretamente relacionado ao aumento do teor de carbono fixo e à redução dos teores de materiais voláteis e oxigênio, resultantes do processo de carbonização (Antal Jr. e Grønli, 2003; Protásio et al., 2014). No presente estudo, o teor médio de carbono fixo do carvão foi de 76,57%, o que contribui diretamente para o aumento do poder calorífico, uma vez que o carbono fixo representa a fração sólida responsável pela liberação de energia durante a combustão.

A densidade energética do carvão vegetal variou entre os estratos, com valores mais elevados observados nos estratos 1 e 2 e menor valor no estrato 3. Essa variação está associada principalmente à densidade aparente do carvão, uma vez que a densidade energética resulta da combinação entre o poder calorífico e a densidade do material. Estudos demonstram que carvões com maior densidade apresentam maior concentração de energia por unidade de volume, refletindo melhor desempenho energético volumétrico. Além disso, há forte correlação positiva entre densidade aparente e densidade energética do carvão, indicando que materiais mais densos tendem a disponibilizar maior quantidade de energia (Venega et al., 2023).

Comparando-se com a madeira, o carvão apresentou menores valores de densidade energética, indicando menor concentração de energia por unidade de volume após a carbonização. Esse resultado sugere maior potencial da madeira para uso como lenha, devido à maior disponibilidade energética volumétrica. Além disso, a madeira de paricá pode ser direcionada para outras aplicações energéticas, como geração de calor em caldeiras, produção de pellets ou briquetes, dentre outros. Por outro lado, embora menos vantajoso para combustão direta, o carvão pode ser mais adequado para outras aplicações, como produção de biocarvão ou carvão ativado, nas quais propriedades estruturais e químicas específicas são mais relevantes do que a densidade energética.

## 6 CONCLUSÃO

De modo geral, as propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* apresentaram baixa variação entre os

estratos avaliados. Esse resultado indica que, nas condições estudadas, as diferentes combinações de idade, espaçamento e presença de gado não resultaram em diferenças significativas na qualidade energética do material, não sendo possível, entretanto, isolar o efeito individual de cada fator.

Esse resultado é relevante do ponto de vista produtivo, pois sugere que o produtor pode optar pelo arranjo silvicultural mais rentável ou mais adequado ao sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, sem comprometer o potencial energético da biomassa.

A análise de componentes principais destacou que a densidade base e energética como os fatores que mais influenciaram positivamente no potencial energético da madeira. Por outro lado, o teor de cinzas e holocelulose influenciaram negativa o poder calorífico e potencial energético.

O rendimento gravimétrico foi similar ao encontrado na literatura, confirmando a viabilidade da conversão para discos maiores que 10 cm. Dessa forma, frações de menor diâmetro pode ser preferencialmente direcionadas para combustão direta.

O carvão vegetal apresentou menor densidade energética em relação à madeira, indicando menor concentração de energia por unidade de volume após a carbonização. Assim, a madeira de paricá mostra-se mais adequada para uso em combustão direta, como lenha, devido à maior disponibilidade energética volumétrica. Um uso alternativo do carvão vegetal do paricá seria como biocarvão ou carvão ativado, nas quais propriedades estruturais e químicas são mais relevantes do que a densidade energética

## 7 REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853: Madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona.** Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989: Pasta celulósica e madeira - determinação de lignina insolúvel em ácido.** Rio de Janeiro, 2010

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa**. Rio de Janeiro: 2017.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: carvão vegetal - análise imediata: método de ensaio**. Rio de Janeiro: 1986.
- ALVES, B. J. R.; MADARI, B. E.; BODDEY, R. M. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 1–4, 2017
- ALVES, J. L. F. et al. Determination of the bioenergy potential of Brazilian pine-fruit shell via pyrolysis kinetics, thermodynamic study, and evolved gas analysis. **Bioenergy Research**, v. 12, n. 1, p. 168–183, 2019.
- ANDRADE, F. W. C.; FILHO, M. T.; MOUTINHO, V. H. P. Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, p. 1–8, 2018.
- ARAÚJO, A. C. C. de et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, n. 90, p. 1–9, 2018.
- ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 3, p. 519–536, 2016.
- ASSMANN, J. M. et al. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 21–33, 2017.
- BAILIS, R. et al. Innovation in charcoal production: a comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 189–200, 2013.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. *Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta*. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2011.
- BEAUCHET, R.; MONTEIL-RIVERA, F.; LAVOIE, J. M. Conversion of lignin to aromatic-based chemicals (L-chems) and biofuels (L-fuels). **Bioresource Technology**, v. 121, p. 328–334, 2012
- BIANCHINI, D. C.; SIMIONI, F. J. Economic and risk assessment of industrial wood chip drying. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 44, p. 101016, 2021.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 619–628, dez. 2010.
- BRUNEROVÁ, A. et al. Tropical waste biomass potential for solid biofuels production. **Agronomy Research**, v. 15, n. 2, p. 359–368, 2017.
- BEHLING, M. et al. Effect of thinning eucalyptus trees on soybean productivity in integrated crop-livestock-forestry systems. **Ciência Rural**, v. 53, n. 9, p. e20220202, 2023.

- CANAL, W. D. et al. Impact of wood moisture in charcoal production and quality. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, p. 1-7, 2020.
- CARVALHO, P. C. F. Harry Stobbs memorial lecture: can grazing behavior support innovations in grassland management? **Tropical Grasslands – Forrajes Tropicales**, v. 1, p. 137–155, 2013.
- CHEAH, W. Y. et al. Pretreatment methods for lignocellulosic biofuels production: current advances, challenges and future prospects. **Biofuel Research Journal**, v. 7, n. 25, p. 1115–1127, 2020.
- CONGIO, G. F. S. et al. Improving the accuracy of beef cattle methane inventories in Latin America and Caribbean countries. **Science of the Total Environment**, v. 856, p. 159128, 2023.
- CORDEIRO, I. M.; SCHWARTZ, G.; BARROS, P. L. Efeitos do clima sobre o incremento diamétrico de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* – Fabaceae) em plantios comerciais. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 246–252, 2020.
- CORDEIRO, L. A. M. et al. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 15–43, 2015.
- CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. *Quality of machined wood surfaces*. 1. ed. New York: Springer Cham, 2015.
- ČUBARS, E.; POIŠA, L. Analysis of ash content in composite biomass fuels. In: **ENVIRONMENT. TECHNOLOGY. RESOURCES**, 11., 2017, Rezekne. Proceedings... v. III, p. 31–36, 2017.
- SILVA, M. G. da et al. Anatomical and physical studies of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* wood from native stands in Eastern Amazonia. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 293–301, 2016.
- DAMÁSIO, R. A. P. et al. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 75, p. 261–267, 2013.
- DELUCIS, R. de A.; SANTOS, P. S. B. dos; BELTRAME, R.; GATTO, D. A. Chemical and fuel properties of forestry wastes from pine plantations. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, p. e410507, 2017.
- DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105–111, 2002.
- DILKS, R. T.; MONETTE, F.; GLAUS, M. The major parameters on biomass pyrolysis for hyperaccumulative plants: a review. **Chemosphere**, v. 146, p. 385–395, 2016.
- DOMICIANO, L. F. et al. Agronomic and physiological responses of corn intercropped with palisadegrass growing in full sun or in a crop-livestock-forestry systems. **Grass and Forage Science**, v. 78, p. 501–514, 2023.

- DOS SANTOS SILVA, M. O. et al. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211–224, 2021.
- ELOY, E.; MANGINI, T. D. S.; NARDINI, C.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; SANTOS, A. D. dos. *Correlation of anatomy with physical properties of wood species from an agroforestry system*. *Revista Árvore*, v. 48, p. 1-11, 2024.
- FERREIRA, V. R. S. et al. Production and evaluation of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby briquettes. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1–14, 2020.
- FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, n. 10, p. 17–37, 1975.
- FORTALEZA, A. P. et al. Forest species biomass for the production of charcoal. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436–1451, 2019.
- GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, v. 103, p. 249–258, 2012.
- GOUVÊA, A. F. G. et al. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 6, n. 2, p. 71–78, 2015.
- IAWA COMMITTEE et al. IAWA list of microscopic features. **IAWA Bulletin n.s.**, v. 10, n. 3, p. 219–332, 1989.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2025**. Brasília, DF: IBÁ, 2025. Disponível em: <<https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf>>
- JANSSEN, T. A. J. et al. Wood allocation trade-offs between fiber wall, fiber lumen, and axial parenchyma drive drought resistance in neotropical trees. **Plant Cell Environ.**, v. 43, p. 965–980, 2020.
- JIA, Y. et al. Visualization of combustion phases of biomass particles: effects of fuel properties. **ACS Omega**, v. 6, p. 27702–27710, 2021.
- KULAK, P.; KOMOROWICZ, M.; LACHOWICZ, H. Fibre morphological characteristics, chemical composition and fuel properties of paulownia COTEVISA-2 wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 82, n. 5, p. 1605–1614, 2024.
- LEROY, V.; CANCELLIERI, D.; LEONI, E. Thermal degradation of ligno-cellulosic fuels: DSC and TGA studies. **Thermochimica Acta**, v. 451, n. 1–2, p. 131–138, 2006.
- BARROS, D. S. et al. Does the segregation of wood waste from Amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns? **BioEnergy Research**, v. 16, p. 1604–1617, 2023.
- LOBÃO, M. S. et al. Qualidade do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, Acre, Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 374–384, 2012.

- LÓPEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 562–574, 2013.
- LOUREIRO, B. A. et al. Carbonization gravimetric yield and qualitative characterization of charcoal from hybrid *Corymbia* spp. clones for industrial use. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.
- MIAN, I. et al. Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet. **Energy**, v. 199, p. 1–29, 2020.
- MODES, K. S.; JUNIOR, G. B.; VIVIAN, M. A.; SANTOS, L. M. H. Propriedades físico-mecânicas da madeira sólida de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 2, p. 989–995, 2020.
- MODES, K. S. **Caracterização tecnológica da madeira de Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke de florestas plantadas no estado de Rondônia**. Tese (Doutorado em Ciências, Programa: Recursos Florestais) — Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.
- MOGEIA, S.; MANHIÇA, A.; EGAS, A. Wood ash content variation in *Eucalyptus grandis* clones in Mozambique. **Silva Fennica**, v. 57, n. 1, p. 1–16, 2023.
- MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 20, n. 4, p. 848–889, 2006
- MOON, C. et al. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232–240, 2013
- MOREIRA, E. D. S. et al. Production efficiency and agronomic attributes of corn in an integrated crop-livestock-forestry system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 419–426, 2018.
- MOTA, V. A. **Integração lavoura – pecuária – floresta na recuperação de pastagens degradadas no norte de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) — Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2010.
- MOULIN, J. C. et al. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 199–208, 2015.
- MOYA, R.; RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, A.; PUENTE-URBINA, A. Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. **Thermochemica Acta**, v. 647, p. 36–46, 2017.
- MUNSHI, T. A. et al. Prediction of gross calorific value from coal analysis using decision tree-based bagging and boosting techniques. **Heliyon**, v. 10, p. 1–16, 2024.
- NARITA, D. K. et al. Use of *schizolobium parahyba* for energy purposes. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 758–764, 2018.
- NASSER, R. A. et al. Chemical analysis of different parts of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) using ultimate, proximate and thermo-gravimetric techniques for energy production. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 168–183, 2019.

- NEVES, A. H. B. et al. Biomassa e carbono em plantio comercial de paricá na Amazônia. **Nativa**, v. 10, p. 154–162, 2022.
- NISGOSKI, S. et al. Wood anatomical characteristics and paper resistance index of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake from experimental plant. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 203–211, 2012.
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and CO<sub>2</sub> of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280–285, 2017.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557–566, 2013.
- OLUKUNLE, O. et al. Evaluating the influence of carbonization on the essential properties of sawdust. **ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)**, v. 8, n. 3, p. 321–327, 2025.
- PARK, G. W. et al. Recent progress and challenges in biological degradation and biotechnological valorization of lignin as an emerging source of bioenergy: a state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157, p. 1–19, 2022.
- PARVEEN, S.; ULLAH, A. Diversity and assessment of economic plants of Tehsil Takht Bhai, district Mardan, Pakistan. **Ethnobotany Research and Applications**, v. 25, p. 1–15, 2023.
- PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia e papel. **Acta Amazonica**, v. 33, n. 2, p. 243–262, 2003.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1–8, 2012.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Effect of wood carbonization in the anatomical structure and density of charcoal from Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545–557, 2016.
- PEREIRA, E. G. et al. Pyrolysis gas burners: sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592–600, 2017.
- PEREIRA, M. P. C. F. et al. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 36, p. 269–275, 2016.
- PIOTTO, D.; MARQUES, J. R.; NUNES, A. Desempenho de espécies madeireiras em sistema agroflorestal de cacaueteiro e seringueira no sul da Bahia, Brasil. **Agrotrópica (Itabuna)**, v. 32, n. 2, p. 97–104, 2020.
- PORPATHAM, E.; RAMESH, A.; NAGALINGAM, B. Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. **Fuel**, v. 95, p. 247–256, 2002.

- PORTUGAL, T. B. et al. Methane emissions and growth performance of beef cattle grazing multi-species swards in different pesticide-free integrated crop-livestock systems in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 414, p. 1–9, 2023.
- PRESTON, K. A.; CORNWELL, W. K.; DENOYER, J. L. Wood density and vessel traits as distinct correlates of ecological strategy in 51 California coast range angiosperms. **New Phytologist**, v. 170, n. 4, p. 807–818, 2006.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, p. 4491–4508, 2022.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, 2014.
- PURI, L.; HU, Y.; NATERER, G. Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. **Frontiers in Fuels**, v. 2, p. 1–19, 2024.
- RAMOS, R. D. et al. Influence of basic density and chemical composition of wood on the carbonization process. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 4, p. 1–21, 2024.
- RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. L. A. Effects of torrefaction on energy properties of Eucalyptus grandis wood. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 446–452, 2009.
- ROMÃO, M.V.V.; MANSANO, V.F. *Schizolobium in Flora e Funga do Brasil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB78761>>.
- SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Revista UNINGÁ**, v. 29, p. 6–13, 2017.
- SANTOS, R. C. et al. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no Estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 491–502, 2013.
- SCHWARTZ, G. et al. Enrichment planting in logging gaps with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby: a financially profitable alternative for degraded tropical forests in the Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 390, p. 166–172, 2017.
- SEFAZ. **Boletim de Preços Mínimos de Mercado Completo**. Disponível em: [http://www.sefa.pa.gov.br/legislacao/interna/portaria/ps2005\\_00354an00.pdf](http://www.sefa.pa.gov.br/legislacao/interna/portaria/ps2005_00354an00.pdf).
- SEGERS, B. et al. Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process. **RSC Sustainability**, p. 3730–3749, 2024.
- SHARMA, A. et al. Economical concerns of lignin in the energy sector. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 1–20, 2021.

- SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509–516, 2019.
- SILVA, G. F. et al. Rendimento em laminação de madeira de paricá na região de Paragominas, Pará. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 447–455, 2015.
- SILVEIRA, R. et al. Custos da produção de madeira de paricá na região de Paragominas, PA. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 597–604, 2017.
- SOUSA, D. B.; CARVALHO, G. S.; RAMOS, E. J. A. **Paricá (*Schizolobium amazonicum*) Huber ex Ducke**. Belém: Rede de Sementes da Amazônia.
- SOUZA, L. L. P. et al. Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. **Energy Reports**, v. 7, p. 2574–2587, 2021.
- SOUZA, N. D. et al. Case study of a carbonization plant: evaluation of features and quality of charcoal aiming steel use. **Floresta e Ambiente**, v. 23, p. 270–277, 2016.
- TAKAHASHI, V. M. et al. Qualidade energética de resíduos madeiros paricá e pinus. **Energia na Agricultura**, v. 36, p. 230–238, 2021.
- TELMO, C.; LOUSADA, J. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1663–1667, 2011.
- TENORIO, C.; MOYA, R. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. **Thermochimica Acta**, v. 563, p. 12–21, 2013.
- TORRES, C. M. M. E. et al. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em sistemas agroflorestais. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 44, n. 109, p. 137–148, 2016.
- TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467–481, 2016.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94–116, 1996.
- TRUGILHO, P. F. et al. Energia da biomassa florestal. In: GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; ANDRADE, W. S. P. (Org.). **Engenharia madeireira: pesquisa e produção**. Seropédica: EDUR, 2017. p. 175–199.
- VENKATESH, G. et al. Agrosilvopastoral systems for improved crop and fodder productivity and soil health in the rainfed environments of South India. **Agricultural Systems**, v. 214, p. 1–14, 2024.
- VERAS, B. F. **Quantificação do rendimento em volume para laminação do paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) em sistemas de integração pecuária e floresta no município de Abel Figueiredo, PA**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2024.

- VERKASALO, E. et al. Extractives of stemwood and sawmill residues of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for biorefining in four climatic regions in Finland: phenolic and resin acid compounds. **Forests**, v. 12, p. 1–24, 2021.
- VICENTIN, P. G. et al. Longitudinal variation of wood basic density and anatomy of *Curatella americana* L. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 10, p. 20–25, 2021.
- VIDAURRE, G. B. et al. Anatomical and chemical properties of juvenile *Schizolobium amazonicum* wood. **Revista Árvore**, v. 42, n. 3, 2018.
- VIDAURRE, G. B. et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, p. 365–371, 2012.
- VIEIRA, T. A. S. et al. Impact of chemical composition on Eucalyptus wood clones for sustainable energy production. **Forests**, v. 14, p. 1–12, 2023.
- XIONG, S. et al. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 86–92, 2014.
- YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.
- ZEN, L. R. et al. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, p. 291–298, 2019.