



PATRÍCIA LEONÍDIA DOS SANTOS

**BALANÇO DE MASSA DA CARBONIZAÇÃO E
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE CARVÕES
VEGETAIS DE COPRODUTOS DO MANEJO FLORESTAL
SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA**

**LAVRAS – MG
2023**

PATRÍCIA LEONÍDIA DOS SANTOS

**BALANÇO DE MASSA DA CARBONIZAÇÃO E
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE CARVÕES
VEGETAIS DE COPRODUTOS DO MANEJO FLORESTAL
SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, como parte das exigências para obtenção do título de mestre.

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio – UFRA
Orientador

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho - UFLA
Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein - UFLA
Coorientadores

**LAVRAS – MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

dos Santos, Patrícia Leonídia.

Balanco de massa da carbonização e propriedades físico-químicas de carvões vegetais de coprodutos do manejo florestal sustentável da Amazônia / Patrícia Leonídia dos Santos. - 2023.
85 p. : il.

Orientador(a): Thiago de Paula Protásio.

Coorientador(a): Paulo Fernando Trugilho, Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Resíduos lenhosos. 2. Biorredutor. 3. Pirólise. I. Protásio, Thiago de Paula. II. Trugilho, Paulo Fernando. III. Hein, Paulo Ricardo Gherardi. IV. Título.

PATRÍCIA LEONÍDIA DOS SANTOS

**BALANÇO DE MASSA DA CARBONIZAÇÃO E
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE CARVÕES
VEGETAIS DE COPRODUTOS DO MANEJO FLORESTAL
SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA**

**MASS BALANCE OF CARBONIZATION AND PHYSICAL-
CHEMICAL PROPERTIES OF CHARCOAL FROM CO-
PRODUCTS FROM SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT
IN THE AMAZON**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, como parte das exigências para obtenção do título de mestre.

APROVADA em 17 de Julho de 2023.

Dr. Paulo Fernando Trugilho - UFLA

Dr. Lina Bufalino- UFRA

Dr. Edgar Amaral Silveira- UnB

Dr. Thiago de Paula Protásio – UFRA

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho - UFLA

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein - UFLA

Coorientadores

LAVRAS – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por me conceder saúde, sabedoria e perseverança durante toda a trajetória percorrida.

Ao meu amado avô, por sua sabedoria, apoio e encorajamento que foram fonte de inspiração ao longo da vida. Seus conselhos sempre atuaram como um farol para me guiar, e sou grata pelo amor, incentivo e momentos compartilhados ao longo da vida. E, saiba que você sempre será o número um do meu coração.

Ao meus pais e minha tia, Darci, Sueli e Maria de Fátima, por seu amor, apoio incondicional e confiança em mim. Suas palavras encorajadoras, incentivo constante e sacrifícios pessoais foram essenciais para que continuasse nesse caminho. Sou profundamente grato pelos valores que me transmitiram ao longo da minha jornada.

Aos meus tios e meu irmão Maria Aparecida, Raimundo, Mateus, Dacielly e Francielly por permanecerem sempre próximos, pelo incentivo, apoio e carinho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu professor e orientador, Dr. Thiago de Paula Protásio, pelos conhecimentos compartilhados, pela confiança, paciência, competência, atenção e apoio que foram inestimáveis.

Aos meus coorientadores, Dr. Paulo Fernando Trugilho e Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein, pelas sugestões e orientações no desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Michael Lima pelo apoio e pela contribuição durante a elaboração desta dissertação. Agradeço por compartilhar seu conhecimento e experiência, fornecendo insights valiosos que enriqueceram minha abordagem e análise.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos colegas do mestrado pelos momentos compartilhados.

A Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, CNPq (processo nº 406053/2022-7) e CAPES (código de financiamento 001), pela oportunidade de pesquisa.

Aos meus amigos, nosso vínculo e amizade se fortaleceram ao longo dos anos, e sua presença em minha vida tornou essa jornada ainda mais significativa. Obrigada por compartilhar risadas, apoio mútuo e momentos inesquecíveis. Que nossa conexão e amizade continuem a crescer. Sou grata por ter amigos tão incríveis ao meu lado.

RESUMO

Os coprodutos ou resíduos do manejo florestal sustentável na Amazônia são promissores para produção de carvão vegetal siderúrgico. No entanto, há uma lacuna na literatura sobre o desempenho do carvão vegetal desses coprodutos para finalidade siderúrgica e/ou industrial. O objetivo da pesquisa foi analisar a influência da qualidade dos resíduos do manejo florestal sustentável de amazônicas e da temperatura de carbonização nas propriedades físico-químicas dos carvões vegetais destinados a finalidade siderúrgica. A partir dos resíduos foram determinado as características químicas, física e energética das madeiras. As carbonizações foram realizadas em laboratório com quatro temperaturas finais (400, 500, 600 e 700°C). Foram avaliados os rendimentos gravimétricos do processo de carbonização. O carvão produzido foi caracterizado pela densidade relativa aparente, composição química imediata, propriedades energéticas, e o consumo específico (CE) foi calculado. Os resultados mostraram variações significativas para densidade básica da madeira (0,42-0,99 g/cm³), lignina total (22,78-40,68%), extrativos solúveis em acetona (0,25-8,08%), extrativos totais (2,45-12,01%), cinzas (0,36-1,91%) e poder calorífico (19,0 - 20,57 MJ/kg). Além disso, foi verificada ampla variação para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (31,66-39,41%). A densidade aparente do carvão vegetal variou de 0,37 g/cm³ a 0,66 g/cm³. O CE variou de 2,60 m³/ton a 7,09 m³/ton. Para o poder calorífico superior do carvão vegetal, ocorreu interação entre espécie e temperatura, sendo os maiores valores encontrados à temperaturas mais altas. A densidade energética foi maior em temperaturas mais elevadas, tendo variação de 11,53 a 20,99 GJ/m³. No estudo foi verificado que as análises da composição química e física são de extrema importância para a classificação de matéria prima para produção de carvão vegetal. Observou-se que temperaturas entre 400 a 500°C são adequadas para produção de carvão vegetal. Os resíduos das espécies *D. excelsa* e *M. elata* foram considerados mais adequados para produção de biotermorreduzidor, pois produziram carvões mais densos e com melhores propriedades energéticas. O estudo evidenciou que as propriedades da madeira são mais relevantes que a temperatura de pirólise, visto que na carbonização dos resíduos lenhosos de *M. elata* e a *D. excelsa* foram encontrados elevados rendimentos em temperaturas entre 600 a 700°C.

Palavras-chave: Resíduos lenhosos. Biotermorreduzidor. Características da madeira. Pirólise.

ABSTRACT

The co products or residues from sustainable forest management in the Amazon are promising for the production of steel charcoal. However, there is a gap in the literature on the performance of charcoal from these co-products for steel and/or industrial purposes. The objective of the research was to analyze the influence of the quality of residues from sustainable forest management in the Amazon and the carbonization temperature on the physical-chemical properties of charcoal destined for steelmaking purposes. From the residues, the chemical, physical and energetic characteristics of the wood were determined. The carbonizations were carried out in the laboratory with four final temperatures (400, 500, 600 and 700°C). The gravimetric yields of the carbonization process were evaluated. The charcoal produced was characterized by apparent relative density, immediate chemical composition, energetic properties, and the specific consumption (CE) was calculated. The results showed significant variations for basic wood density (0.42-0.99 g/cm³), lignin total (22.78-40.68%), acetone-soluble extractives (0.25-8.08%), total extractives (2.45-12.01%), ash (0.36-1.91%) and calorific value (19.0 - 20.57 MJ/kg). Furthermore, a wide variation was observed for the gravimetric yield in charcoal (31.66-39.41%). The apparent density of charcoal varied from 0.37 g/cm³ to 0.66 g/cm³. The EC ranged from 2.60 m³/ton to 7.09 m³/ton. For the higher calorific value of charcoal, there was an interaction between species and temperature, with the highest values being found at higher temperatures. Energy density was greater at higher temperatures, ranging from 11.53 to 20.99 GJ/m³. The study found that analyzes of chemical and physical composition are extremely important for the classification of raw materials for charcoal production. It was observed that temperatures between 400 and 500°C are suitable for charcoal production. Waste from the species *D. excelsa* and *M. elata* were considered more suitable for the production of biothermal reducer, as they produced denser coals with better energetic properties. The study showed that the properties of wood are more relevant than the pyrolysis temperature, since high yields were found in the carbonization of woody residues from *M. elata* and *D. excelsa* at temperatures between 600 and 700°C.

Keywords: Woody wastes. Biothermoreducer. Wood features. Pyrolysis. Thermochemical conversion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) de resíduos lenhosos da Amazônia brasileira em função da temperatura final de carbonização. As barras de erro referem-se ao desvio padrão.....	21
Figura 2- Estágios de combustão do carvão vegetal produzido a partir da madeira da espécie <i>Brachystegia spiciformis</i>	29
Figura 3- organograma da pesquisa.	44
Figura 4- Esquema do sistema de carbonização laboratorial.	47
Figura 5- Densidade básica da madeira. As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.	51
Figura 6- Composição química dos resíduos madeireiros colhidas em um PFMS na Amazônia brasileira. As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e o desvio padrão.	52
Figura 7- Poder calorífico superior de madeiras residuais por grupo de espécies. As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.	55
Figura 8- Balanço de massa dos rendimentos do carvão vegetal da <i>D. excelsa</i> (A), <i>M. elata</i> (B), <i>P. gigantocarpa</i> (C), <i>C. villosum</i> (D), <i>C. oblongifolia</i> (E), <i>A. giganteum</i> (F).	56
Figura 9- Rendimento gravimétrico de carvão vegetal dos resíduos madeireiros (A) e o efeito da temperatura final de carbonização no rendimento gravimétrico em carvão (B).	58
Figura 10- Rendimento em líquido pirolenhoso de resíduos madeireiros em função da temperatura final de carbonização.	59
Figura 11- Rendimento em gases não condensáveis (RGNC) de resíduos madeireiros em função da temperatura final de carbonização.....	60
Figura 12- Densidade relativa aparente (DRA) dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e correlação entre a densidade aparente do carvão vegetal (DRA) e a densidade básica da madeira (B). As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott.	63
Figura 13- Consumo específico (CE) dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização no CE (B). As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.	64
Figura 14- Análise dos materiais voláteis dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização no material volátil (B).	65
Figura 15- Análise do teor de cinzas dos carvões vegetais de madeiras residuais.	67
Figura 16- Análise do teor de carbono fixo dos carvões vegetais de madeiras residuais em função da temperatura final de carbonização.....	68
Figura 17- Análise do rendimento em carbono fixo dos carvões vegetais de madeiras residuais.....	70

Figura 18- Poder calorífico superior dos carvões vegetais de madeiras residuais.	72
Figura 19- Análise da densidade energética dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização nessa variável (B). Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância.	73
Figura 20- Análise da eficiência energética dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização (B). Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.	74
Figura 21: Análise do FVI em função da densidade básica das madeiras residuais (A) e FVI em função aos teores de lignina total e extrativos totais (B).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) de resíduos lenhosos de espécies nativas da Amazônia.....	20
Tabela 2- Análise Química Imediata do Carvão Vegetal.....	26
Tabela 3- Estudos recentes reportados na literatura relacionados a combustão de carvões vegetais	30
Tabela 4- Espécies selecionadas para o estudo.	45
Tabela 5- Análises de variância das propriedades do carvão de resíduos madeireiros derivados da Amazônia.	57
Tabela 6- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento do rendimento em líquido pirolenhoso produzido em escala laboratorial.....	60
Tabela 7- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécie para esclarecer o comportamento do rendimento em gases não condensáveis produzido em escala laboratorial.	61
Tabela 8- Análises de variância da densidade relativa aparente (DRA) e consumo específico (CE) do carvão vegetal de resíduos madeireiros.....	62
Tabela 9- Análises de variância da composição química do carvão vegetal de resíduos madeireiros.	65
Tabela 10- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento das cinzas.	68
Tabela 11- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento do carbono fixo.	69
Tabela 12- Análises de variância das propriedades energéticas do carvão vegetal de resíduos madeireiros.....	71
Tabela 13- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento do poder calorífico.	72
Tabela 14- Classificação energética do carvão vegetal de resíduos madeireiros.....	75

SUMÁRIO

1.0 Contextualização.....	12
2.0 Objetivo geral.....	14
2.1 Objetivos específicos.....	14
Capítulo 1 – Levantamento das pesquisas recentes relacionadas ao uso dos resíduos do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal.....	14
3.0 Revisão de literatura	14
3.1 Potencial energético dos resíduos do manejo florestal sustentável.....	14
3.2 Valorização energética dos resíduos do manejo: produção de carvão vegetal siderúrgico.....	17
3.3 Qualidade do carvão vegetal siderúrgico.....	24
3.4 Combustibilidade do carvão vegetal.....	27
4.0 Considerações finais	31
5.0 Referências	32
6.0 Capítulo 2 - Influência da temperatura final de carbonização e qualidade da madeira nas características físicas e químicas do carvão vegetal de resíduos de madeiras Amazônicas	42
7.0 Introdução	42
8.0 Material e métodos	44
8.1 Origem dos coprodutos madeireiros.....	44
8.2 Amostragem	45
8.3 Propriedades químicas e físicas das madeiras	45
8.4 Carbonização em escala de laboratório	47
8.5 Rendimentos da carbonização e qualidade do carvão vegetal.....	48
8.6 Análise dos dados	49
9.0 Resultados e discussão.....	50
9.1 Composição química e densidade da madeira dos coprodutos do manejo florestal.....	50
9.2 Rendimentos gravimétricos da carbonização	56

9.3 Densidade relativa aparente do carvão vegetal e consumo específico	61
9.4 Composição química do carvão vegetal	64
9.5 Propriedades energéticas, eficiência energética e classificação do carvão de resíduos madeireiros	70
10.0 Conclusões	76
11.0 Perspectivas futuras	76
12.0 Referências	77

1.0 Contextualização

Os combustíveis fósseis não são renováveis e são finitos. Por isso, diversos pesquisadores reportam sinais sobre o esgotamento dos combustíveis fósseis, especialmente diante do uso acentuado de petróleo, gás natural e carvão mineral pela sociedade. Estima-se, que as reservas mundiais de petróleo recuperável estejam reduzindo a uma taxa de 4 bilhões de toneladas/ano (SALEM, 2022). Presumindo que a diminuição dessas reservas continue a mesma com o passar dos anos, espera-se que essas reservas terminem até 2060. Outras reservas podem ser encontradas no decorrer desse tempo, o que estenderia um pouco mais o prazo. Logo, é de extrema importância buscar fontes alternativas de energias sustentáveis e renováveis (SALEM, 2022).

A biomassa está em evidência como recurso renovável, sendo possível utilizar diversas formas, para geração de calor, eletricidade, combustíveis e outros produtos. A biomassa oriunda de resíduos florestais e agrícolas é alternativa eficiente para a conversão em biocombustíveis, produtos químicos e energia (YOGALAKSHM et al., 2022). No Brasil, a biomassa madeireira é utilizada principalmente para produção de lenha e carvão vegetal destinado ao abastecimento dos altos fornos siderúrgicos (RODRIGUES; JUNIOR, 2019; ASSIS et al., 2016). Esse biotermorreduzidor é advindo de florestas plantadas, com participação de 94% da produção em 2021 (IBÁ, 2022). O consumo de carvão vegetal nas indústrias de ferro gusa e aço e ferro liga são, respectivamente, 4,25 milhões de toneladas e 731 mil toneladas (BEN 2022). Os principais polos consumidores estão localizados na região de Carajás e na região sudeste do Brasil (Minas Gerais e Espírito Santo).

Na região de Carajás, especialmente o estado do Pará, não se tem florestas plantadas suficientes para abastecer a demanda dessas indústrias. O Pará possui 170 mil hectares de eucalipto (IBÁ, 2022). Diante dessa deficiência de floresta plantada para abastecer o polo siderúrgico de Carajás são utilizadas fontes alternativas.

Nos planos de manejo florestal sustentável (PMFs) implantados na Amazônia são geradas grandes quantidades de resíduos florestais heterogêneos durante o processo de exploração de impacto reduzido. São produzidos aproximadamente 137,18 m³/ha de resíduos lenhosos na colheita das árvores selecionados no plano de manejo florestal da Amazônia (CRUZ FILHO; SILVA, 2009). Se considerarmos o volume de toras colhidas de 30 m³/ha, isso significa 4,5 vezes mais resíduos que toras retiradas e comercializadas. Essa biomassa pode ser reaproveitada para produção de energia elétrica para atender as termelétricas isoladas presentes na região Norte do Brasil e para a produção de carvão vegetal destinado ao uso siderúrgico (EPE, 2018).

A região de Carajás engloba os Estados do Maranhão e Pará, que produzem em conjunto 498.043 toneladas de ferro gusa, sendo o segundo maior polo siderúrgico do país (SINDIFER, 2021). A produção de carvão vegetal dessa região deriva de plantações florestais de eucalipto, resíduos de serraria e do manejo florestal sustentável. Pesquisas recentes verificaram as características da madeira de resíduos do manejo florestal para promover melhorias no sistema de produção e qualidade do biotermorreductor (LIMA et al., 2020a; PEREIRA et al., 2020). Outros estudos destinam-se a compreender a qualidade dos carvões vegetais produzidos a partir dos resíduos lenhosos do manejo florestal para finalidade siderúrgica e doméstica (LIMA et al., 2020b). Lima et al. (2020a) e Pereira et al. (2020) constataram em seus estudos que a separação dos resíduos em classes de qualidade é alternativa viável para promover maior produtividade e rendimento em carvão vegetal. Lima et al. (2023) analisaram o efeito do agrupamento da madeira com base nas suas características e constataram que a segregação dos resíduos lenhosos em classes de qualidade proporcionou aumento da massa, volume, produtividade e rendimento em carvão vegetal.

É importante ressaltar que o sistema e os métodos de controle utilizado na carbonização na região Amazônica são inadequados acarretando a produção de biotermorreductor heterogêneo. Além disso, a espécie e a temperatura final são fatores que afetam a qualidade final do carvão vegetal. A temperatura final provoca várias reações no decorrer da carbonização, resultando na produção de carvão vegetal com diferentes propriedades físicas e químicas (TRUGILHO; SILVA, 2001). Logo, ter conhecimento e compreender a relação entre essas variáveis é uma lacuna científica que precisa ser preenchida para melhorar a eficiência energética do processo de carbonização dos resíduos florestais da Amazônia, bem como melhorar a qualidade do biotermorreductor produzido.

Lima et al. (2022) realizaram a produção laboratorial de carvão vegetal em temperaturas finais de carbonização de 400°C a 700°C, indicando que a faixa de temperatura ideal para carbonização é de 400-500°C. No entanto, os autores não estudaram com detalhes a qualidade dos carvões vegetais produzidos e as variáveis do processo de carbonização que podem alterar o desempenho do biotermorreductor nos altos fornos siderúrgicos. A composição química do carvão vegetal é capaz de influenciar a eficiência do alto forno siderúrgico e afetar as propriedades físico-mecânicas do ferro gusa.

A presente dissertação está dividida em dois capítulos. O primeiro apresenta a revisão de literatura. O segundo capítulo aborda a qualidade da madeira e os efeitos da temperatura final e de espécie nas características do carvão vegetal.

2.0 Objetivo geral

- Analisar a influência da qualidade dos resíduos do manejo florestal sustentável de seis espécies amazônicas e da temperatura de carbonização nas propriedades físico-químicas dos carvões vegetais destinados a finalidade siderúrgica.

2.1 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito das propriedades físico-químicas dos coprodutos do manejo florestal sustentável da Amazônia e dos carvões vegetais derivados para aplicações em processos siderúrgicos.
- Determinar as relações entre as propriedades físico-químicas dos coprodutos do manejo florestal sustentável da Amazônia com as dos carvões vegetais derivados.
- Definir a melhor temperatura para carbonização de coprodutos do manejo florestal sustentável visando à maximização da produção de carvão vegetal com qualidade adequada para fins industriais.

Capítulo 1 – Levantamento das pesquisas recentes relacionadas ao uso dos resíduos do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal

3.0 Revisão de literatura

3.1 Potencial energético dos resíduos do manejo florestal sustentável

A redução de reservas de combustíveis fósseis, aliada ao rápido aumento da demanda energética, em consequência do crescimento populacional e o desenvolvimento tecnoindustrial e segurança energética são aspectos que tem disposto a sociedade à frente de grande desafio com relação ao fornecimento mundial de energia. Essa situação se torna a mais complicada ao se analisar as mudanças climáticas verificadas ao longo dos anos, acarretando, especialmente, pela liberação de gases poluentes que provocam o aquecimento da superfície do planeta (ARAÚJO et al., 2023). Os principais gases que contribuem para o efeito estufa são o dióxido de carbono (CO₂) e o gás metano (CH₄) (IPCC, 2013; IPCC, 2022). O acréscimo do acúmulo de CO₂ na atmosfera é predominante em comparação com outros gases, principalmente por causa da utilização de combustíveis fósseis, como derivados de petróleo. Com isso, a

diversificação da matriz energética e a viabilização tecnológica e econômica da utilização de fontes de energia com menor impacto ambiental são fortemente estimuladas.

A utilização da biomassa é opção viável e com conhecimento tecnológico suficiente para inserção imediata na cadeia de produção de bioprodutos e bioenergia, principalmente em países como o Brasil. As principais fontes de biomassa compreendem os resíduos agrícolas, florestais e culturas energéticas (HAQ et al., 2021). De acordo com dados do BEN (2022), a biomassa foi a quarta fonte na matriz elétrica com total de 8,2%, a partir da qual podem ser produzidos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos.

Neste aspecto, os resíduos florestais mostram-se como opção viável para fins energéticos, visto que ficam armazenados nos pátios das indústrias madeireiras ou na floresta. Em diversas situações, essa biomassa não é utilizada e isso pode provocar a produção espontânea de lixiviados e metano, dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes (NUMAZAWA et al., 2017). Os resíduos florestais são definidos como sendo todo material originado das árvores e que tipicamente, permanece no campo depois da exploração, como galhos, cascas e eventualmente toras (DIONÍSIO et al., 2022). Essa biomassa residual pode ser utilizada como insumo energético (LIMA et al., 2020a; LIMA et al., 2020b; LIMA et al., 2021). A utilização deste material lenhoso é prática conhecida e viável, comercialmente, em diversos países (HALL et al., 2005).

A utilização dos resíduos florestais gera benefícios à floresta e ao ambiente nos seguintes pontos: favorecimento do crescimento da floresta; diminuição dos riscos de incêndios e diminuição do uso de combustível de origem fóssil na geração de energia (LEINONEN, 2004). O aproveitamento dos resíduos pode ser verificado na esfera local, já que a utilização para fins energéticos possibilita a exploração e a valorização mais racionais. Além disso, aumenta os benefícios sociais, visto que a madeira como suprimento energético auxilia no crescimento rural (COUTO et al., 2004). Em 2020, o valor da produção atingido por meio da extração vegetal (produtos madeireiros e não madeireiros, ceras, oleaginosas e outros) cresceu 6,3%, com o total de R\$ 4,7 bilhões. O carvão vegetal, madeira em tora e a lenha, totalizaram R\$ 2,9 bilhões, com aumento de 14% para o carvão vegetal, de 5,2% para a lenha e queda de 4,2% para a madeira em tora proveniente de florestas nativas (IBGE, 2020).

Os insumos neutros em carbono contribuem para as emissões líquidas zero, que são capazes de recompensar as emissões de dióxido de carbono com sua remoção ou anulando as emissões de dióxido de carbono. Os combustíveis líquidos derivados de materiais naturais possuem menor quantidade de cadeias carbônicas em sua disposição que auxiliam na menor ou mínima quantidade de liberação de CO₂ no meio ambiente depois da combustão interna em

motor, logo, podem ser classificados como materiais neutros de carbono (SRIVASTAVA et al., 2021). Com base nisso, é importante a caracterização energética de espécies madeireiras, quando o objetivo é a utilização como fonte de combustível ou matéria prima para diversos processos termoquímicos.

Nos PMFs são geradas quantidades significativas de resíduos no processo de exploração de impacto reduzido. Em estudo realizado por Numazawa et al. (2017) foram avaliados os métodos de exploração com intensidades de corte de 30 m³/ha (L30) e 15 m³/ha (L15). Os autores constataram que a cada tonelada de tronco comercial colhido são produzidas 2,05 (L15) e 2,13 (L30) toneladas de resíduos madeireiros. Com relação ao volume, para cada 1 m³ de toras são gerados 0,8 t de resíduos (EPE, 2018), sendo capazes de fornecer 769 MW (BEN, 2022). Os resíduos são na maior parte derivados de galhos, restos de troncos e sapopemas (FRANCEZ et al., 2007). Além disso, as árvores que morrem depois da colheita ou por consequências naturais são fontes de biomassa, que teriam potencial de ser utilizadas economicamente pelas empresas florestais (DIONÍSIO et al., 2022).

O manejo florestal é relevante instrumento legal para o uso racional dos produtos florestais madeireiros e não madeireiros da região amazônica, regularizada pelo Código Florestal Brasileiro Lei nº 12.727/2012 (BRASIL, 2012). A instrução normativa nº 05 de 11 de setembro de 2015 regulamenta os planos de manejo florestal sustentável (PMFs) no Estado do Pará (PARÁ, 2015). Segundo o Código Florestal são permitidos à colheita de até 30 m³/ha de madeira em PMFS, com ciclo de corte de 30 anos, e diâmetro mínimo de corte no diâmetro à altura do peito (DAP) de 50 cm.

No estudo realizado por Dionísio et al. (2022), verificou-se que se o volume adicional de 15 m³/ha de árvores mortas fosse utilizado, a intensidade de corte para espécies de crescimento lento com dificuldades de regeneração poderia ser diminuída. Os autores verificaram que o volume de árvores mortas na área controle foi de 14,96 m³/ha, das quais 13,61 m³/ha (90,9%) teriam potencial para ser usados nas serrarias. As áreas exploradas apresentaram volume de árvores mortas oscilando entre 13,5 e 15,5 m³/ha, com média de 14,3 m³/ha, dos quais 77,7% poderiam ser reaproveitadas. No contexto da bioeconomia, o setor madeireiro é considerado uma das melhores opções para dinamizar economicamente a Amazônia, desde que seja implantado um sistema nacional de aproveitamento de recursos (ALMEIDA et al., 1996). Os galhos remanescentes nas florestas podem constituir em até mais 40% do volume total da árvore quando considera-se resíduo acima de 20 cm de diâmetro (RIBEIRO, 2013).

O Brasil tem posição de destaque mundial no que diz respeito à inovação da matriz energética. A projeção do potencial de biomassa para uso energético demonstra que há muito

espaço para avançar nesta questão. O desenvolvimento das cadeias energéticas apoiada na biomassa pode aumentar consideravelmente a oferta de energia renovável, por meio de diversos combustíveis, como biogás, biometano e lenha para geração elétrica. Além disto, como a maior parte do potencial está em dois grandes grupos, a indústria sucroalcooleira e a biomassa residual, o desenvolvimento apresenta vantagens competitivas excelentes. A biomassa residual apresenta vantagem com relação ao aumento da produtividade econômica e na atenuação de impactos ambientais (EPE, 2018).

3.2 Valorização energética dos resíduos do manejo: produção de carvão vegetal siderúrgico

O complexo Carajás, localizado entre os estados do Maranhão e Pará, é o segundo maior polo siderúrgico do Brasil. A produção na região equivale a 498.043 toneladas de ferro gusa, o que corresponde a 9,5% da produção nacional (SINDIFER, 2021). A instalação desse polo se deu devido à criação do Programa Grande Carajás (PGC), incentivado pelo Governo Federal em 1980. Atualmente, os municípios de Marabá (Pará), Breu Branco (Pará) e Açailândia (Maranhão) acumulam os principais investimentos siderúrgicos do polo. O reflorestamento nessa região é escasso, sendo necessário utilizar novas fontes alternativas e sustentáveis para produção de carvão vegetal.

No Brasil, as espécies do gênero *Eucalyptus* se destacam como a principal fonte cultivada, sendo 75,8% da área de cultivo, com 7,53 milhões de hectares. O restante da área de floresta plantada corresponde a 19,4% com espécies do gênero *Pinus* (1,93 milhão de hectares). Além desses cultivos, o setor possui aproximadamente 475 mil hectares plantados de outras espécies, como a seringueira, acácia, teca e paricá (IBÁ, 2022).

Destaca-se que em nível nacional as florestas plantadas participam com cerca de 94% na produção de carvão vegetal (PEVS, 2020). No entanto, o polo siderúrgico de Carajás apresenta área de florestas plantadas incipientes para atender a demanda, possuindo apenas 490.815 hectares de árvores plantadas, sendo 454.285 hectares de *Eucalyptus* (IBÁ, 2022), que na sua grande parte é designado para as indústrias de painéis e celulose. Por esse motivo, a produção de ferro gusa oriunda do polo siderúrgico de Carajás tem diminuído na última década.

Diante da falta de reflorestamento nessa região é necessário utilizar novas fontes alternativas e sustentáveis para produção de carvão vegetal. Nesse contexto, a utilização de resíduos (ou coprodutos) permite o suprimento das siderúrgicas e desenvolvimento socioeconômico regional. Além disso, a biomassa é fonte de energia renovável ecologicamente

correta devido ao teor não significativo de N e S em sua composição química e por ser considerada como fonte de emissão neutra de carbono (RUSSEL & KUMAR, 2017).

A demanda industrial por biotermorreductor, associada a poucas informações do comportamento termoquímico dos resíduos lenhosos da Amazônia, evidencia a necessidade de pesquisas tecnológicas que resultem em ganhos de produtividade e acréscimos de rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Iniciativas devem ser realizadas para permitir a compreensão do processo de carbonização dos coprodutos do manejo florestal de dezenas de espécies amazônicas. Conforme o Plano Nacional de Siderurgia (CGEE, 2015), uma forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa na siderurgia brasileira é aumentando o rendimento gravimétrico (RGC) e, conseqüentemente, a capacidade produtiva. Isso pode ser realizado pelo controle do processo de carbonização e pela segregação dos resíduos lenhosos do manejo florestal de inúmeras espécies arbóreas.

Trabalhos indicam que a qualidade do carvão vegetal desejado pela siderurgia possui relação direta com as características da madeira e do controle de carbonização (MENDES et al., 1982; SANTOS et al., 2011; CARNEIRO et al., 2011). As florestas energéticas e biomassas destinadas à produção de biotermorreductor devem apresentar madeira de média a alta densidade ($>0,5\text{g/cm}^3$), teores altos de lignina ($\geq 28\%$) e extrativos elevados ($\geq 1,8\%$), baixo teor de minerais ($< 1\%$) e fibras com parede celular mais espessa e de menor largura, para proporcionar elevado rendimento dos carvões gerados (TRUGILHO et al., 1997; PEREIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2011; ASSIS et al., 2016; LIMA et al., 2020a).

Na literatura encontram-se vários estudos sobre as propriedades dos coprodutos madeireiros amazônicos. Lima et al. (2020a) verificaram as propriedades físicas, químicas e energéticas dos resíduos de 20 espécies arbóreas da Amazônia. Os autores analisaram variações importantes para a densidade básica ($0,525\text{--}0,895\text{ g/cm}^3$), densidade energética ($9,4\text{--}16,8\text{ GJ/m}^3$), cinzas ($0,3\text{--}2,5\%$, base seca), extrativos totais ($1,8\text{--}17,9\%$, base seca), carbono elementar ($49,2\text{--}52,4\%$ base seca), lignina total ($30,2\text{--}38,1\%$, base seca livre de extrativos), carbono fixo ($16,5\text{--}22,0\%$, base seca), materiais voláteis ($76,7\text{--}82,8\%$ base seca) e poder calorífico superior ($19,1\text{--}20,9\text{ MJ/kg}$). Essas variações demonstraram a heterogeneidade das propriedades das madeiras residuais e indicam que há necessidade de separação/segregação das espécies com características similares para a produção de carvão vegetal mais homogêneo. De acordo com Silva et al. (2020), a densidade básica é uma das principais responsáveis por essa heterogeneidade das propriedades físicas e mecânicas do carvão vegetal produzido na Amazônia. A falta de segregação impacta negativamente a eficiência da conversão, o rendimento gravimétrico e a quantidade do carvão vegetal produzido (LIMA et al., 2021). Por

isso, é fundamental proceder à segregação dos resíduos do manejo para melhorar a produção deste importante combustível sólido industrial.

Diversos são os aspectos que afetam a produção de carvão vegetal da biomassa, sendo a espécie, dimensões da peça, tipo de forno e controle da temperatura (ASSIS et al., 2016). Em estudo elaborado por Pereira et al. (2020) foram analisadas as propriedades da madeira, com intuito de realizar o agrupamento de resíduos madeireiros florestais. Os autores encontraram variações significativas de densidade básica (0,221 a 0,867 g/cm³), teor de cinzas (0,23 a 2,09%, base seca), poder calorífico superior (18,64 a 21,22 MJ/kg) e densidade energética (14,56 a 4,69 GJ/m³). Nessa pesquisa, os resíduos foram segregados por meio das características físicas da madeira, umidade e densidade básica. Os resultados permitiram verificar que os resíduos possuem características favoráveis para a transformação em carvão vegetal mais homogêneo, possuindo propriedades melhores que as madeiras de eucalipto, desde que ocorra a separação da matéria prima lenhosa e aperfeiçoamento do sistema de carbonização.

No entanto, na Amazônia, o sistema mais utilizado na produção de carvão vegetal de resíduos é baseado em fornos de alvenaria do tipo rabo quente, que é método de baixo rigor tecnológico. Na prática, o processo é conduzido com base na cor e na quantidade de fumaça, e tato, em que a temperatura da parede do forno é verificada pelo toque (OLIVEIRA et al., 2019). Esse modelo de carbonização acarreta alguns problemas, como a baixa eficiência de conversão, baixa produtividade por forno, baixa eficiência energética, baixo rendimento (entre 15 e 25%, base úmida), carvão de qualidade variável (LIN, 2006; PELÁEZ-SAMANIEGO et al. 2008), longo tempo de resfriamento, alto teor de gases poluentes e difícil recuperação de subprodutos (OLIVEIRA et al., 2013; BUSTOS et al., 2018). Outros fatores que afetam o processo de carbonização são a matéria prima, temperatura final e tempo de residência, pois influenciam diretamente na qualidade do carvão vegetal e na produtividade da unidade de produção de biotermorreductor (TRUGILHO & SILVA, 2001; AMUTIO et al., 2012; SILVA et al., 2018).

Novos estudos devem discorrer sobre a carbonização e o efeito das características das espécies e da temperatura final sobre o balanço de massa desse processo termoquímico. Por exemplo, o estudo conduzido por Silva et al. (2020), que demonstraram decréscimo do rendimento com aumento da temperatura final de carbonização (Tabela 1), enquanto os teores de cinzas não foram influenciados pelos parâmetros de processo.

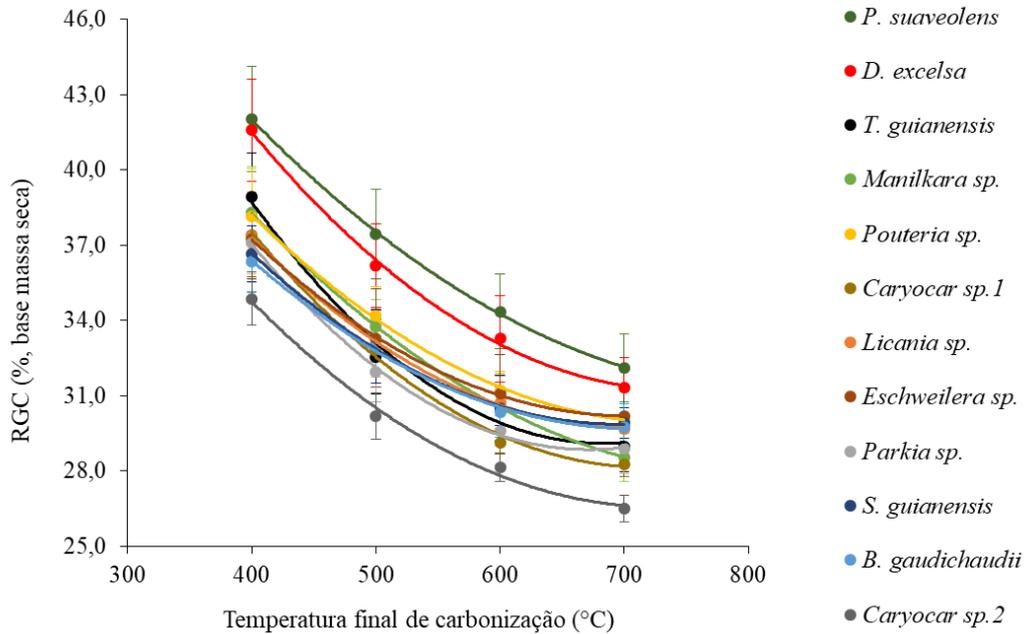
Tabela 1-Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) de resíduos lenhosos de espécies nativas da Amazônia.

Parâmetro	Temperatura (°C)	<i>Handroanthus serratifolius</i>	<i>Enterolobium shomburgkii</i>	<i>Hymenolobium petraeum</i>
RGC (%)	500	34,0	34,4	34,0
	600	33,0	30,8	31,0

Fonte: Silva et al. (2020).

Lima et al. (2022) analisaram o impacto da temperatura final na eficiência de carbonização e a densidade aparente do carvão vegetal de diferentes espécies amazônicas. Os autores verificaram que o RGC diminuiu com o aumento da temperatura final de carbonização, ocorrendo principalmente entre 400 e 500°C (Figura 1). As temperaturas entre 400°C e 500°C são ideais para a produção de carvão vegetal de resíduos de madeiras amazônicas. Essa faixa de temperatura proporcionou melhor desempenho, menor consumo específico de lenha e maiores benefícios ambientais e econômicos. Os resultados indicaram que o controle da carbonização é de extrema importância, pois influencia o RGC, sendo possível obter maiores produtividades. Os rendimentos das espécies *Dinizia excelsa* e *Manilkara elata* foram analisados nas temperaturas de 400°C a 700°C. Para *D. excelsa* foram encontrados valores de RGC de 41,85% (400°C) e 31,3% (700°C) e para *M. elata* valores de 38,3% (400°C) e 28,5% (700°C).

Figura 1- Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) de resíduos lenhosos da Amazônia brasileira em função da temperatura final de carbonização. As barras de erro referem-se ao desvio padrão.



Fonte: Lima et al. (2022).

Em outro estudo, realizado por Lima et al. (2020b), foram apresentadas as propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal produzido na temperatura final de 450°C. Os autores observaram correlação positiva ($r = 0,69$) dos extrativos totais com o RGC. Neste estudo o teor de lignina não se correlacionou com o RGC, mas isso não quer dizer que essa característica não seja importante na produção de carvão vegetal. Esse resultado foi atribuído aos elevados teores de lignina das biomassas analisadas (30,2-38,1 % base massa seca livre de extrativos). Além disso, os autores atribuíram o resultado a elevada variação encontrada nos teores de extrativos totais (1,8 a 17,9%). Nessa pesquisa, as razões H/C, O/C e N/C da madeira apresentaram correlação positiva com o teor de extrativos totais, sendo que isso indica a relevância dos componentes secundários presentes nos resíduos lenhosos para produção de carvão vegetal. De forma similar, Protásio et al. (2022) demonstraram a influência dos extrativos totais na carbonização de diferentes resíduos lignocelulósicos (*Euterpe oleracea*, *Theobroma cacao*, *Cocos nucifera*, *Elaeis guineensis* e *Zea mays*), sendo que as biomassas com maiores teores de extrativos totais possuíam maiores perdas de massa em temperaturas ≤ 300 °C. Por outro lado, o alto teor de extrativos solúveis em acetona aumentou a temperatura necessária para a degradação térmica inicial para o caroço de açaí (PROTÁSIO et al., 2022).

De forma similar, a relação de extrativos com RGC foi constatada por Araújo et al. (2018) avaliando madeira de *Cenostigma macrophyllum*, que apresentava 9% de extrativos totais, auxiliando no aumento do rendimento em carvão vegetal. Trabalhos realizados por Di Blasi (1998), Frederico (2009) e Loureiro (2016) tiveram rendimentos superiores em carvão vegetal a partir da carbonização de madeiras com maiores teores de extrativos totais.

O entendimento da composição química dos elementos da madeira é fundamental para avaliar sua qualidade, otimização da tecnologia no controle de qualidade dos processos de produção de carvão vegetal ou uso da madeira para fonte energética. A composição química simboliza um importante indicador de combustibilidade e comportamento termoquímico da madeira, pois quantifica os teores de extrativos, lignina, celulose e hemicelulose na madeira. Em particular o teor de lignina e extrativos fenólicos da madeira se destacam, pois auxiliam no acréscimo do poder calorífico superior (ZANUNCIO et al., 2014).

A lignina é formada por matrizes aromáticas que proporciona resistência e rigidez às paredes celulares das plantas. A lignina possui uma estrutura mais complexa que a celulose e as hemiceluloses (MASSUQUE et al., 2021), sendo formada por diferentes ligações que influenciam no comportamento da pirólise (WANG et al., 2017). A macromolécula de lignina tem maior estabilidade térmica em comparação às hemiceluloses e celulose (MA et al., 2019). A decomposição da lignina é mais complexa e passa por três etapas, a evaporação da água, formação de voláteis primários e, por fim liberação de moléculas gasosas (160-900°C) (GUO et al., 2010). O alto teor de lignina é preferível, pois apresenta maior teor de carbono em sua estrutura em relação à celulose e hemiceluloses (YANG et al., 2007). Consequentemente, proporciona maior estabilidade térmica (WANG et al. 2017) e maior rendimento de carvão vegetal (Araújo et al. 2016).

Devido a sua complexidade é de grande importância avaliar a composição da lignina quanto à quantidade de unidades guaiacil (G) e siringil (S) e a relação S/G (PROTÁSIO et al., 2019). Para produção de carvão vegetal, é recomendado que a biomassa possua alto teor de lignina e menor relação S/G. A matéria prima com maior proporção de unidade S na lignina sofre degradação mais acentuada em faixas de temperaturas mais baixas (<300°C), enquanto a maior proporção de unidades G implica em degradação mais acentuada da madeira entre 300-450°C (MASSUQUE et al., 2021).

A diferenciação dessas unidades é referente a quantidade de grupos metoxílicos ($-O-CH_3$) nos anéis aromáticos. Esse grupo vai impactar diretamente na quantidade de sítios ativos na unidade fenilpropano e a estabilidade térmica da lignina (PEREIRA et al., 2013). A unidade de S apresenta apenas dois sítios ligados a átomos de carbono, a quantidade de ligações éter

(C–O–C) é maior (WANG et al., 2017). Esse tipo de ligação é facilmente fragmentada (WANG et al., 2017), assim, ligninas que possuam maior proporção de unidades S são menos resistentes à degradação térmica no decorrer da pirólise (PROTÁSIO et al., 2021). Em contrapartida, a unidade G apresenta três sítios ativos ligados a átomos de carbono e, assim, possui menor proporção de ligações éter (C–O–C) e maior número de ligações carbono-carbono (PROTÁSIO et al., 2021).

Os extrativos são encontrados em pequenas quantidades na biomassa, não contribuem na constituição das paredes celulares ou camadas celulares e, portanto, são componentes não estruturais. Por apresentarem em pequenas quantidades na biomassa em relação aos outros componentes, as vezes o seu estudo é ignorado (WANG et al., 2017). Porém, os extrativos são capazes de influenciar o comportamento da pirólise e as propriedades do líquido pirolenhoso, principalmente se carbonizar madeiras com alto teor de extrativos (PEREIRA et al., 2013; MELZER et al., 2013; LIU et al., 2009). Os extrativos são formados por ceras, gorduras, resinas, taninos, açúcares, amidos e pigmentos (WANG et al., 2017). Esses elementos são classificados em compostos alifáticos, terpenos e terpenóides, e compostos fenólicos (HART, 1989; ANÃS et al., 1983; OASMAA et al., 2003). A quantidade desses compostos varia de acordo com o tipo e localização da madeira (OASMAA et al., 2003; BROWN et al., 2003; PAN et al., 2013).

A decomposição de extrativos ocorre em maior quantidade na faixa de 150-600°C, havendo diminuição na faixa de 600-800°C. Em baixas temperaturas a degradação térmica dos extrativos produz água, CO e CO₂, e em altas temperaturas ocorre a liberação de fenóis e craqueamento secundário de produtos de metanol e metano (GUO et al., 2010). Porém, grande parte dos extrativos são termicamente instáveis, provocando um pico em baixa temperatura nas curvas DTG. Em estudo realizado por GUO et al (2010), os autores verificaram que a energia de ativação para pinheiro da Mongólia e freixo da Manchúria foi de 104,37 e 85,07 kJ/mol, respectivamente, ocorrendo aumento para 119,38 e 109,15 kJ/mol depois da remoção de extrativos. Logo, pode-se sugerir que os extrativos proporcionaram maior atividade dos componentes e decomposição de compostos estruturais. Além disso, os extrativos provocaram a distribuição diferente do produto. O aumento do teor de extrativos promoveu maior rendimento de líquidos e diminuiu o rendimento de carvão e gás (MELZER et al., 2013). Guo et al. (2010) verificaram que a biomassa sem extrativos produziu produtos de pirólise em temperatura mais baixa em relação a biomassa bruta. A matéria prima sem extrativos produziu mais água, CO₂, CO e aldeídos, e menos ácidos e alcanos, em relação a biomassa bruta (WANG et al., 2017).

Em conjunto com a lignina, os extrativos fenólicos possuem menos oxigênio em sua constituição e estruturas complexas com mais carbono, em relação aos polissacarídeos (ARAÚJO et al., 2018). A presença desses extrativos proporciona carvão vegetal de maior densidade e resistência (TRUGILHO; SILVA, 2001). Os extrativos solúveis em acetona possuem faixa de degradação térmica entre 250-505°C, contribuindo para o aumento da produção de carvão vegetal (AMUTIO et al., 2012). Várhegyi et al. (2004) demonstraram reduções no conteúdo de carbono fixo e no rendimento em carvão vegetal após remoção de extrativos da madeira. Portanto, para a produção de biotermorreductor recomenda-se madeiras com elevado teor de extrativos de natureza fenólica.

Diante dos estudos anteriores, é possível observar que o teor de extrativos e a lignina são características muito importantes na avaliação da qualidade da madeira, pois pode explicar as diferenças no balanço de massa na carbonização dos resíduos lenhosos do manejo florestal sustentável. Além disso, conhecimento sobre a faixa de variação de temperatura alcançada na carbonização de resíduos auxiliará no controle de qualidade do carvão vegetal, na distribuição de matéria prima adequada para o uso siderúrgico e na otimização e modernização dessa atividade. Tendo conhecimento da temperatura será possível melhorar a produtividade das unidades de produção de biotermorreductor.

3.3 Qualidade do carvão vegetal siderúrgico

Uma das maiores dificuldades detectadas pelos consumidores de carvão está relacionada à heterogeneidade do produto por causa da falta de domínio das variáveis do processo de produção florestal e de carbonização. Porém, ter uma gestão de qualidade não representa apenas o controle de produção, qualidade das características de bens e serviços, aplicações isoladas de ferramentas, métodos de gestão ou auxílio técnico apropriado. Essas noções ligadas à gestão de qualidade total passam a significar modelos de gestão que buscam a eficiência e a eficácia organizacional (ISNARD et al., 2012).

Dessa maneira, para que o carvão vegetal continue sendo competitivo dentro do mercado siderúrgico são necessárias mudanças em conjunto de ações operacionais, centradas e focadas no aperfeiçoamento do processo produtivo, desde a seleção do material genético adequado para a produção de carvão até o melhoramento do processo siderúrgico (FARIA et al., 2008).

Ao final da carbonização é possível obter, além do carvão vegetal, outros produtos, por meio da condensação dos gases gerados no decorrer do processo de transformação provocado

pelas reações termoquímicas da madeira. Os gases condensados produzem o licor pirolenhoso, no qual é constituído por diversos produtos químicos. Além desse, o processo ainda produz uma parte de gases não condensáveis (CO , CO_2 , CH_4 , H_2 e C_nH_m). A quantidade entre os compostos produzidos vai depender da pirólise utilizada, que varia de acordo com os parâmetros do processo e das propriedades da biomassa (SILVA, 2019).

A qualidade do carvão vegetal gerado depende especialmente da espécie florestal (densidade básica, teores de lignina e inorgânicos), idade e do sistema de carbonização (ARANTES et al., 2020; SOARES et al., 2014). Porém, para verificar as propriedades da biomassa carbonizada é preciso realizar alguns testes, com objetivo de avaliar a qualidade do carvão vegetal: umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, que são informações importantes para o balanço de massa nos processos que utilizam o biotermorredução (OLIVEIRA et al., 1982). Outras características relevantes relacionadas ao uso do carvão vegetal são a porosidade, densidade relativa aparente, reatividade, granulometria e resistência mecânica.

As propriedades químicas consideradas adequadas para o carvão vegetal são maiores teores de carbono fixo ($\geq 75\%$), menores teores de substâncias voláteis (22-25%) e cinzas ($<1\%$) (ASSIS et al., 2016). Essas características ocorrem normalmente em carvões vegetais derivados de madeiras que possuem elevados teores de lignina e baixos teores de cinzas. Vale destacar que a temperatura final de carbonização tem grande interferência na qualidade do carvão vegetal.

Com relação ao desempenho energético do carvão vegetal necessita-se avaliar em conjunto as características físicas e químicas desse combustível sólido. A análise química imediata determina os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. A proporção de substâncias voláteis influencia a decomposição térmica e o desempenho de combustão de combustíveis sólidos. A combustão de material volátil é mais rápida do que parcela de carbono sólido, logo, madeiras com menor teor de materiais voláteis irão apresentar taxas mais lentas de degradação térmica em comparação a espécies com maior teor (CUVILAS et al. 2014; PROTÁSIO et al. 2019). Dessa forma, pode-se constatar que os materiais voláteis facilitam a ignição (SYRODOY et al. 2018).

O carbono fixo depende da temperatura de carbonização e do teor de lignina da madeira. Essa característica é uma das mais importantes, pois é a quantidade de carbono sólido retido no carvão vegetal depois da carbonização. O poder calorífico diz respeito a quantidade de energia na forma de calor que é liberada durante a combustão. Essa característica se relaciona a química

imediate, quanto menor o teor de cinzas e maior o teor de carbono fixo, maior será o poder calorífico do carvão vegetal (MACHADO et al., 2014).

Segundo Silva et al. (2018), a temperatura final de carbonização é um dos principais parâmetros que afeta os teores de carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal. Isso pode ser analisado na Tabela 2, no qual é possível observar que o aumento da temperatura final proporcionou diminuição do teor de materiais voláteis e aumento dos teores de cinzas e carbono fixo. Esses autores verificaram acréscimo do poder calorífico do carvão vegetal com aumento da temperatura final de carbonização, isso ocorreu em decorrência concentração de carbono fixo.

Tabela 2- Análise Química Imediata do Carvão Vegetal.

Espécie	Carbono fixo		Materiais voláteis		Poder calorífico superior	
	(%)		(%)		(kcal/kg)	
	450°C	500°C	450°C	500°C	450°C	500°C
<i>Cordia geoldiana</i>	69,5	75,8	29,4	22,9	7.224	7.399
<i>Hymenolobium petraeum</i>	67,8	73,7	30,4	24,5	7.165	7.385
<i>Hymenaea courbaril</i>	65,9	74,4	32,0	22,5	7.128	7.448
<i>Tabebuia spp.</i>	75,7	76,3	22,9	22,5	7.469	7.502
<i>Astronium lecointei</i>	66,4	6,4	31,9	38,3	7.179	7.062

Fonte: Silva et al. (2018)

Trugilho e Silva (2001) analisaram a influência de diferentes temperaturas finais (300-900°C) para a produção de carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril*). Os autores verificaram que o teor de carbono fixo, cinzas e o poder calorífico aumentaram com a temperatura de carbonização, o inverso ocorreu para os materiais voláteis.

A avaliação da qualidade do carvão vegetal deve ser com base nas características físicas, químicas e do processo de carbonização. Vários autores constaram que a temperatura final de carbonização influencia a qualidade do carvão, alterando suas características. Esse parâmetro do processo é capaz de influenciar a produção de produtos com características físicas e químicas diferentes (TRUGILHO; SILVA, 2001). No entanto, poucos estudos foram realizados para entender relação entre os constituintes da madeira de coprodutos do manejo florestal sustentável

da Amazônia e a temperatura final de carbonização, e o impacto dessas variáveis no balanço de massa.

3.4 Combustibilidade do carvão vegetal

A combustão do carvão vegetal é um procedimento complexo que consiste em uma série de reações homogêneas e heterogêneas. O processo de combustão da madeira ocorre em seis etapas, sendo a secagem, emissão de voláteis, ignição de voláteis, queima dos voláteis, eliminação da chama dos materiais voláteis e combustão do carbono fixo (NOGUEIRA; LORA, 2003). O processo de combustão da madeira e biomassas não lenhosas tem sido reportado em diversos estudos (MASSUQUE et al., 2021; PROTÁSIO et al., 2017; LIU et al., 2014; KLUSKA et al., 2020). No entanto, a combustão e a combustibilidade do carvão vegetal são pouco exploradas na literatura.

O processo termoquímico de combustão consiste na reação de oxidação francamente exotérmica que o combustível sofre na presença de O_2 e quando a temperatura de ignição é alcançada. Nessa condição, o material combustível sofre degradação térmica e é transformado em gases, deixando como resíduo sólido somente os óxidos inorgânicos (cinzas). A combustão é uma reação francamente exotérmica com variação de entalpia negativa ($-\Delta H$), isto é, com liberação de energia. O carbono e o hidrogênio, principais elementos químicos combustíveis da biomassa lignocelulósica ou do carvão vegetal, combinam-se com o O_2 para formação de CO_2 e H_2O , liberando energia calorífica ou térmica (GONÇALVES et al., 2017). É importante destacar que para que as reações homogêneas e heterogêneas da combustão se iniciem, é necessário o fornecimento de energia, a chamada energia de ativação. Dessa forma, o combustível atinge a temperatura de ignição e efetivamente o processo de combustão se torna autossustentável até o término da massa combustível.

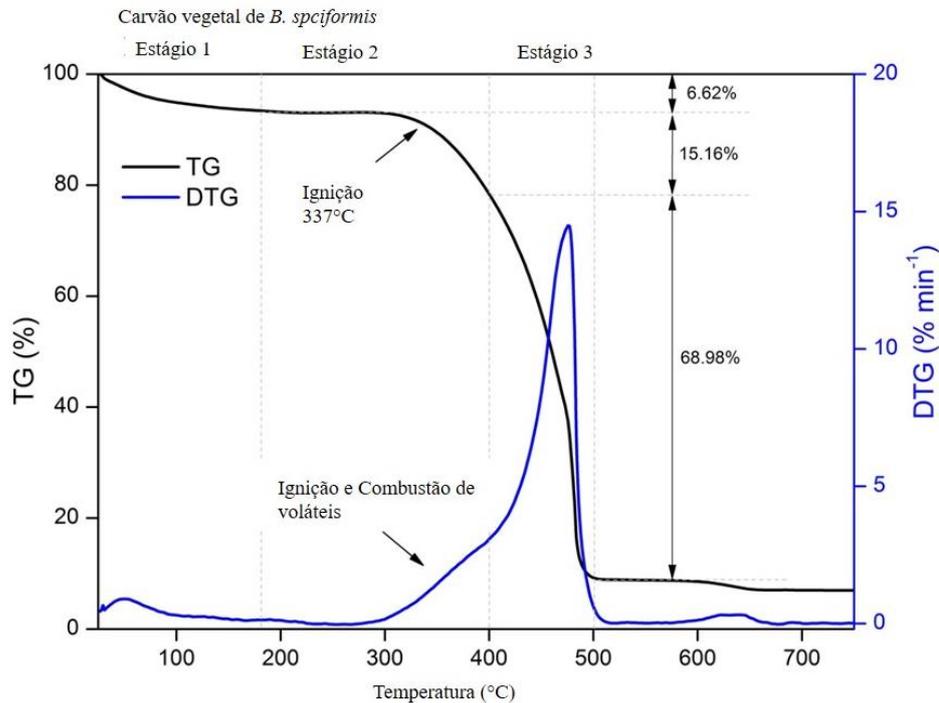
As principais etapas do processo consistem em secagem, desvolatilização, gaseificação, combustão de carvão e reações em fase gasosa. O processo de combustão da biomassa pode ser resumido, no aquecimento da madeira, seus elementos começam a hidrolisar, oxidar, desidratar e pirolisar com o aumento da temperatura, ocorrendo a formação de materiais voláteis, substâncias de alcatrão e carvão altamente reativo. Na temperatura de ignição dos voláteis e substâncias de alcatrão, iniciam-se as reações exotérmicas conhecidas como combustão. Compostos resinosos e produtos de decomposição de celulose, hemiceluloses e lignina, em conjunto com o vapor de água, seguido de combustão parcial a completa.

A combustibilidade refere-se ao comportamento termoquímico da biomassa durante o processo de combustão, ou seja, as características de ignição e reatividade do combustível (DAI et al., 2020). Na literatura tem sido frequente o uso da análise termogravimétrica, conduzida em atmosfera de oxigênio ou ar sintético, para avaliação das características intrínsecas e desempenho do combustível durante o processo de combustão. Diversos trabalhos têm demonstrado que a combustibilidade da biomassa e do carvão vegetal dependem diretamente da composição química, comportamento térmico e fatores físicos, como a densidade, porosidade e umidade. O carvão vegetal é o principal produto da carbonização da biomassa, na pirólise lenta (até de 10°C/min), que acontece na ausência ou presença controlada de oxigênio. As características do carvão vegetal são controladas pelo processo de produção e madeira utilizada (ASSIS et al., 2016).

Pesquisas sobre a combustibilidade da madeira por meio da análise termogravimétrica (TGA) é importante método alternativo para avaliar biomassas lenhosas com potencial para carbonização e combustão. Esse método possibilita a observação e compreensão dos fenômenos térmicos de decomposição da madeira e sua composição molecular em diferentes faixas de temperatura (FIALHO et al., 2019; GARCIA et al., 2016). As técnicas mais usadas são a análise termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG). Esses métodos são bastante utilizados para avaliar a qualidade da biomassa para geração direta de calor ou a produção de carvão vegetal (VITAL et al., 2013).

As análises termogravimétricas permitem várias aplicações, como o estudo de reações químicas, avaliação da estabilidade térmica, determinação da composição de matérias e elaboração de metodologias analíticas. Possibilita a obtenção de parâmetros para a avaliação de combustão da madeira e do carvão vegetal, como as temperaturas de ignição e final de combustão, os picos de máxima perda de massa, tempo de ignição, tempo da combustão, índices de ignição e de combustão (MAGDZIARZ; WILK, 2013; XIONG et al., 2014). Essas investigações são importantes para o projeto, viabilidade, aplicabilidade e otimização de tecnologias de geração de bioenergia (ROYO et al., 2019). A Figura 2 expõem as diferentes etapas da combustão do carvão vegetal, respectivamente. Para a Figura 2 o primeiro estágio corresponde a etapa de secagem, no segundo estágio ocorre a ignição e combustão de materiais voláteis e o terceiro é a combustão do carbono fixo. Em temperaturas acima de 500°C praticamente não há massa para ser consumida, por isso ocorre menor perda de massa.

Figura 2- Estágios de combustão do carvão vegetal produzido a partir da madeira da espécie *Brachystegia spcifformis*.



Fonte: Massuque et al. (2021).

A análise termogravimétrica auxilia no aprimoramento do conhecimento desse processo e, desse modo, determinar as condições operacionais ótimas para estabelecê-lo. Por isso as características de combustão do carvão são largamente estudadas em todo mundo (HUPA et al., 2016).

Em suma, poucos estudos foram desenvolvidos para analisar a combustibilidade do carvão vegetal (Tabela 3). Liu et al. (2014) avaliaram as características de combustão do carvão de bambu (*Phyllostachys praecox*), sendo verificado um pico no biocarvão que alterou com aumento da temperatura, apontando uma queima regular e maior eficiência no processo de combustão.

Tabela 3- Estudos recentes reportados na literatura relacionados a combustão de carvões vegetais

Biomassa utilizada	Técnica e parâmetros utilizados	Autores
<i>Phyllostachys praecox</i>	Carvão: Temperaturas de carbonização (200, 250 e 300 °C) e tempos de permanência (1,0, 1,5 e 2,0 h). TGA: Temperatura final 800°C e taxa de aquecimento de 10 °C/min	Liu et al. (2014)
<i>Brachystegia boehmii</i> , <i>Brachystegia spiciformis</i> , <i>Julbernardia globiflora</i> , <i>Parinari curatellifolia</i>	Carvão vegetal: 450°C com taxa de aquecimento 1,6°C/min e tempo de residência de 30 min na temperatura máxima.	Massuque et al. (2021)
<i>Planch</i> , <i>Uapaca kirkiana</i> e <i>Eucalyptus grandis</i>	TGA: Temperatura final 750°C e taxa de aquecimento de 10 °C/min	
Babaçu	Carvão: Temperaturas de carbonização (450, 550, 650, 750 e 850 °C) com taxa de aquecimento de 1,67 °/min e tempo de residência de 30 min. TGA: Temperatura final 1000°C e taxa de aquecimento de 10 °C/min	Protásio et al. (2017)
Espigas de milho	Carvão: Temperaturas de carbonização (300 a 700 °C) e tempo de residência de 30 min. TGA: Temperatura final 850°C e taxa de aquecimento de 10 °C/min	Kluska et al. (2020)
Palma	Carvão: Temperaturas de carbonização 200 a 800 °C TGA: Temperatura final 800°C e taxa de aquecimento de 15°C/min	Wang et al. (2018)

Massuque et al. (2021) avaliaram a combustibilidade de carvões de espécies nativas da floresta de Miombo e *Eucalyptus grandis*. A análise foi realizada em materiais carbonizados na temperatura de 450°C, sendo constatado que a espécie *Uapaca kirkiana* possui performance promissora, com elevados índices de combustibilidade e ignição. Além disso, foi observado

que a espécie *E. grandis* apresenta carvão vegetal semelhante a *J. globiflora*. Essas análises permitiram averiguar que o carvão vegetal de *E. grandis* apresentou maior temperatura de ignição, mesmo com maior proporção de materiais voláteis na sua constituição química. Os autores atribuíram esse resultado a composição dos materiais voláteis que influenciam a ignição do carvão vegetal. Protásio et al. (2017) analisaram carvões de casca do babaçu produzidos em diferentes temperaturas finais de carbonização. Os autores observaram que o aumento da temperatura final de carbonização proporcionou o aumento da temperatura de ignição, a temperatura final da combustão, o tempo de ignição e a taxa máxima de combustão. Além disso, os carvões produzidos em altas temperaturas apresentam maior dificuldade de combustão.

Em trabalho realizado por Kluska et al. (2020) foram avaliadas as características do carvão de espigas de milho em temperaturas de 300 a 700°C, tendo sido concluído que o teor de carbono fixo e o maior poder calorífico superior aumentaram com a temperatura de carbonização e que o aumento da temperatura acima de 500°C é indicado para a produção de carvão vegetal destinado a cocção. Os autores constataram que acima dessa temperatura ocorre diminuição das características de reatividade da combustão do carvão.

Wang et al. (2018) avaliaram as características de combustão do carvão de palma e observaram que com aumento da temperatura de carbonização ocorreu acréscimo da temperatura de ignição. O aumento da temperatura provocou à diminuição de H/C e O/C e da taxa média de combustão que, associado ao aumento da temperatura de ignição, resulta em carvão menos reativo.

A grande parte das informações sobre o desempenho da combustão apresentado na literatura está relacionada sobre o carvão de eucalipto, palma, milho e carvão mineral. O desempenho da combustão de carvões derivados de coprodutos do manejo florestal sustentável não foi reportado na literatura. O estudo sobre a combustão pode trazer informações úteis sobre a operação dos sistemas de queima residencial e industrial.

4.0 Considerações finais

Os resíduos madeiros da Amazônia são de extrema importância para abastecer a região norte. Pesquisas tem demonstrado o potencial desses resíduos para a produção de carvão vegetal com propriedades adequadas para uso siderúrgico. Diante disso, é preciso analisar as suas características e seu comportamento durante o processo de carbonização.

Novos estudos devem ser realizados para analisar as características de resíduos madeiros e carvões vegetais produzidos em diferentes temperaturas de carbonização. Deve-

se analisar o impacto da temperatura final no balanço de massa e nas características do carvão vegetal. Além disso, as análises das características químicas e físicas da madeira são de extrema importância para classificar a matéria prima lenhosa mais adequada para bioenergia, visto que, essas características influenciam o rendimento e eficiência das rotas de conversão, como a carbonização. Além disso, trabalhos futuros sobre o carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal da Amazônia são necessários para quantificar a variação da densidade aparente e das características químicas e energéticas do biotermorreduzido produzido.

5.0 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, O. T. Evolução da fronteira Amazônica: oportunidades para um desenvolvimento sustentável. **Inst. do Homem e Meio Ambiente da Amazônia**, 1996.
- AMUTIO, M., LOPEZ, G., ARTETXE, M., ELORDI, G., OLAZAR, M., BILBAO, J. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 59, p. 23-31, 2012.
- ANÄS, E., EKMAN, R., HOLMBOM, B. Composition of nonpolar extractives in bark of Norway spruce and Scots pine. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 3, n. 2, p. 119-130, 1983.
- ANATER, M. J. N.; SANQUETTA, C. R.; BRAND, M. A.; SILVA, D. A.; DALLA CORTE, A. P. Análise da qualidade do carvão vegetal para uso residencial na região de Curitiba, Paraná, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 494-504, set. 2019.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J. C.; GOULART, S. L.; BARAUNA, E. E. P.; ABREU NETO, R. Anatomy of Charcoal and Carbonization Effect under Eucalyptus Fibers' Dimensions. **Floresta e Ambiente**; v. 27, n. 1, p. e20170643, 2020.
- ARAÚJO, A. C. C., COSTA, L. J., DE CARVALHO BRAGA, P. P., NETO, R. M. G., ROCHA, M. F. V., TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.
- ARAÚJO, A. C. C., TRUGILHO, P. F., NAPOLI, A., BRAGA, P. D. C., DE LIMA, R. V., & PROTÁSIO, T. D. P. Effects of the syringyl/guaiacyl ratio and of lignin-derived phenols on the wood and charcoal characteristics in *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.
- ARAÚJO, E. C. G., SANQUETTA, C. R., DALLA CORTE, A. P., PELISSARI, A. L., ORSO, G. A., SILVA, T. C. Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 331, p. 117251, 2023.

- 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, p. 519- 536, 2016.
- BARROS, D. D. S., LIMA, M. D. R., DIAS JUNIOR, A. F., BUFALINO, L., MASSUQUE, J., DOS SANTOS, E. V., TRUGILHO, P. F., OLIVEIRA, F. A., PROTÁSIO, T. D. P. Does the Segregation of Wood Waste from Amazonia Improve the Quality of Charcoal Produced in Brick Kilns?. **BioEnergy Research**, p. 1-14, 2023.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lei N° 12.727, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, **Diário Oficial da União**, Brasil, 2012.
- BROWN, A. L., HAMES, B. R., DAILY, J. W., DAYTON, D. C. Chemical analysis of solids and pyrolytic vapors from wildland trees. **Energy & Fuels**, v. 17, n. 4, p. 1022-1027, 2003.
- BUSTOS, J. D. V.; MARTINS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; FREITAS, A. G.; BARBOSA, R. C. Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns. **Fuel**, v. 226, p. 508-515, 2018.
- CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática. Viçosa-MG, p. 129, 2011.
- CHAI, W. S., BAO, Y., JIN, P., TANG, G., ZHOU, L. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 147, p. 111254, 2021.
- COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, dez. 2015.
- COUTO, L. C.; L, COUTO; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.
- CRUZ FILHO, D., SILVA, J. N. M. Evaluation of the amount of coarse woody debris in area of logged and undisturbed forests, using line-intercept sampling, in the Medium Moju River, Eastern Amazonia, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 527-532, 2009.
- CUVILAS, C., LHATE, I., JIRJIS, R., TERZIEV, N. The characterization of wood species from Mozambique as a fuel. **Energy Sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects**, v. 36, n. 8, p. 851-857, 2014.
- DAI, G., ZHENG, S., WANG, X., BAI, Y., DONG, Y., DU, J., SUN, X., TAN, H. Combustibility analysis of high-carbon fine slags from an entrained flow gasifier. **Journal of Environmental Management**, v. 271, p. 111009, 2020.

- DEMIRBAŞ, A. Estimating of structural composition of wood and non-wood biomass samples. **Energy Sources**, v. 27, n. 8, p. 761-767, 2005.
- DI BLASI, C. D. Comparison of semi-global mechanisms for primary pyrolysis of lignocellulosic fuels. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 47, n. 1, p. 43-64, 1998.
- DIONÍSIO, L.F.S., VAZ, M.M., DE CARVALHO, J.O.P., LOPES, J.D.C.A. Volume of commercial timber found dead in managed Amazonian natural forests: Is it possible to take advantage? **Ecologia e Manejo Florestal**, v. 521, p. 120441, 2022.
- EPE, **Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 27 de abril de 2023.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050**. Rio de Janeiro, 2018.
- FARIA, A. F.; MOTA, E. M.; VIEIRA, J. G. V. Gestão por processos aplicada em uma incubadora de empresas de base tecnológica. **IV Emepro - Encontro Mineiro de Engenharia de Produção - Ouro Preto, MG**. 2008.
- FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for Eucalyptus spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1-9, 2019.
- FRANCEZ, L. M. B.; CARVALHO, J. O. P.; JARDIM, F. C. S. Mudanças ocorridas na composição florística em decorrência da exploração florestal em uma área de floresta de Terra Firme na região de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 219-228, 2007.
- FREDERICO, P. G. U. Influência da densidade e composição química da madeirasobre a qualidade do carvão de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden e de híbridosde Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla S.T. Blake. **Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)** - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição térmica de pellets de madeira por TGA. **HOLOS**, v.1, n. 32, p. 327-339, 2016.
- GONÇALVES, B. M. M. MASTELA, L. C., GONÇALVES, F. G., DIAS JÚNIOR, A. F., ANDRADE, W. S. P. Tratamentos realizados na madeira para minimizar riscos de incêndios, Engenharia madeireira: pesquisa e produção Seropédica, RJ: Ed. da UFRRJ, 2017.

GONZÁLEZ, J. F., ENCINAR, J. M., CANITO, J. L., SABIO, E., CHACÓN, M. Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, v. 67, n. 1, p. 165-190, 2003.

GUO, X. J., WANG, S. R., WANG, K. G., QIAN, L. I. U., LUO, Z. Y. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.

HALL, D.O., HOUSE, J.I., SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In Rosillo-Cale, Bajay E Rothman. *Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira*. Campinas, São Paulo: Editora da UNICAMP, 2005.

HAQ, I. U., QAISAR, K., NAWAZ, A., AKRAM, F., MUKHTAR, H., XU, Y., MUMTAZ, M. W., RASHID, U., GHANI, W. A. W. A. K., CHOONG, T. S. Y. Advances in valorization of lignocellulosic biomass towards energy generation. **Catalysts**, v. 11, n. 3, pág. 309, 2021.

HART, J. H. The role of wood exudates and extractives in protecting wood from decay. **Natural products of woody plants: chemicals extraneous to the lignocellulosic cell wall**, p. 861- 880, 1989.

HUPA, M., KARLSTRÖM, O., VAINIO, E. Biomass combustion technology development—It is all about chemical details. **Proceedings of the Combustion institute**, v. 36, n. 1, p. 113-134, 2017.

IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual IBÁ 2022**. Disponível em:< <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>. Acesso em: 26 de abril de 2022.

IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2019-2020.BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável PMFSs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, ano 143, n. 238, p. 155-9,13 dez. 2006.

IPCC, Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, v. 1535, 2013.

IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3056, 2022.

- ISNARD, M. J.; ROCHA, A. V. R.; MOTA, E. B.; QUINTELLA, O. M. Gestão da qualidade e processo. **Rio de Janeiro: Editora FGV**, 2012.
- KLUSKA, J., OCHNIO, M., & KARDAŚ, D. Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. **Waste Management**, v. 105, p. 560-565, 2020.
- LEINONEN, A. Harvesting technology of forest residues for fuel in the USA and Finland. **Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus**, 2004.
- LIMA, M. D. R., BUFALINO, L., SCATOLINO, M. V., HEIN, P. R. G., CARNEIRO, A. D. C. O., TRUGILHO, P. F., PROTÁSIO, T. P. Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. **Renewable Energy**, v. 211, p. 772-788, 2023.
- LIMA, M. D. R., MASSUQUE, J., BUFALINO, L., TRUGILHO, P. F., RAMALHO, F. M. G., PROTÁSIO, T. P., HEIN, P. R. G. Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 166, p. 105636, 2022.
- LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, 2020a.
- LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020b.
- LIN, J. C. M. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. **Fuel Processing Technology**, v. 87, p. 487-495, 2006.
- LIU, Q., WANG, S., WANG, K., LUO, Z., CEN, K. Pyrolysis of wood species based on the compositional analysis. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 26, p. 548-553, 2009.
- LIU, Z., FEI, B., JIANG, Z. Combustion characteristics of bamboo-biochars. **Bioresourcetechnology**, v. 167, p. 94-99, 2014.
- LOUREIRO, B. A. Análise energética da madeira e do carvão de híbridos entre *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson e *Corymbia torelliana* (F. Muell.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson / Breno Assis Loureiro. – Lavras: UFLA, **Dissertação (Mestrado acadêmico)** – Universidade Federal de Lavras, p. 87, 2016.

- MA, Z., YANG, Y., WU, Y., XU, J., PENG, H., LIU, X., ZHANG, W., WANG, S. In-depth comparison of the physicochemical characteristics of bio-char derived from biomass pseudo components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 140, p. 195-204, 2019.
- MACHADO, G. de O.; VOGEL, F.; SILVA, M. M. Influence of temperature carbonization in physical, chemical and energy of charcoal from cinamomo (**Melia azedarach** L.). **Ambiência**, v. 10, n. 1, p. 83–96, 2014.
- MAGDZIARZ, A., WILK, M. Thermal characteristics of the combustion process of biomass and sewage sludge. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 114, n. 2, p. 519-529, 2013.
- MASSUQUE, J., ASSIS, M. R., LOUREIRO, B. A., MATAVEL, C. E., TRUGILHO, P. F. Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, p. 527-535, 2021.
- MASSUQUE, J., MATAVEL, C. E., PROTÁSIO, T. P., TRUGILHO, P. F. Combustion performance of charcoal: a comparative study on Miombo woodland native species and *Eucalyptus grandis*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-10, 2021.
- MELZER, M., BLIN, J., BENSAXHRIA, A., VALETTE, J., BROUST, F. PYROLYSIS of extractive rich agroindustrial residues. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 104, p. 448-460, 2013.
- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Belo Horizonte, (**Série de Publicações Técnicas, 8.**) p.357, 1982.
- NOGUEIRA, L. A. H; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2 ed. Interciencia, Rio de Janeiro, 2003. 199 p.
- NUMAZAWA, C. T. D., NUMAZAWA, S., PACCA, S. A., JOHN, V. M. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: 1357 two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, 1358 p. 280–285, 2017.
- OASMAA, A., KUOPPALA, E., GUST, S., & SOLANTAUSTA, Y. Fast pyrolysis of forestry residue. 1. Effect of extractives on phase separation of pyrolysis liquids. **Energy & Fuels**, v. 17, n. 1, p. 1-12, 2003.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures. **Revista Árvore**, v. 37, p. 557-566, 2013.

- OLIVEIRA, J. B., GOMES; P. A., ALMEIDA, M. R. **Carvão vegetal** – Destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade, In: Penedo, W.R. CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Publicação técnica, Belo Horizonte, p.173, 1982.
- OLIVEIRA, R. S., SILVA, L. F. F., ANDRADE, F. W. C., TRUGILHO, P. F., PROTÁSIO, T. P., & GOULART, S. L. Quality of charcoal marketed in southeast Pará for cooking foods. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, 2019.
- PAN, S., PU, Y., FOSTON, M., & RAGAUSKAS, A. J. Compositional characterization and pyrolysis of loblolly pine and Douglas-fir bark. **BioEnergy Research**, v. 6, p. 24-34, 2013.
- PARÁ. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Instrução Normativa 05, de 10 de setembro de 2015. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável – PMFS nas florestas. **Diário Oficial do Estado**, Brasil, 2015.
- PELÁEZ-SAMANIEGO, M. R.; GARCIA-PEREZ, M.; CORTEZ, L. B.; ROSILLO CALLE, F.; MESA, J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.12, p. 1063-1086, 2008.
- PEREIRA, A. A., LIMA, M. D. R., PATRÍCIO, E. P. S., NUMAZAWA, S., GOULART, S. L., PROTÁSIO, T. P. Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, v. 48, p. 127, 2020.
- PEREIRA, B. L. C., CARNEIRO, A. D. C. O., CARVALHO, A. M. M. L., COLODETTE, J. L., OLIVEIRA, A. C., FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.
- PROTÁSIO, T. D. P., GUIMARÃES, M., MIRMEHDI, S., TRUGILHO, P. F., NAPOLI, A., KNOVACK, K. M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. **Cerne**, v. 23, p. 1-10, 2017.
- PROTÁSIO, T. P., DA COSTA, J. S., SCATOLINO, M. V., LIMA, M. D. R., DE ASSIS, M. R., DA SILVA, M. G., TRUGILHO, P. F. 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, n. 5, p. 4491-4508, 2022.
- PROTÁSIO, T. P., LIMA, M. D. R., TEIXEIRA, R. A. C., ROSÁRIO, F. S., ARAÚJO, A. C. C., DE ASSIS, M. R., HEIN, P. R.G., TRUGILHO, P. F. Influence of extractives content and lignin quality of Eucalyptus wood in the mass balance of pyrolysis process. **Bioenergy Research**, v. 14, n. 1, p. 175-189, 2021.

- PROTÁSIO, T. P., SCATOLINO, M. V., DE ARAÚJO, A. C. C., DE OLIVEIRA, A. F. C. F., DE FIGUEIREDO, I. C. R., DE ASSIS, M. R., TRUGILHO, P. F. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior Eucalyptus firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626-641, 2019.
- PROTÁSIO, T. P., SCATOLINO, M. V., LIMA, M. D. R., DE ARAÚJO, A. C. C., DE FIGUEIREDO, I. C. R., BUFALINO, L., HEIN, P. R. G., TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of Eucalyptus clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105835, 2020.
- RIBEIRO, R. B. S. Quantificação e valoração de resíduos da colheita florestal na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)** – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, p.73, 2013.
- RODRIGUES, T., JUNIOR, A. B. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, p. 104670, 2019.
- ROYO, J., CANALÍS, P., QUINTANA, D., DÍAZ-RAMÍREZ, M., SIN, A., REZEAU, A. Experimental study on the ash behaviour in combustion of pelletized residual agricultural biomass. **Fuel**, v. 239, p. 991-1000, 2019.
- RUSSEL, A.E., KUMAR, B. M. Forestry for a low-carbon future: integrating forests and wood products into climate change strategies. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 59, n. 2, p. 16-23, 2017.
- SALEEM, M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. **Heliyon**, p. e08905, 2022.
- SANDERSON, M. A., EGG, R. P., WISELOGEL, A. E. Biomass losses during harvest and storage of switchgrass. **Biomass and Bioenergy**, v. 12, n. 2, p. 107-114, 1997.
- SANTOS, R. C., CARNEIRO, A. C. O., CASTRO, A. F. M., CASTRO, R. V. O., BIANCHE, J. J., SOUZA, M. M., CARDOSO, M. T. Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.
- SILVA, F. T. M. Valorização da madeira *Eucalyptus* sp. via pirólise: caracterização e rendimentos dos produtos. **Tese (Doutorado em Engenharia química)** - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.
- SILVA, L. F. F., CASTRO, A. R. S., OLIVEIRA, R. S., SILVA, S. S., PAMPLONA, V. M. S., SOUZA, D. B., NOBRE, J. R. C. NUMAZAWA, S. Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.

- SILVA, R. C., MARCHESAN, R., FONSECA, M. R., DIAS, A. C. C., VIANA, L. C. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.
- SIMONEIT, B. R. Biomass burning—a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. **Applied Geochemistry**, v. 17, n. 3, p. 129-162, 2002.
- SINDIFER, **Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário Estatístico**, p. 52, 2021. Disponível em: <<http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>>. Acesso em: 05 de abril de 2023.
- SOARES, V. C., BIANCHI, M. L., TRUGILHO, P. F., PEREIRA, A. J., HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.
- SRIVASTAVA, R. K., SHETTI, N. P., REDDY, K. R., KWON, E. E., NADAGOUDA, M. N., & AMINABHAVI, T. M. Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials. **Environmental Pollution**, v. 276, p. 116731, 2021.
- SUN, L., GONG, Y., LI, D., PAN, C. Biomass-derived porous carbon materials: synthesis, designing, and applications for supercapacitors. **Green Chemistry**, v. 24, n. 10, p. 3864-3894, 2022.
- SYRODOY, S. V., KUZNETSOV, G. V., GUTAREVA, N. Y., BUGAEVA, K. A., TABURCHINOV, R. I. The conditions and characteristics of wood particles ignition in the stream of the high temperature gases. **Combustion Science and Technology**, v. 190, n. 4, p. 663-686, 2018.
- 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.
- TRUGILHO, P. F., SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 21, n. 2, p. 259 -267, 1997.
- VÁRHEGYI, G., GRØNLI, M. G., DI BLASI, C. Effects of sample origin, extraction, and hot-water washing on the devolatilization kinetics of chestnut wood. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 10, p. 2356-2367, 2004.
- VITAL, B. R.; CARNEIRO A. C.; PEREIRA, B. L. Qualidade da madeira para fins energéticos. **Bioenergia & biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais**, v. 1, p. 321-354, 2013.

- WANG, S., DAI, G., YANG, H., LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 62, p. 33-86, 2017.
- WANG, X., ZHAI, M., WANG, Z., DONG, P., LV, W., LIU, R. Carbonization and combustion characteristics of palm fiber. **Fuel**, v. 227, p. 21-26, 2018.
- XIONG, S.; ZHANG, S.; WU, Q.; GUO, X.; DONG, A.; CHEN, C. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 86-92, 2014.
- YAN, M., QIN, Y., WANG, L., SONG, M., HAN, D., JIN, Q., ZHAO, S., ZHAO, M., LI, Z., WANG, X., MENG, L. Recent advances in biomass-derived carbon materials for sodium-ion energy storage devices. **Nanomaterials**, v. 12, n. 6, p. 930, 2022.
- YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D. H., ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.
- YOGALAKSHMI, K. N., SIVASHANMUGAMz, P., KAVITHA, S., KANNAH, Y., VARJANI, S., ADISHKUMAR, S., KUMAR, G. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. **Chemosphere**, v. 286, p. 131824, 2022.
- ZANUNCIO, A. J. V., CARVALHO, A. G., TRUGILHO, P. F., MONTEIRO, T. C. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 369-374, 2014.

6.0 Capítulo 2 - Influência da temperatura final de carbonização e qualidade da madeira nas características físicas e químicas do carvão vegetal de resíduos de madeiras Amazônicas

7.0 Introdução

A biomassa florestal é importante para a matriz energética brasileira, seja pela utilização direta para geração de energia térmica e elétrica ou pela transformação em carvão vegetal para abastecimento dos alto fornos siderúrgicos (EPE, 2021). Aproximadamente 48,4% da energia do país deriva de fontes renováveis, no qual a lenha e o carvão vegetal representam 8,9%, utilizados pelos setores industrial, comercial, residencial e agropecuário (EPE, 2021). O Brasil produz 12% do carvão vegetal consumido no mundo e isso o caracteriza como o maior produtor mundial de biotermorredução (IBÁ, 2022). Para fins metalúrgicos e siderúrgicos são destinados 4,25 milhões de toneladas de carvão vegetal, sendo 86% do total produzido no país (EPE, 2022).

Grande parte das 177 principais unidades produtoras de ferro gusa, ferro liga e aço utilizam o carvão vegetal em seu processo de produção. Os polos siderúrgicos de Minas Gerais e o da Região do Carajás produzem em conjunto 87% do ferro gusa nacional (SINDIFER, 2021). As principais fontes de matérias primas utilizadas para a produção de carvão vegetal são as espécies do gênero *Eucalyptus* (IBÁ, 2022) e madeiras nativas, principalmente coprodutos de plano de manejo florestal sustentável (PMFs) (sapopemas, restos de troncos e galhos) (LIMA et al., 2020a) e da industrialização de toras (MOULIN et al., 2017).

Em PMFs são produzidas quantidades significativas de coprodutos heterogêneos advindos de diversas espécies nativas exploradas (LIMA et al., 2020a). Estima-se que são gerados cerca de 137 m³/ha de coprodutos em florestas amazônicas manejadas sob Exploração de Impacto Reduzido (EIR) (CRUZ FILHO; SILVA, 2009). Esses coprodutos podem ser utilizados para bioenergia (PARÁ, 2015). No entanto, a diversidade de espécies nativas interfere na qualidade do biotermorredução. A falta de segregação da madeira para a produção de carvão vegetal em unidades de produção afeta negativamente o desempenho desse insumo energético nos altos-fornos siderúrgicos (LIMA et al., 2023). Estudos conduzidos por Lima et al. (2020b) e Pereira et al. (2020) analisaram as propriedades dos coprodutos madeireiros de diversas espécies. O intuito foi promover a homogeneidade do carvão vegetal siderúrgico pela segregação das espécies com base nas propriedades físicas e químicas das madeiras residuais.

Nesses estudos foram avaliadas as propriedades do lenho, como densidade básica, extrativos, lignina, cinzas e umidade.

Em estudo realizado por Lima et al. (2020b) foram determinados o balanço de massa de carbonização, rendimentos e qualidade dos carvões derivado do PMFs, sendo a carbonização realizada a 450°C. As características da madeira e os aspectos dos processos afetam significativamente a produção e a qualidade do carvão vegetal (LIMA et al., 2020). No entanto, não se tem relatos na literatura sobre como as características do carvão vegetal dos coprodutos lenhosos do manejo florestal sustentável se comportam quando submetidos a diferentes temperaturas de carbonização.

O processo de pirólise acarreta alterações físicas, anatômicas e mecânicas na madeira que afetam as propriedades do carvão resultante e na sua qualidade final (NETO et al., 2020). Além disso, o processo de carbonização pode ser influenciado pela temperatura, tempo final e características da madeira precursora (TRUGILHO & SILVA, 2001; AMUTIO et al., 2012; SILVA et al., 2018).

As pesquisas mais recentes tem priorizado o estudo da qualidade e produção laboratorial de carvão vegetal. Lima et al. (2022) analisaram os efeitos da temperatura final de carbonização (400, 500, 600 e 700°C) no rendimento gravimétrico e densidade relativa aparente do carvão vegetal de coprodutos madeireiros amazônicos. Porém, é preciso verificar o balanço completo de massa e a influência da temperatura nas propriedades químicas e no poder calorífico do biotermorreductor. O estudo do balanço de massa da carbonização e a qualidade do carvão vegetal, associado à qualidade da madeira, proporcionará maior conhecimento sobre esse processo termoquímico e será capaz de ajudar nas tomadas de decisão por empreendedores e cientistas que atuam no setor siderúrgico da região Amazônica. Além disso, a presente pesquisa permitirá avanços na bioeconomia amazônica, pois visa à geração sustentável de energia e produção de carvão vegetal a partir de biomassas de fontes renováveis.

Desse modo, as questões que nortearam este estudo foram: (i) Qual temperatura final de carbonização propicia melhor balanço de massa associado com índices de qualidade do biotermorreductor para fins siderúrgicos? (ii) Qual o padrão de variação do rendimento e das características químicas do carvão vegetal em função da interação entre espécie e temperatura? A hipótese deste estudo é que o efeito temperatura nas propriedades do carvão vegetal é variável em função da espécie, sendo a temperatura juntamente com as características da madeira importantes fatores que afetam o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Assim, os objetivos desse estudo foram: (i) Avaliar o efeito das propriedades físico-químicas dos coprodutos do manejo florestal sustentável da Amazônia e dos carvões vegetais derivados para

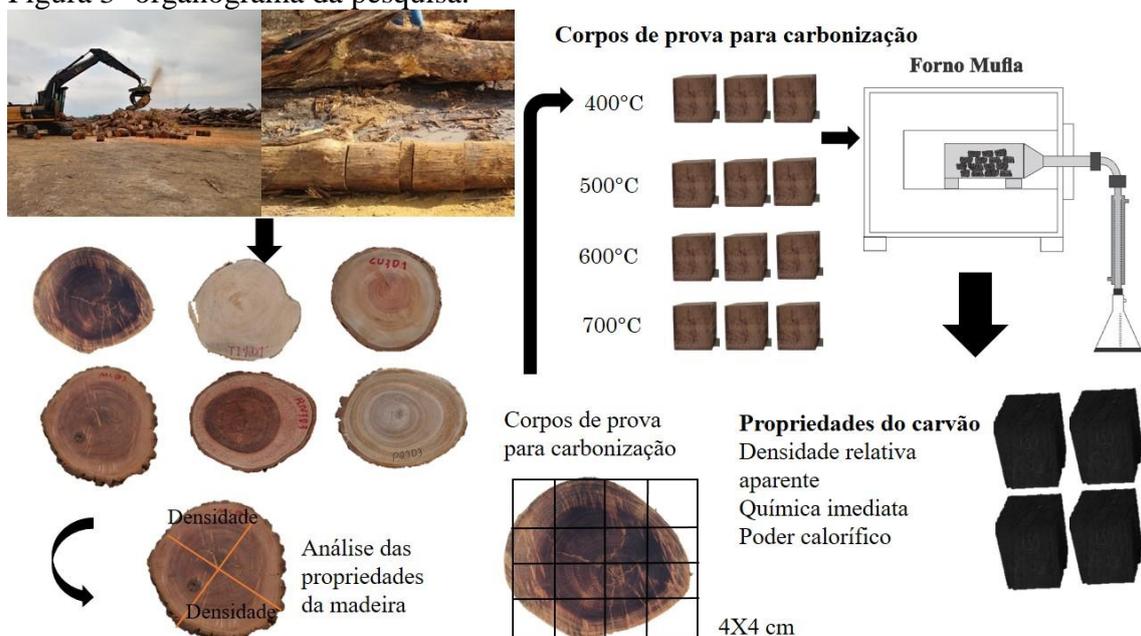
aplicações em processos siderúrgicos; (ii) Determinar as relações entre as propriedades físico-químicas dos coprodutos do manejo florestal sustentável da Amazônia com as dos carvões vegetais derivados e, finalmente, (iii) Definir a melhor temperatura para carbonização de coprodutos do manejo florestal sustentável visando à maximização da produção de carvão vegetal com qualidade adequada para fins siderúrgicos.

8.0 Material e métodos

8.1 Origem dos coprodutos madeireiros

Os coprodutos utilizados no estudo são provenientes da galhada da copa de árvores de seis espécies florestais exploradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim (3°30’S e 3°45’S; 48°30’W e 48°45’W), situada na cidade de Paragominas, Pará, Brasil. Esses materiais pertencem ao Grupo Keilla, que atua sob licença ambiental fornecida pela Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS – PA). Essa pesquisa foi baseada em atividades de laboratório em que foram produzidos carvões em quatro temperaturas finais de carbonização (400, 500, 600 e 700°C) e determinadas as propriedades das madeiras e dos carvões (Figura 3).

Figura 3- organograma da pesquisa.



8.2 Amostragem

Para esta pesquisa foram utilizadas espécies que abrangem de baixa (0,300-0,555g/cm³), média (0,55-0,750 g/cm³) e alta (0,750- 0,95 g/cm³) densidade básica, segundo informações prévias obtidas por Lima et al. (2020a). As espécies escolhidas estão discriminadas na Tabela 4.

Tabela 4- Espécies selecionadas para o estudo.

Nome científico	Família	Nome vulgar
<i>Dinizia excelsa</i>	Fabaceae	Angelim-vermelho
<i>Manilkara elata</i>	Sapotaceae	Maçaranduba
<i>Caryocar villosum</i>	Caryocaraceae	Piquiá
<i>Couratari oblongifolia</i>	Lecythidaceae	Tauari branco
<i>Anacardium giganteum</i>	Anacardiaceae	Cajuaçu
<i>Parkia gigantocarpa</i>	Leguminosae	Fava atañã

Foram coletados três discos por espécie com espessura de 7 cm de forma aleatória de galhos disponíveis no pátio de estocagem de resíduos da unidade de produção de carvão vegetal. A partir desses discos foram realizadas análises químicas e físicas da madeira, bem como a produção de carvão vegetal em escala de laboratório.

8.3 Propriedades químicas e físicas das madeiras

A análise da composição química das madeiras residuais foi realizada em triplicatas por meio da determinação dos teores de lignina, extrativos totais, extrativos em acetona e cinzas, sendo utilizados três discos (repetições) por espécie.

Para as análises foram retiradas maravalhas de três discos, com o auxílio da plaina elétrica manual, contemplando todo o sentido transversal da amostra. Depois as maravalhas foram moídas em moinho de facas e a serragem classificada nas peneiras de 40 e 60 mesh. As amostras que ficaram retidas na peneira de 60 mesh foram utilizadas para as análises químicas.

Os extrativos totais foram determinados conforme a NBR 14853 (ABNT, 2010) utilizando cerca de 2 g de amostra previamente seca em estufa. Foram realizadas extrações sequenciais com etanol:tolueno (2:1 v/v) por 6 h, extração com etanol por 5 h em extrator soxhlet e em água destilada fervente em três porções de 300 ml. Depois dessas etapas as

amostras foram secas em estufa com circulação de ar (Modelo 315SE) a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas para obtenção da massa seca.

Os extrativos em acetona foram quantificados segundo a T 280 pm-99 (TAPPI, 1999), utilizando cerca de 2 g de madeira previamente seca em estufa. A extração em acetona é realizada por 3 horas, depois as amostras livres de extrativos são colocadas na estufa com circulação de ar (Modelo 315SE) à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ para obtenção da massa seca.

O teor de lignina insolúvel foi determinado segundo a NBR 7989 (ABNT, 2010) pelo método de hidrólise ácida, com adaptação. Inicialmente, foram pesadas 0,3 g de serragem livre de extrativos, sendo adicionado 3 ml por amostra de ácido sulfúrico (72%) durante 1 hora em banho-maria (Modelo GEFran 500) a $30 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas a frascos de vidro de 100 ml, com 84 ml de água destilada e autoclavadas sob fervura por 1 h. Os frascos de vidro foram fechados com tampa de borracha e lacre de alumínio. O conteúdo dos frascos foi filtrado em cadinhos de vidro de porosidade 2, forrados com óxido de alumínio em fibras, usando-se aproximadamente 500 ml de água destilada. No fim, os cadinhos com lignina insolúvel foram secos por 24 horas a uma temperatura de 40°C e, em seguida, secos em estufa com circulação forçada de ar (Modelo 315SE) a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 4 horas. A lignina solúvel foi determinada por espectroscopia UV (Modelo Shimadzu UV-1601PC), segundo Goldschimid (1971). A lignina total, base massa seca livre de extrativos, é calculada considerada a soma dos teores de lignina insolúvel e solúvel. Os teores de lignina base massa seca livre de extrativos foram recalculados para a base massa seca total, de acordo com a Equação 1.

$$\%Lig_{total} = \frac{\%Lig_{total}*(100-TE)}{100} \quad (1)$$

Em que: Lig_{total} : lignina total e TE: teor de extrativos totais.

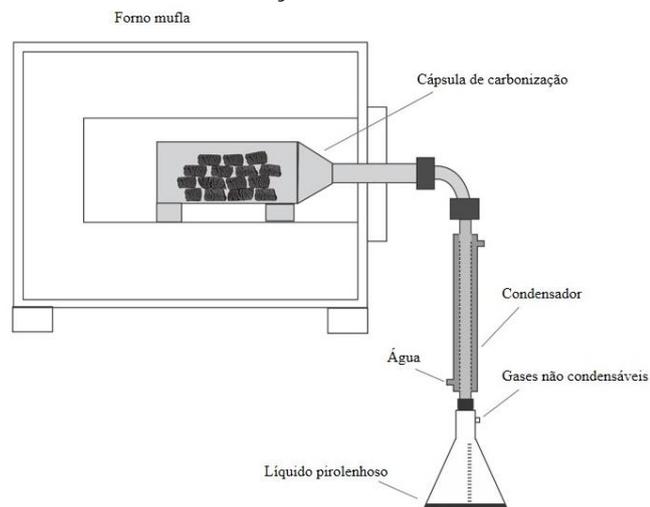
O teor de cinzas foi obtido em mufla aquecida a 525°C por 4 horas até a completa incineração da fração orgânica, segundo a NBR 13999 (ABNT, 2017). A densidade básica foi determinada a partir de cunhas de madeira e definida pela razão entre a massa anidra (teor de umidade = 0%) e seu volume saturado, de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). As espécies foram classificadas quanto a densidade como baixa ($0,300\text{--}0,555\text{ g/cm}^3$), média: ($0,555\text{--}0,750\text{ g/cm}^3$), alta: ($0,750\text{--}0,950\text{ g/cm}^3$), e muito alto ($>1,000\text{ g/cm}^3$) (LIMA et al., 2020a).

O poder calorífico superior foi determinado por uma bomba colorimétrica digital (modelo IKA® C-200) de acordo com a E711-87 (ASTM, 2004), com três repetições por espécie.

8.4 Carbonização em escala de laboratório

A carbonização foi realizada em forno elétrico tipo mufla (modelo Q318S25T, marca Quimis) com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (Figura 4). Para a análise foram utilizadas três repetições por espécie. As amostras foram retiradas de três discos para produção de corpos de prova com dimensão de aproximadamente 4x4 cm.

Figura 4- Esquema do sistema de carbonização laboratorial.



Fonte: Lima et al. (2022)

Previamente, as amostras foram secas na estufa com circulação forçada de ar em temperatura de $102 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas. Foram realizadas 72 carbonizações com aproximadamente 5 corpos de prova, cada carbonização continha aproximadamente 300 gramas de madeira seca em estufa. Em cada temperatura final de carbonização (400, 500, 600 e 700°C) foram realizadas 12 carbonizações por espécie, sendo utilizadas três repetições em cada temperatura. As carbonizações foram conduzidas com taxa de aquecimento $100^\circ\text{C}/\text{hora}$ ($1,67^\circ\text{C}/\text{min}$) e temperatura inicial de 100°C , permanecendo na temperatura final por 60 minutos, conforme a metodologia utilizada por Lima et al. (2022). O líquido pirolenhoso foi coletado por meio de béquer coletor de gás condensável.

8.5 Rendimentos da carbonização e qualidade do carvão vegetal

Primeiramente foram quantificados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), em líquido pirolenhoso (RLP) e rendimento em gases não condensáveis (RGNC), conforme Equações 2, 3, e 4, respectivamente.

$$RGC = \frac{MCV}{MSM} \times 100 \quad (2)$$

$$RLP = \frac{MLP}{MSM} \times 100 \quad (3)$$

$$RGNC = 100 - (RGC + RLP) \quad (4)$$

Em que: RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (% , base seca); MCV: Massa seca de carvão vegetal (g); MSM: Massa seca de madeira (g); RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso (% , base seca); MLP: Massa de líquido pirolenhoso (g); e RGNC: Rendimento em gases não condensáveis (% , na base seca).

A densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal foi determinada, de acordo com o método hidrostático. O volume foi definido com três peças de carvão vegetal. Um béquer de 500 cm³ foi preenchido de água e colocado em uma balança de precisão de 0,01 g. Os carvões úmidos foram submersos em água e seus volumes foram obtidos. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa com circulação de ar (Modelo 315SE) a 103 ± 2 °C para obtenção da massa seca. A DRA foi calculada pela relação entre a massa seca e o volume do carvão vegetal.

O consumo específico, representa o volume de matéria prima necessária para produzir 1 tonelada de carvão vegetal, foi calculada por espécie e nas diferentes temperaturas de carbonização (Equação 5):

$$\text{Consumo específico} = \frac{1}{DB \times \left(\frac{RGC}{100}\right)} \quad (5)$$

Em que: CE: Consumo específico de lenha (m³ de madeira/ton de carvão vegetal); BD: Densidade básica da madeira (t/m³); e RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (% , base seca).

A análise química imediata foi determinada com as amostras de carvão vegetal moídas e peneiradas, utilizando a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na de 60

mesh, segundo a norma D1762-84 (ASTM, 2013). Na composição química imediata foram determinados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Os ensaios foram realizados em duplicatas. O rendimento em carbono fixo (RCF) foi calculado de acordo com a Equação 6:

$$\text{RCF} = \frac{\text{RGC} \times \text{TCF}}{100} \quad (6)$$

Em que: 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).

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em triplicatas com a utilização de bomba calorimétrica isoperbólica digital (modelo IKA C-200), de acordo com a norma E711-87 (ASTM, 2004). Além disso, foram determinadas a eficiência energética da carbonização (EE) e a densidade energética (DE), conforme as Equações 7 e 8.

$$\text{EE} = \text{RGC} \times \frac{\text{PCS carvão}}{\text{PCS madeira}} \quad (7)$$

$$\text{DE} = \text{PCS carvão} \times \text{DRA} \quad (8)$$

Em que: EE: eficiência energética da carbonização (%); RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (% , base seca); PCS carvão e PCS madeira: poderes caloríficos do carvão e da madeira (MJ/kg); DE: densidade energética do carvão vegetal (MJ/m³); DRA: densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg/m³).

A classificação energética das espécies fundamentada no índice de valor de lenha, conforme a Equação 9, apresentado por Bhatt e Todaria (1992).

$$\text{FVI} = \frac{\text{PCS carvão} \times \text{DB}}{\text{Cinzas}}$$

Em que: FVI: índice de desempenho energético do carvão vegetal (fuel value index); PCS: poder calorífico superior (MJ/kg); DB: densidade básica (g/cm³); e cinzas: teor de cinzas (g/g).

8.6 Análise dos dados

Os dados foram testados quanto à homogeneidade das variâncias, normalidade e ausência de autocorrelação dos resíduos aplicando os testes de Bartlett ($p \leq 0,05$), Shapiro-Wilk

($p \leq 0,05$) e Durbin-Watson ($p \leq 0,05$), respectivamente. Atendendo aos pressupostos, os dados foram submetidos ao teste F por meio da análise de variância (ANAVA). Os resultados das carbonizações foram analisados considerando o delineamento inteiramente casualizado (DIC), disposto em esquema fatorial duplo, com objetivo de avaliar o efeito da temperatura e de espécie nas propriedades do biotermorreductor produzido. Nas situações em que ocorreu efeito significativo de temperatura foi aplicada a análise de regressão, enquanto que para avaliar o efeito de espécie foi realizado o teste de comparação múltipla de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Para avaliar o efeito de parâmetros químicos e físicos da madeira foi considerado o delineamento inteiramente casualizado (DIC). O processamento estatístico foi realizado usando R (R Core Team 2019). Todos os testes foram realizados considerando o nível de significância de 5%.

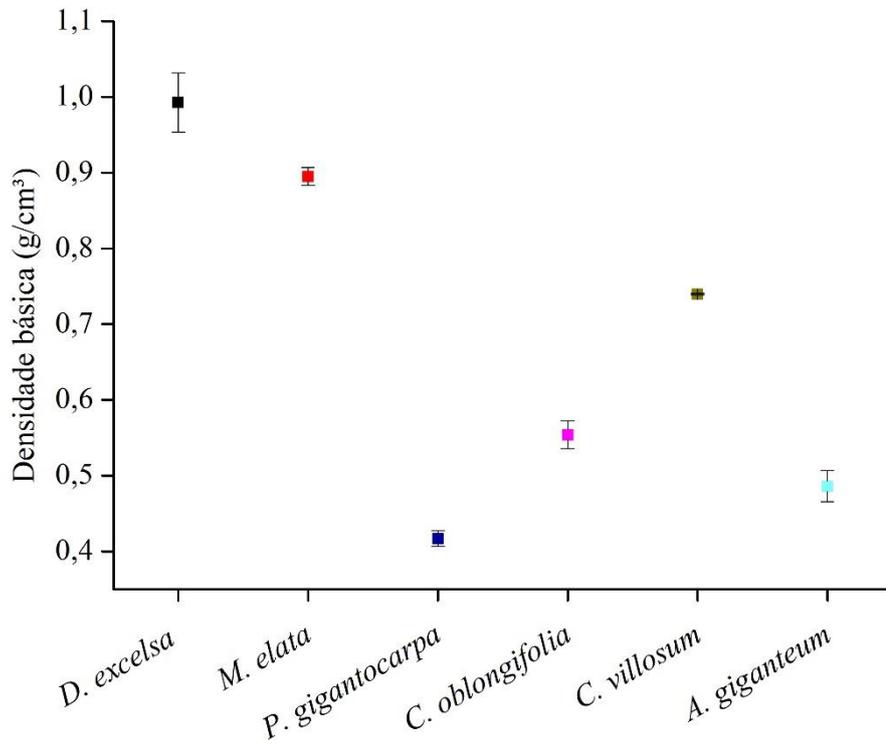
9.0 Resultados e discussão

9.1 Composição química e densidade da madeira dos coprodutos do manejo florestal

Ampla variação ocorreu para a densidade básica (0,417 a 0,993 g/cm³), extrativos totais (2,45 a 12,01%), extrativos em acetona (0,25 a 8,08%), cinzas (0,36 a 1,91%) e lignina total (22,78 a 40,67%). Pela análise de variância, observou-se efeito significativo do fator espécie (p -valor $\leq 0,05$) para os teores de extrativos, lignina e cinzas e densidade básica da madeira residual.

A densidade básica variou de 0,417 (*P. gigantocarpa*) a 0,993 g/cm³ (*D. excelsa*), sendo verificado espécies com baixa (*P. gigantocarpa* e *A. giganteum*), média (*C. villosum* e *C. oblongifolia*) e alta densidade (*D. excelsa* e *M. elata*) (Figura 5). A densidade é um dos principais parâmetros para a escolha de determinada espécie para fins energéticos. Resíduos madeireiros que possuem densidade acima de 0,500 g/cm³ são desejáveis para produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2021), pois madeiras mais densas diminuem o consumo específico de combustível e aumentam a produtividade dos fornos de carbonização (LIMA et al., 2023). Além disso, madeira de alta densidade acarreta na produção de carvão mais denso e resistente (LIMA et al., 2020b; BARROS et al., 2023).

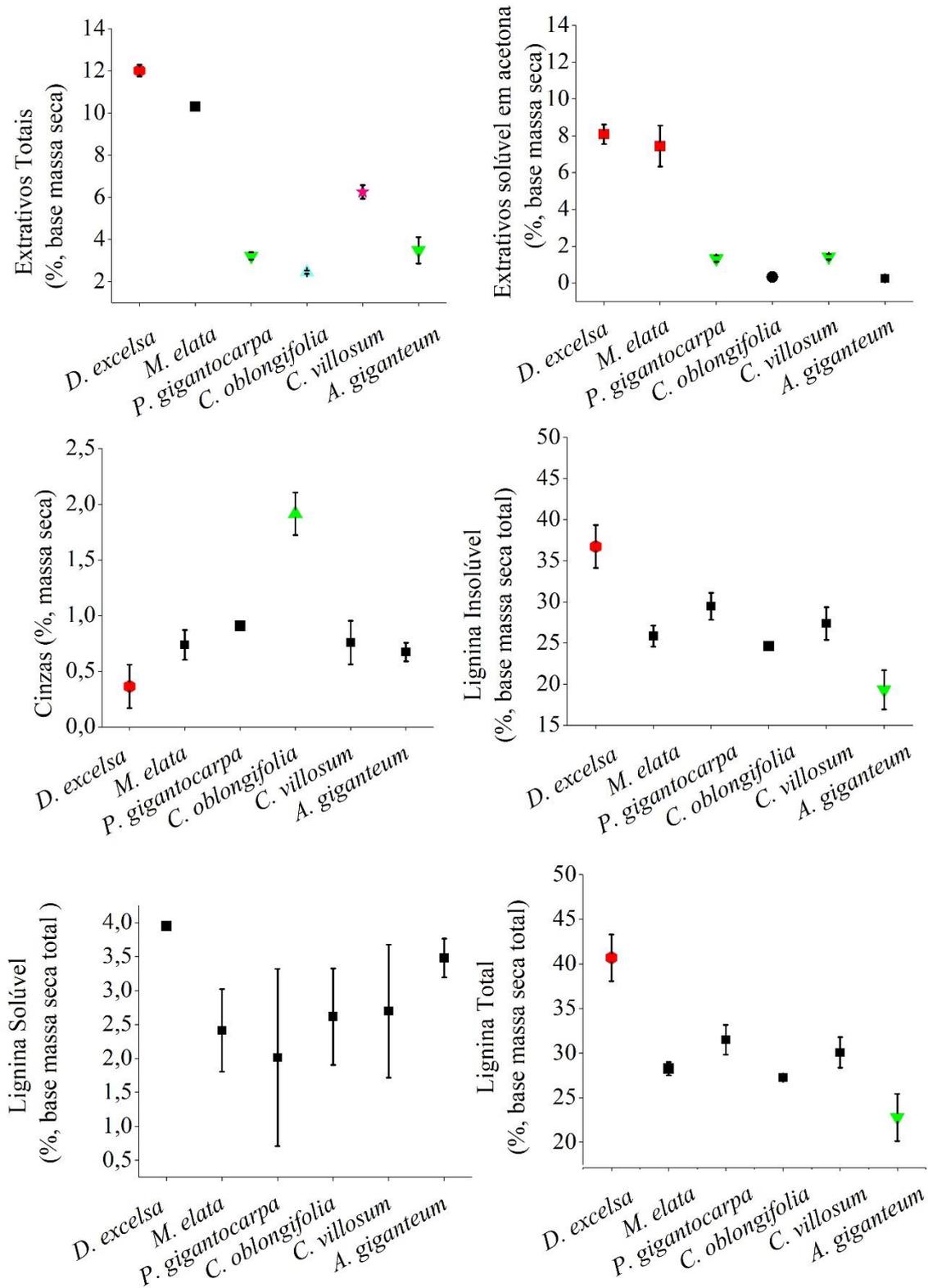
Figura 5- Densidade básica da madeira. As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.



Para o teor de extrativos totais (Figura 6) pode-se observar significativa variabilidade entre as espécies ocorrendo a formação de cinco grupos distintos. A madeira da espécie *D. excelsa* (12,01%) foi responsável por apresentar os maiores valores. Já a *C. oblongifolia* (2,25%), *P. gigantocarpa* (3,22%) e *A. giganteum* (3,49%) apresentaram as menores médias para os teores de extrativos totais.

A *M. elata* e *D. excelsa* apresentaram os maiores teores de extrativos solúveis em acetona, 7,4% e 8,1%, respectivamente (Figura 6). Os menores valores de extrativos em acetona foram encontrados para *A. giganteum* (0,25%) e *C. oblongifolia* (0,32%).

Figura 6- Composição química dos resíduos madeireiros colhidas em um PFMS na Amazônia brasileira. As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e o desvio padrão.



A seleção de espécies com altos teores de extrativos pode proporcionar maiores rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2021). Os extrativos são

capazes de influenciar a reação de pirólise, constituição do líquido pirolenhoso (PEREIRA et al., 2013; MELZER et al., 2013; LIU et al., 2009), balanço de massa (GOUVEA, 2015), aumentar o poder calorífico e rendimento em carbono fixo. Além disso, extrativos solúveis em acetona diminuem a reatividade da madeira no decorrer da combustão (PROTÁSIO et al., 2020).

De forma semelhante, Lima et al. (2020a) relataram uma ampla variação entre os extrativos totais (1,8-17,9%) para os resíduos madeireiros. Os autores observaram para a *D. excelsa*, *C. oblongifolia*, *M. elata* e *C. villosum*, respectivamente, 17,9%, 3,8%, 11,9% e 4,9% de extrativos totais. A diferença do teor de extrativos em relação a este estudo pode estar associado à idade, árvore e condições de crescimento. Além disso, os extrativos são componentes secundários do lenho que apresentam elevada variabilidade dentro da espécie e entre espécies, pois podem sofrer variação em função das condições de crescimento da árvore.

Para o teor de lignina total, as médias variaram de 22,78 a 40,66%, ocorrendo a formação de dois grupos (Figura 6). Os coprodutos lenhosos da espécie *A. giganteum* apresentaram menor média (22,78%). Para lignina total as maiores médias foram observadas para a *D. excelsa* (40,68%), *P. gigantocarpa* (31,48%), *C. villosum* (30,07%), *M. elata* (28,26%) e *C. oblongifolia* (27,24%). Em contrapartida, para lignina insolúvel os maiores valores foram verificados para a *D. excelsa* (36,73%), seguida por *P. gigantocarpa* (29,47%), *C. villosum* (27,37%), *M. elata* (25,85%), *C. oblongifolia* (24,63%). Os menores valores foram observados para *A. giganteum* (19,30%).

Para a lignina solúvel não foi verificada diferenças estatísticas entre as espécies *A. giganteum* (3,48%), *D. excelsa* (3,95%), *P. gigantocarpa* (2,01%), *C. villosum* (2,70%), *M. elata* (2,41%) e *C. oblongifolia* (2,62%). Lima et al. (2020a) encontraram teores de lignina total, base seca, oscilando de 30,2% a 38,1% para resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável. Os autores verificaram teor de lignina total da *D. excelsa* (30,9%), *C. villosum* (32,74%), *C. oblongifolia* (31,40%) e *M. elata* (26,60%).

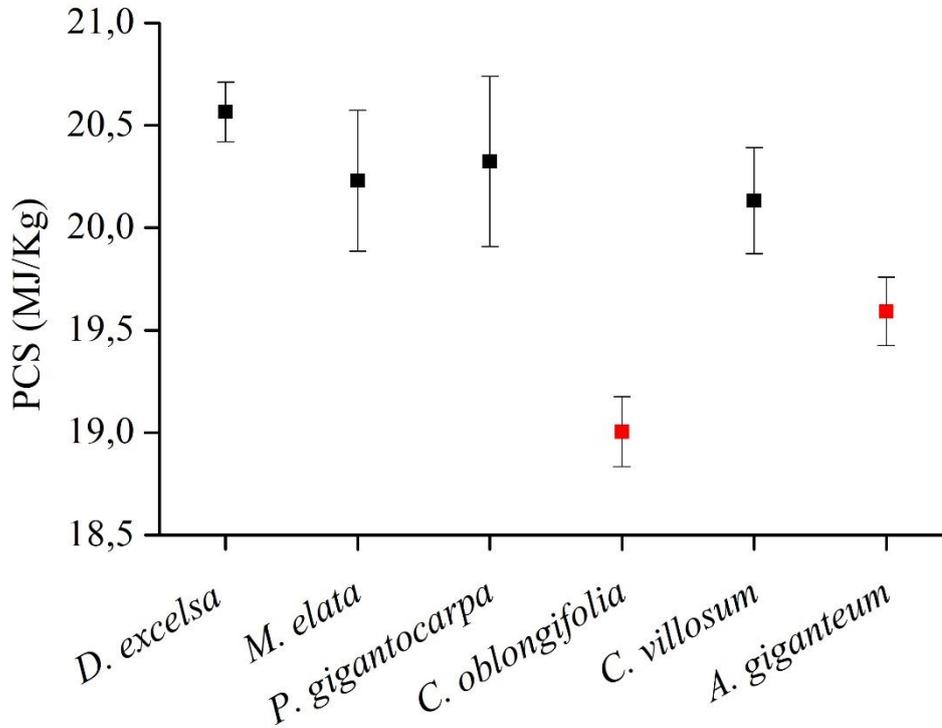
Dentre os componentes químicos moleculares, a lignina é um dos que mais auxilia na formação do carvão vegetal, devido a sua alta termorresistência atribuída a sua estrutura química complexa e ao seu grau de aromaticidade (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006; YANG et al., 2007). O alto teor de lignina interfere positivamente no rendimento gravimétrico em carvão vegetal e carbono fixo (MORIANA; VILAPLANA; EK, 2015). No entanto, a qualidade da lignina, isto é, a relação siringil/guaiacil (S/G) e o tipo de ligação entre os monômeros S e G precisam ser consideradas (PROTÁSIO et al., 2021). Além disso, o potencial energético pode ser influenciado pela composição química da madeira, particularmente pelo

teor de extrativos e lignina (DEMIRBAS, 2001). Estudos realizados por Lima et al. (2020b) verificaram correlação positiva do rendimento gravimétrico com o teor de extrativo. Dessa forma, a carbonização das madeiras residuais das espécies *D. excelsa* e *M. elata* pode resultar em elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Em relação aos teores de cinzas, o teste de Scott-Knott proporcionou a formação de três grupos similares (Figura 6). Foi observada a variação de 1,91% (*C. oblongifolia*) a 0,36% (*D. excelsa*). Pereira et al. (2020) encontraram variação de 0,23 a 2,09% para resíduos madeireiros. Os autores verificaram para a *C. villosum* e *Manikara* sp. 2,09% e 0,42%, respectivamente. O uso de espécies com alto teor de cinzas provoca danos às tubulações e câmaras de combustão pelo depósito de escórias e incrustações (HYTÖNEN; NURMI, 2015) e diminui o poder calorífico e a eficiência da combustão (KLASNJA; KOPITOVIC; ORLOVIC, 2002). No processo de carbonização para uso siderúrgico, a madeira deve ter baixo teor de cinzas, visto que a maior concentração das cinzas no carvão vegetal e estes compostos inorgânicos podem depreciar a qualidade do aço e das ligas metálicas produzidas (QUIRINO et al., 2005)

O poder calorífico variou de 19,00 MJ/kg a 20,57 MJ/kg para as madeiras residuais de *C. oblongifolia* e *D. excelsa*, respectivamente (Figura 7). De acordo com os resultados da ANOVA, o efeito espécie foi significativo para o poder calorífico superior, ocorrendo à formação de dois grupos. A *D. excelsa* (20,57 MJ/kg), *P. gigantocarpa* (20,32 MJ/kg), *M. elata* (20,23 MJ/kg) e a *C. villosum* (20,13 MJ/kg) se destacaram com as maiores médias. Provavelmente, isso ocorreu devido aos maiores teores de extrativos totais e lignina total reportados para essas biomassas (Figura 6). As espécies *A. giganteum* (19,59 MJ/kg) e *C. oblongifolia* (19,00 MJ/kg) formaram o grupo com as menores médias (Figura 6). Com base no estudo de Lima et al. (2020a), o poder calorífico superior da *D. excelsa*, *M. elata*, *C. villosum* e *C. oblongifolia* foi de 20,4 MJ/kg, 19,9 MJ/kg, 20,1 MJ/kg e 19,4 MJ/kg, respectivamente. Com base na literatura e nos resultados encontrados nesse estudo, há maior viabilidade para a composição química (extrativos e lignina) do que para a energia da combustão (LIMA et al., 2020a)

Figura 7- Poder calorífico superior de madeiras residuais por grupo de espécies. As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.



O poder calorífico superior é uma das características mais relevantes no estudo em sistemas de conversão. Essa característica determina a quantidade de energia liberada pela madeira durante sua queima (SHENG; AZEVEDO, 2005), sendo desejadas para uso energético espécies que possuem alto poder calorífico. A quantidade de calor liberado da madeira é extremamente importante para verificar a capacidade energética de determinada espécie. Além disso, os fornos de alvenaria utilizados na Amazônia são autotérmicos, parte da madeira precisa sofrer combustão para fornecer energia às etapas endotérmicas da carbonização. Logo, madeiras com maior poder calorífico são mais indicadas, pois possuem mais energia por unidade de massa.

Os menores valores de poderes caloríficos encontrados para *A. giganteum* (19,59 MJ/Kg) e *C. oblongifolia* (19,00 MJ/Kg) pode estar relacionado aos altos teores de cinzas.

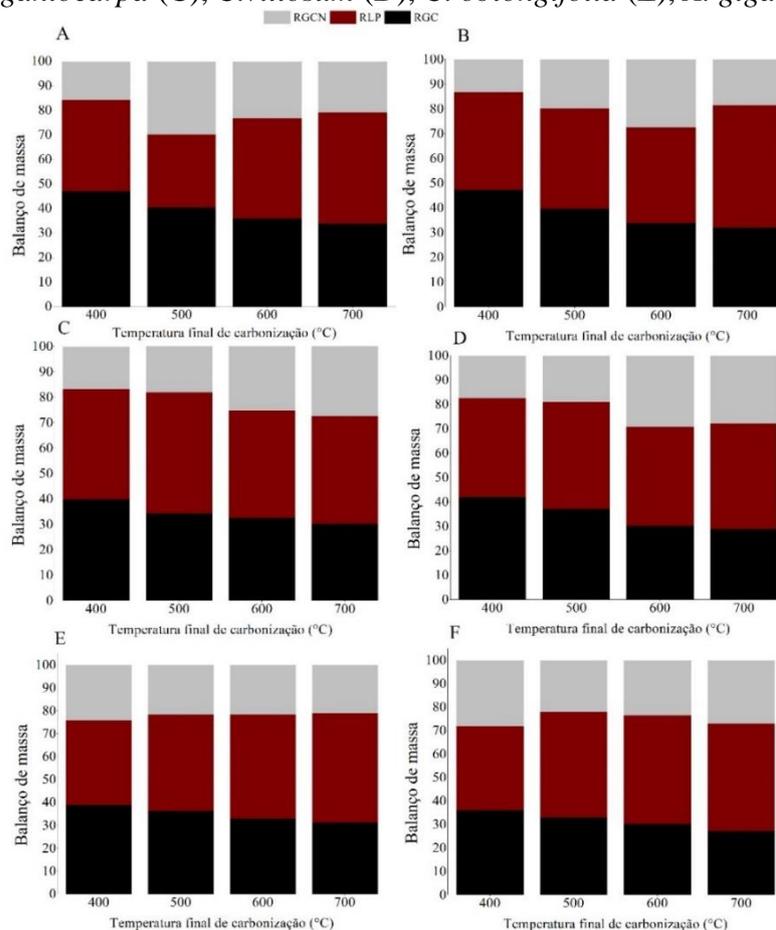
Com base nos resultados da composição química, densidade básica e poder calorífico é possível observar grande variação entre as espécies. Provavelmente a *D. excelsa* e *M. elata* serão as espécies com melhores propriedades energéticas e com maior rendimento

gravimétrico. As madeiras dessas espécies podem apresentar melhor desempenho nos processos de conversão termoquímicos devido a maior proporção de extrativos e lignina (TELMO; LOUSADA, 2011).

9.2 Rendimentos gravimétricos da carbonização

O maior RGC foi verificado para a *D. excelsa* nas temperaturas de 500 (40,50%) a 700°C (33,96%) em relação as outras espécies. Já a *A. giganteum* apresentou os menores valores em todas as temperaturas, ocorrendo variação de 36,17% (400°C) a 27,24% (700°C) (Figura 8).

Figura 8- Balanço de massa dos rendimentos do carvão vegetal da *D. excelsa* (A), *M. elata* (B), *P. gigantocarpa* (C), *C.villosum* (D), *C. oblongifolia* (E), *A. giganteum* (F).



Pelo teste F da análise de variância não foi encontrado efeito da interação entre espécie e temperatura para o rendimento gravimétrico (Tabela 5). Portanto, foram analisados os efeitos isolados de espécie e temperatura. O baixo coeficiente de variação confirma a precisão do

experimento e o delineamento utilizado para analisar os rendimentos. Modelos polinomiais quadráticos explicaram melhor o efeito da temperatura final de carbonização no RGC dos resíduos de madeira (Figura 10).

Tabela 5- Análises de variância das propriedades do carvão de resíduos madeireiros derivados da Amazônia.

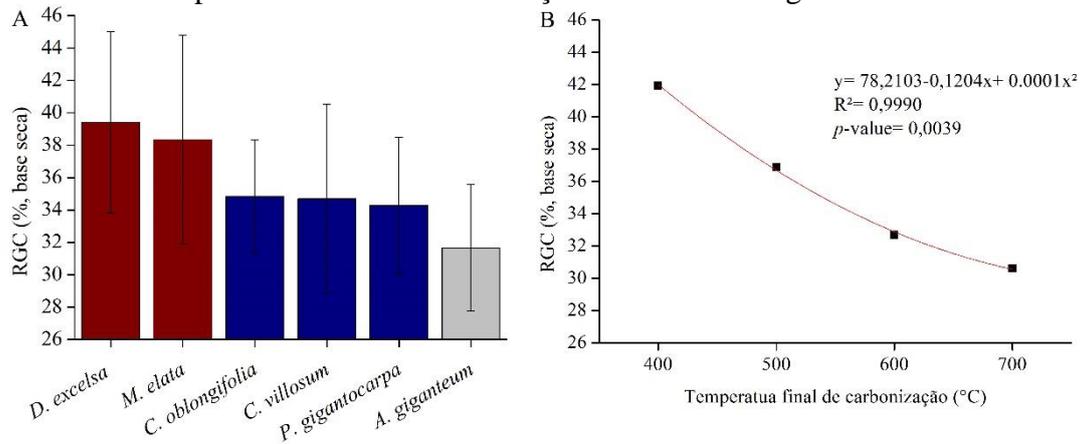
Fonte de variação	GL	RGC		RLP		RGNC	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espécie	5	97,7	22,308*	47,94	5,9250*	38,67	4,4375*
Temperatura	3	450,4	102,833*	143,02	17,6782*	112,92	12,9586*
Espécie x Temperatura	15	7,5	1,722 ^{ns}	47,04	5,8175*	62,46	7,1672*
CVe	-	5,89		6,76		13,18	

GL= Graus de liberdade, QM= Quadrado médio, Fc = F calculado, CVe = Coeficiente de variação experimental. *Significativo a 5% pelo teste F. N.S= não significativo a 5% de significância pelo teste F.

O RGC diminuiu com o aumento da temperatura final de carbonização, principalmente entre 400 e 500°C (Figura 9). Esse comportamento confirma o que já foi relatado em outros estudos (LIMA et al., 2022; TRUGILHO; SILVA, 2001; SILVA et al., 2020). Esse resultado ocorreu devido a intensa degradação térmica dos principais constituintes estruturais da madeira (hemiceluloses, celulose e lignina).

Analisando o efeito espécie, ocorreu a formação de três grupos, sendo os melhores resultados observados para *M. elata* (38,34%) e *D. excelsa* (39,41%). O menor rendimento foi encontrado para *P. gigantocarpa* com 31,66% (Figura 9). A *M. elata* (15,36%), *D. excelsa* (13,2%) e *C. villosum* (13,2%) tiveram as maiores reduções no rendimento de 400 a 700°C. Em contrapartida, a *C. oblogifolia* (7,6%), *A. giganteum* (8,93%) e *P. gigantocarpa* (9,66%) apresentaram as menores reduções no rendimento de 400 a 700°C.

Figura 9- Rendimento gravimétrico de carvão vegetal dos resíduos madeireiros (A) e o efeito da temperatura final de carbonização no rendimento gravimétrico em carvão (B).



O modelo quadrático representa o comportamento do RGC em função da temperatura final de carbonização (Figura 9), sendo verificado diminuição do rendimento com aumento da temperatura. Lima et al. (2022) constataram redução semelhante no RGC com o aumento da temperatura de 400 a 700°C para espécies amazônicas. Os autores encontraram para a *D. excelsa* maior redução, sendo de 24,7% (400-700°C) e o seu RGC foi maior em todas as temperaturas. Qi et al. (2016) verificaram a diminuição do rendimento em carvão vegetal para as espécies *Paulownia tomentosa* e *Pinus densiflora* com o aumento da temperatura (400, 600 e 800°C).

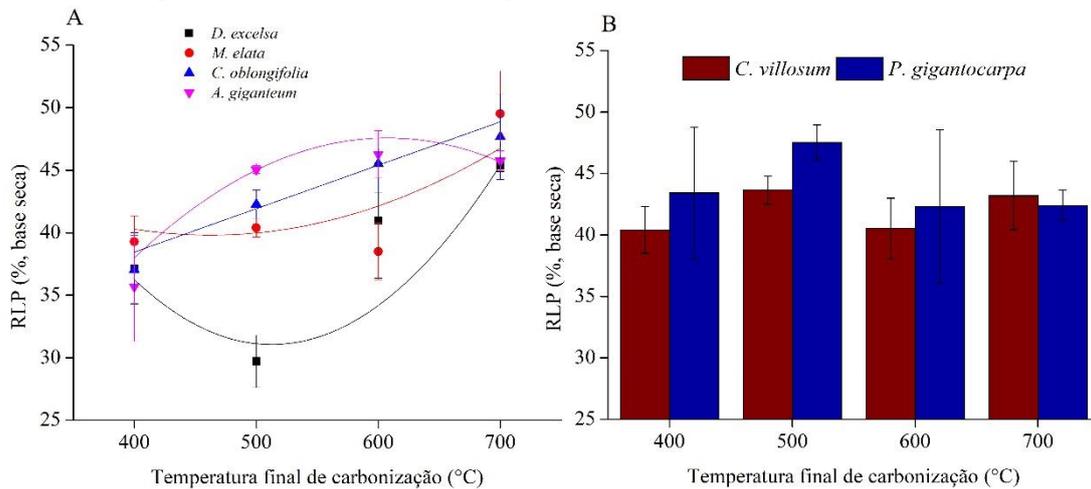
Os maiores valores de RGC encontrados para a *D. excelsa* e *M. elata* possivelmente estão relacionados aos teores de extrativos totais e lignina total. Em contrapartida, *A. giganteum* que possui menor rendimento, obteve os menores teores de lignina total (19,30%) e extrativos em acetona (0,25%).

Protásio et al. (2021) observaram aumento no RGC na carbonização da madeira de clones de *Eucalyptus* que apresentaram maiores teores de extrativos solúveis em acetona. Esses extrativos influenciam o valor energético da biomassa (MENUCELLI et al., 2019), o rendimento energético e o balanço de massa da pirólise (GOUVÊA et al., 2015).

Quanto ao RLP, foi observado interação entre os fatores analisados. Para a *C. villosum* e *P. gigantocarpa* não ocorreu efeito da temperatura. Foram observados maior valor para *C. oblongifolia* a 700°C (47,67%) e o menor valor para a *D. excelsa* a 500°C (29,71%) (Figura 10). Em outros estudos foi observado o aumento do RLP com a temperatura, no entanto nesse estudo foi verificado uma variação ao longo da temperatura. Na carbonização da madeira de *D. excelsa* ocorreu diminuição do RLP a 500°C, variando de 37,13% (400°C) para 29,71% (500°C). Essa diminuição pode ser explicada pela alta quantidade de extrativos que inibiu a

produção de levoglucosanas que ocorre a 500°C, acarretando aumento pela formação de fenol e craqueamento secundário de produtos de metanol e metano em altas temperaturas (GUO et al., 2010).

Figura 10- Rendimento em líquido pirolenhoso de resíduos madeireiros em função da temperatura final de carbonização.



Na carbonização da madeira residual de *M. elata* e a *C. villosum* ocorreu aumento do RLP até 500°C. Isso demonstra que a maioria das hemiceluloses (220-315°C) e celulose (315-400°C) se degradou rapidamente com o aumento da temperatura (CHENG et al., 2021). Posteriormente, ocorreu diminuição a 600°C e depois aumento a 700°C. Isso pode ser explicado pela diminuição da produção fenóis que ocorre em faixas de temperaturas menores (AMUTIO et al., 2012). O aumento do RLP a 700°C ocorreu devido a produção de aldeídos, que é máximo em temperaturas de 625 e 725°C (GUO et al., 2010).

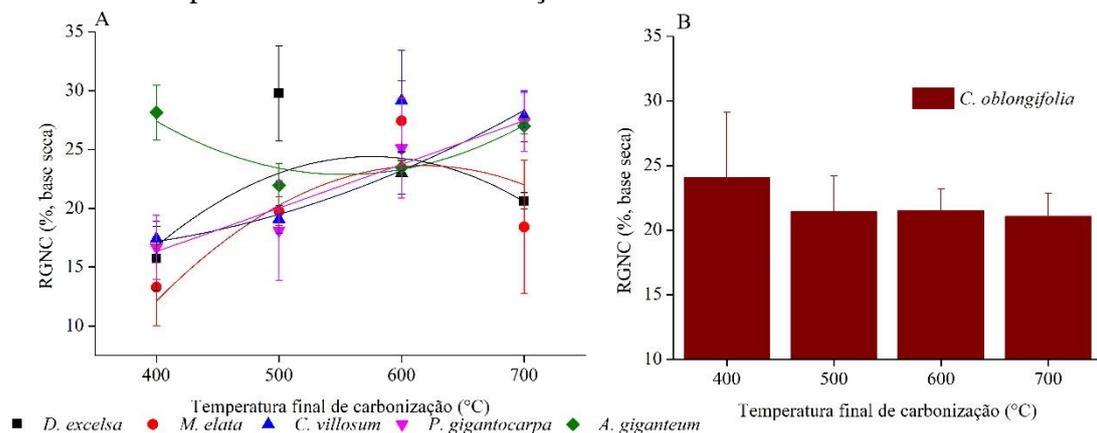
A *C. oblongifolia* obteve aumento do RLP ao longo da temperatura, sendo observado maior valor a 700°C (47,67%). Para a *P. gigantocarpa* foi observado maior produção de RLP a 500°C (47,52%), ocorrendo diminuição a 600°C (42,30%) e 700°C (42,40%), isso se deve a produção de levoglucosanas que é maior em espécies que possuem menor quantidade de extrativos (GUO et al., 2010). Já *A. giganteum* obteve aumento da fração líquida até 600°C (46,30%) ocorrendo diminuição a 700°C (45,74%), sendo acarretado devido ao baixo teor de lignina total (18,33%) que promove maior rendimento de líquidos e inibe a produção de ácido carboxílico (ROY et al., 1990). A Tabela 6 descreve os modelos estatísticos ajustados por espécie para esclarecer o comportamento do RLP em função da temperatura final de carbonização.

Tabela 6- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento do rendimento em líquido pirolenhoso produzido em escala laboratorial.

Espécie	Modelo	R ²	F _c	p-valor
<i>D. excelsa</i>	$y = 104,2797 - 0,2894X + 0,0003X^2$	0,75	12,99	7,40E-04
<i>M. elata</i>	$y = 97,9321 - 0,2437X + 0,0002X^2$	0,84	9,1	4,08E-03
<i>C. oblongifolia</i>	$y = 23,8367 + 0,0351X$	0,96	22,81	0,00005
<i>A. giganteum</i>	$y = -46,0414 + 0,3043X - 0,0002X^2$	0,97	9,13	0,00403

Para o RGNC foi observado efeito da interação entre as variáveis temperatura e espécie. Em todas as temperaturas ocorreu efeito significativo de espécie para o RGNC. Em estudo realizado por Shen et al. (2010) foram observados aumento de RGNC com o aumento da temperatura, variando de 18 a 42%, para as temperaturas de 400 e 700°C. No entanto, neste estudo, o RGNC apresentou considerável variação entre as espécies e no decorrer das temperaturas. A *D. excelsa* (15,74-20,64%), *M. elata* (13,29-18,43%), *C. villosum* (17,41-27,83%) e *P. gigantocarpa* (16,66-27,36%), apresentaram aumento do RGNC de 400 para 700°C (Figura 11). Em contrapartida, para *C. oblongifolia* e *A. giganteum* foi verificada diminuição da emissão de gases não condensáveis.

Figura 11- Rendimento em gases não condensáveis (RGNC) de resíduos madeireiros em função da temperatura final de carbonização.



A emissão de gases não condensáveis ocorre em maior quantidade entre 275-425 °C, com emissão de CH₄, CO e CO₂ (GONZÁLEZ et al., 2003). Em temperaturas superiores a 450°C, ocorre a emissão de menores quantidades de óxidos de carbono e maiores quantidades de CH₄ e H₂ (GONZÁLEZ et al., 2003). Alguns pesquisadores preferem resumir a emissão de gases não condensáveis ocorrendo primeiro entre 275-425°C, com emissões de óxidos de

carbono e metano, e em temperaturas maiores que 450°C possuindo baixa concentração de óxidos de carbono e hidrocarbonetos (GONZÁLEZ et al., 2003).

Para a carbonização das biomassas de *C. villosum*, *P. gigantocarpa* e *A. giganteum* foram observadas maiores produções de gases em temperaturas mais altas. Para a espécie *D. excelsa* foi constatada diminuição do RGNC de 600°C (22,27%) a 700°C (20,64%). Esse resultado pode ser explicado pela diminuição de CO₂, H₂, CO e água (GUO et al., 2010). Para a carbonização da madeira residual de *M. elata* foi observado decréscimo do RGNC a 700°C, sendo também causado pelo aumento de líquido pirolenhoso. Para a espécie *C. oblongifolia* não ocorreu efeito da temperatura final de carbonização no RGNC.

A Tabela 7 descreve os modelos estatísticos ajustados por espécie para esclarecer o comportamento do RGNC em função da temperatura final de carbonização.

Tabela 7- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécie para esclarecer o comportamento do rendimento em gases não condensáveis produzido em escala laboratorial.

Espécie	Modelo	R²	FC	p-valor
<i>D. excelsa</i>	$y = -100,7376 + 0,4581X - 0,0004X^2$	0,69	23,07	2,00E-05
<i>M. elata</i>	$y = -105,2138 + 0,4489X - 0,0004X^2$	0,84	20,63	4,00E-05
<i>C. villosum</i>	$y = -20,9755 + 0,1233X - 0,0001X^2$	0,82	0,76	0,38638
<i>P. gigantocarpa</i>	$y = 0,3551 + 0,0391X$	0,93	0,94	0,39661
<i>A. giganteum</i>	$y = 96,7649 - 0,2696X + 0,0002X^2$	0,94	8,15	0,00633

Os resultados citados nesse estudo demonstram a necessidade de considerar o controle de temperatura na carbonização de resíduos, visto que afetam os rendimentos do processo. Para o RGC ocorreu diminuição com aumento da temperatura final de carbonização, já para o RLP e RGNC ocorreu oscilação ao longo das temperaturas. Possivelmente, isso ocorreu devido a interação entre os compostos químicos da madeira durante a degradação térmica e, nesse aspecto, pesquisas mais detalhadas precisam ser realizadas para esclarecer o comportamento termoquímico das biomassas amazônicas. Para a produção de carvão vegetal é almejado maiores valores de RGC, pois proporciona maior produtividade. No entanto, é preciso analisar como a temperatura irá afetar as propriedades químicas, físicas e energéticas do carvão vegetal.

9.3 Densidade relativa aparente do carvão vegetal e consumo específico

O comportamento da densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal em relação à temperatura final de carbonização e a espécie está disposta na Figura 12. A DRA do carvão vegetal é um fator que deve ser analisado para orientar no destino final do biotermorreduzidor na indústria siderúrgica, pois quanto maior o seu valor, melhores as propriedades mecânicas (COUTO et al., 2023), acarretando a redução da friabilidade e promovendo aprimoramento da permeabilidade no interior do alto forno (COSTA et al., 2017). Os valores de DRA do carvão variaram de 0,37 a 0,66 g/cm³. Não foi verificado efeito da interação espécie e temperatura para a DRA. Isso demonstra que o efeito da temperatura independe da espécie (características da biomassa) (Tabela 8).

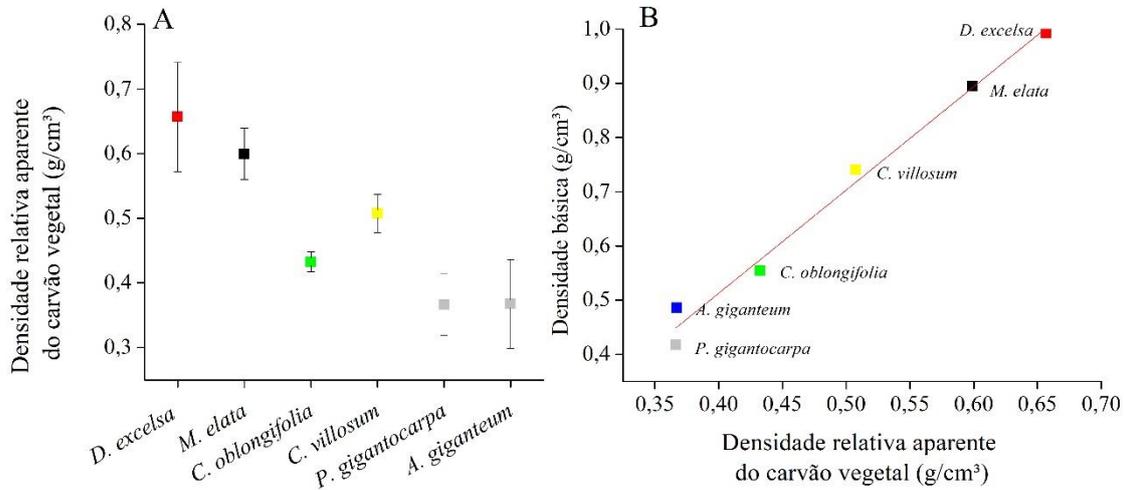
Tabela 8- Análises de variância da densidade relativa aparente (DRA) e consumo específico (CE) do carvão vegetal de resíduos madeireiros.

Fonte de variação	GL	DRA		CE	
		QM	Fc	QM	Fc
Espécie	5	0,1765	57,204*	41,70	448,17*
Temperatura	3	0,0037	1,213 ^{n.s}	6,58	70,76*
Espécie x Temperatura	15	0,0018	0,579 ^{ns}	0,12	1,33 ^{n.s}
CVe	-	11,38		6,42	

GL= Graus de liberdade, QM= Quadrado médio, Fc = F calculado, CVe = Coeficiente de variação experimental. *Significativo a 5% pelo teste F. N.S= não significativo a 5% de significância pelo teste F.

O carvão vegetal da espécie *D. excelsa* obteve o maior valor de DRA (0,66 g/cm³), em contraste, os carvões de *P. gigantocarpa* (0,37 g/cm³) e *A. giganteum* (0,37 g/cm³) apresentaram os menores valores (Figura 12). O valor mais acentuado de DRA para *D. excelsa* tem relação com a densidade básica da madeira que foi de 0,99 g/cm³, proporcionando carvão mais denso. De acordo com Lima et al. (2022), a densidade básica da madeira possui correlação positiva com a DRA, isto é, quanto mais elevado for a densidade da madeira mais denso será o carvão vegetal. Outro fator que pode ter contribuído é o alto teor de lignina, que auxilia na menor degradação da parede celular. Embora exista alta correlação da densidade básica com a DRA, pode ocorrer exceções conforme a composição química da parede celular (PROTÁSIO et al., 2021). Sendo explicado o que ocorreu para a *P. gigantocarpa* e *A. giganteum*, que mesmo tendo teores de lignina elevado possuiu menores valores para DRA.

Figura 12- Densidade relativa aparente (DRA) dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e correlação entre a densidade aparente do carvão vegetal (DRA) e a densidade básica da madeira (B). As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott.



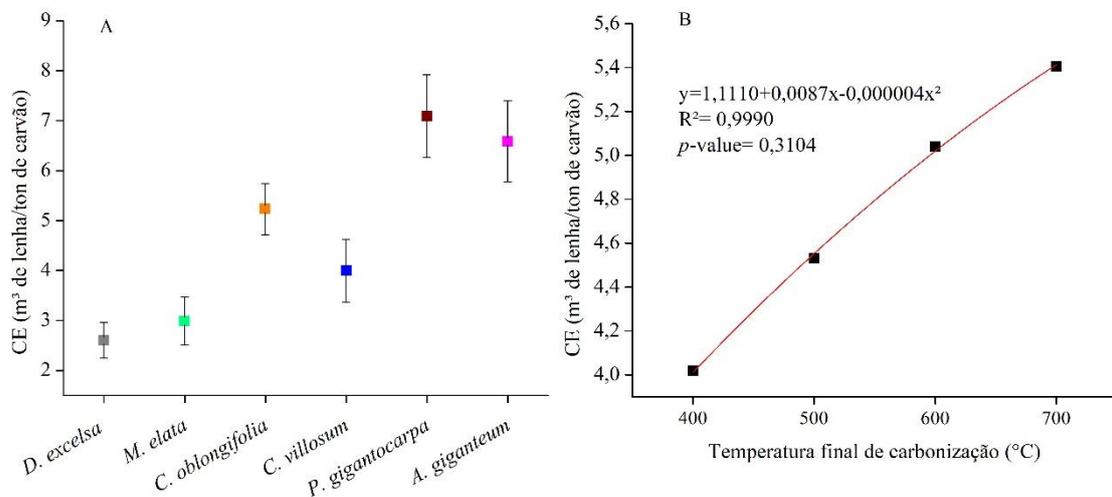
O carvão vegetal com DRA maior que 0,380 g/cm³ é preferencial para a indústria siderúrgica (PROTÁSIO et al., 2021), pois diminui o consumo específico dos alto fornos. Além disso, carvões mais densos apresentam maior estoque de carbono fixo (BARROS et al., 2023), maior rigidez (NETO et al., 2020) e maior densidade energética (CHENG et al., 2021).

Abreu Neto et al. (2020) analisaram a densidade relativa aparente do carvão vegetal de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus* e híbridos de *Eucalyptus*. Os autores constataram que a densidade relativa aparente diminuiu com aumento da temperatura de 300 a 700°C (0,63-0,44 g/cm³). Trugilho e Silva (2001) observaram diminuição da densidade relativa aparente com aumento da temperatura de pirólise de 300 a 700°C. Os autores concluíram que a densidade relativa aparente possui ponto mínimo de diminuição, ocorrendo até 660°C, acima dessa temperatura final ocorre aumento da densidade, sendo acarretado devido a estabilização da massa e redução do volume do carvão vegetal. Couto et al. (2023) encontraram densidade relativa aparente de 0,36 g/cm³ considerada elevada para a temperatura de 450°C. Lima et al. (2022) verificaram densidade relativa aparente de carvão vegetal produzido na temperatura de 400 a 700°C, sendo observado 0,600 g/cm³ para a *D. excelsa*, 0,527 g/cm³ para *Manilkara* sp. e 0,504 g/cm³ para *Caryocar* sp. Os resultados reportados na literatura se assemelham aos encontrados nesse estudo.

Com relação ao consumo específico não foi observado efeito da interação entre espécies e temperatura ($p \geq 0,05$). Quanto maior o consumo específico de lenha menor a eficiência da biomassa e maior o custo para produção do biotermorreduzidor (LOUREIRO et al., 2021). Os resultados sugerem que o aumento da temperatura final de carbonização proporciona aumento

do CE. Para a carbonização da madeira residual de *D. excelsa* foi observado menor consumo (2,60 m³/t) (Figura 13). Em contrapartida, para a espécie *P. gigantocarpa* foi constatado elevado consumo específico (7,09 m³/t). As espécies que possuíram menor consumo específico apresentaram maiores teores de lignina, extrativos totais e densidade básica. A *P. gigantocarpa* possui menor densidade básica (0,42 g/cm³) e extrativos totais (3,22%).

Figura 13- Consumo específico (CE) dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização no CE (B). As cores diferentes representam os grupos de médias de acordo com o teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.



Em estudo realizado por Lima et al. (2022) foi observado efeito da interação entre espécie e temperatura para o consumo específico (CE). O aumento da temperatura final de carbonização proporcionou aumento do consumo específico de lenha. Os autores verificaram menor consumo para *D. excelsa*. Portanto, o uso de resíduos com alta densidade é capaz de reduzir o consumo de lenha e aumentar a produtividade das unidades de produção de biorredutor (MOUTINHO et al., 2016).

9.4 Composição química do carvão vegetal

Para o teor de materiais voláteis não foi observado efeito significativo da interação entre espécie e temperatura final de carbonização (Tabela 9).

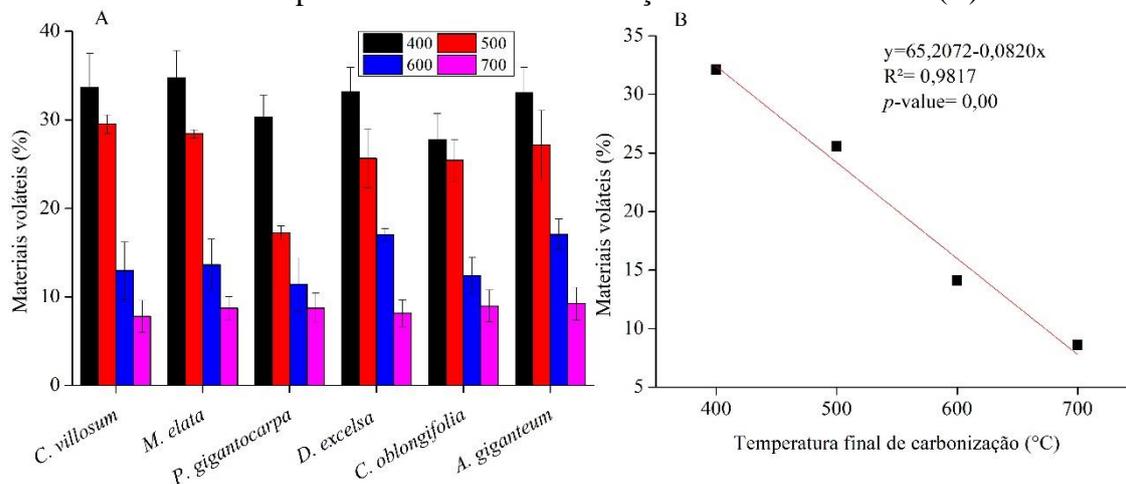
Tabela 9- Análises de variância da composição química do carvão vegetal de resíduos madeireiros.

FV	GL	MV		Cinzas		CF		RCF	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espécie (E)	5	42,9	4,028*	17,944	117,689*	36,1	3,573*	67,09	31,847*
Temperatura (T)	3	2055,8	193,078*	2,064	13,535*	1938,5	191,961*	3,80	1,808 ^{ns}
E x T	15	17,7	1,664 ^{ns}	0,433	2,842*	19,3	1,908*	1,31	0,622 ^{ns}
CVe	-		16,24		18,03		4,09		5,33

MV: materiais voláteis, CF: carbono fixo, RCF: rendimento em carbono fixo.

Os carvões vegetais de *A. giganteum* (21,64%), *M. elata* (21,38%), *D. excelsa* (21,00%) e *C. villosum* (20,98%) apresentaram os maiores teores médios de materiais voláteis (Figura 14). O aumento da temperatura final de carbonização resultou em diminuição do teor de materiais voláteis. O acréscimo da temperatura implica em aumento da degradação do material e, conseqüentemente, emissão de gases voláteis e fixação de carbono na forma sólida. A redução do rendimento de carvão vegetal com o aumento da temperatura de carbonização é imputada a diminuição do teor de material volátil em temperaturas mais altas (KUMAR; CHANDRASHEKAR, 2016). Esse fato ocorreu para todas as espécies desse estudo, sendo que para a *D. excelsa* (25,01%) e *M. elata* (26,01%) houve maior diminuição de 400°C para 700°C. A diminuição dos materiais voláteis promove aumento do teor de carbono fixo, com aumento da temperatura.

Figura 14- Análise dos materiais voláteis dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização no material volátil (B).

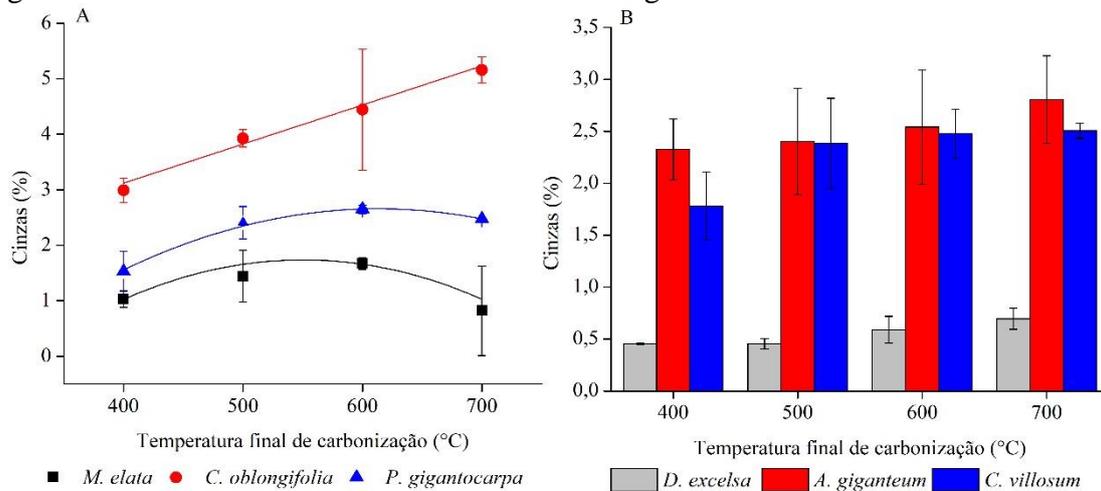


Os materiais voláteis influenciam na decomposição térmica e no comportamento da combustão (MASSUQUE et al., 2021), provocando a queima mais rápida em espécies que possuem maior teor desse componente (CUVILAS et al., 2014; PROTÁSIO et al., 2019) e maior facilidade de ignição (SYRODOY et al. 2018). Além disso, alto teor de material volátil proporciona maior quantidade de fumaça (AREF et al., 2017), menor eficiência energética e maior consumo de carvão vegetal. De acordo com Dias Júnior et al (2015), tem-se casos em que é preferível a presença de chamas, já em outras demandam de queima homogênea no estado sólido. Logo, é recomendado um carvão com alto teor de materiais voláteis quando se quer mais chama e altos teores de carbono fixo quando se deseja uma queima mais homogênea (DIAS JÚNIOR et al., 2015; DIAS JÚNIOR 2018). Para uso metalúrgico, é recomendado carvão com teor de carbono fixo mais elevado, pois o carvão fornecerá mais calor e carbono. Para o uso doméstico, a produção de brasas depende do carbono fixo e da emissão de voláteis (ZHAO et al., 2015; DIAS JÚNIOR 2018), portanto, para as duas utilizações (industrial e doméstico) o carbono fixo é requerido no carvão vegetal.

Trugilho e Silva (2001) analisaram o efeito das temperaturas finais de carbonização no carvão vegetal de *Hymenaea courbaril*. Os autores verificaram valores no teor de materiais voláteis variando de 40,13% a 12,49% para temperaturas finais de carbonização 400 e 700°C, respectivamente. Os teores de materiais voláteis observados neste estudo são menores e o carbono fixo obteve maior valor do que o relatado por Trugilho e Silva (2001). Quanto maior a temperatura final de carbonização mais acentuado será a liberação de compostos voláteis. Esse fato retrata o aumento do conteúdo dos compostos inorgânicos e carbono fixo no processo de carbonização. Consequentemente, processos de carbonização que usam temperaturas finais de carbonização maiores irão apresentar carvão com maior teor de carbono fixo e cinzas (COUTO et al., 2015).

Para o teor de cinzas ocorreu interação significativa entre espécie e temperatura. A espécie *C. oblongifolia* apresentou as maiores médias em todas as temperaturas, variando de 2,99 % (400°C) a 5,16% (700°C). Já os carvões de *D. excelsa*, *A. giganteum* e *C. villosum* não ocorreu efeito da temperatura (Figura 15). A *C. oblongifolia* obteve maiores valores de teor de cinzas na madeira, o que resulta em carvões com maiores teores de cinzas e a *D. excelsa* que possuiu menor valor obteve menor teor de cinzas na madeira. Espera-se que com aumento da temperatura, esses componentes continuem intactos, ou seja, são transferidos completamente da madeira para o carvão vegetal (TRUGILHO; SILVA, 2001).

Figura 15- Análise do teor de cinzas dos carvões vegetais de madeiras residuais.



Espera-se que com aumento da temperatura ocorra aumento da concentração de cinzas, porém, isso não foi observado para todas as espécies nesse estudo, ocorrendo com a *M. elata* e *P. gigantocarpa* a 700°C. Kumar e Chandrashekar (2016) observaram aumento no teor de cinzas na temperatura de 300 a 700°C, ocorrendo diminuição a 800°C para a carbonização da madeira de *Prosopis juliflora*.

Trugilho e Silva (2001) observaram aumento do teor de cinzas do carvão vegetal da madeira de jatobá até 800°C (7,32%), ocorrendo diminuição a 900°C (6,74%). Os autores relataram que esse comportamento ocorreu devido a vaporização (ignição) de componentes minerais sensíveis a essa faixa de temperatura. Temperaturas elevadas afetam os minerais solúveis como K e Na nas cinzas podendo ser emitidos como material particulado, provocando redução nas cinzas (DALKHSUREN et al., 2023). Altos teores de cinzas não são desejáveis, pois podem acarretar acúmulo de óxidos minerais nas peças metálicas prejudicando as características do ferro gusa ou ferro liga (PROTÁSIO et al., 2022). Além disso, menores teores de cinzas auxiliam no aumento do poder calorífico do biocombustível (KLASNJA; KOPITOVIC; ORLOVIC, 2002). Diante disso, o carvão da *C. oblongifolia* é menos promissor levando em consideração o teor de cinzas.

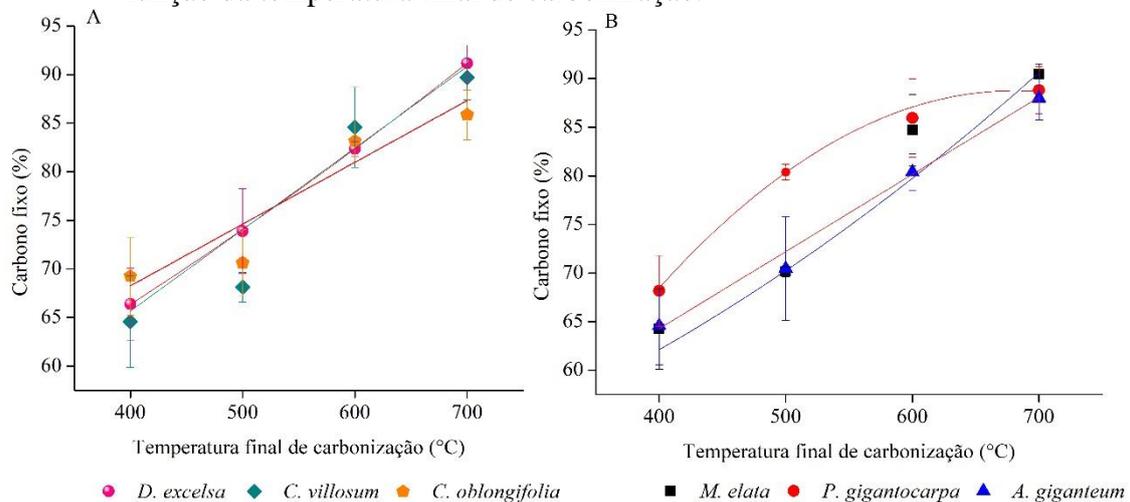
A Tabela 10 apresenta os modelos estatísticos ajustados por espécie que estabelecem o comportamento das cinzas em função da temperatura final de carbonização.

Tabela 10- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento das cinzas.

Espécie	Modelo	R ²	FC	p-valor
<i>M. elata</i>	$y = -7,7155 + 0,0344X - 0,0003X^2$	0,91	7,89	7,16E-03
<i>C. oblongifolia</i>	$y = 0,2665 + 0,0070x$	0,99	48,54	0,00
<i>P. gigantocarpa</i>	$y = -7,0688 + 0,0321x - 0,00003x^2$	0,99	5,46	0,02372

Para o teor de carbono fixo foi observado interação significativa entre a temperatura e espécie. No desdobramento da interação e avaliação do efeito de espécie dentro das temperaturas finais de 400°C, 600°C e 700°C não foi verificada diferença estatística entre as espécies. Na temperatura de 500°C foi observado maior teor de carbono fixo para *P. gigantocarpa* com 80,37% (Figura 16). O teor de carbono fixo possui desempenho inversamente proporcional ao teor de matérias voláteis e cinzas, corroborando para as menores médias de voláteis e elevado teor de carbono fixo a medida que a temperatura final aumenta (SILVA et al., 2020). Na temperatura de 400°C, o maior teor de carbono fixo foi observado para a *C. oblongifolia* (69,23) e *P. gigantocarpa* (68,17%). Em 700°C foi verificado para *D. excelsa* 91,16% e o menor valor para *C. oblongifolia* com 85,86%.

Figura 16- Análise do teor de carbono fixo dos carvões vegetais de madeiras residuais em função da temperatura final de carbonização.



Em estudo realizado com *Corymbia citriodora* foi observado o aumento do teor de carbono fixo com o aumento da temperatura, fato também verificado nesse trabalho (COUTO et al., 2015). O carvão vegetal da espécie *C. citriodora* teve teor de carbono fixo de 59,08% a 350°C e de 83,75% a 550°C. Trugilho e Silva (2001) verificaram a variação de 58,91 a 86,15% de 400°C a 700°C para o carvão da espécie de *Hymenaea courbaril*. Quanto mais elevada a temperatura final de carbonização maior será a concentração de carbono fixo no carvão vegetal.

Todas as espécies estudadas apresentaram teor de carbono fixo maiores que 85% a 700°C. Altos teores de carbono fixo são desejáveis para o uso siderúrgico (DIAS JÚNIOR et al., 2020), pois proporcionam melhor estabilidade térmica e fornece maior quantidade de energia (SILVA; ATAÍDE, 2019). Além disso, alta quantidade de carbono fixo auxilia a aumentar a produtividade dos alto fornos de aço (PEREIRA et al., 2012), diminuir a concentração de materiais voláteis e maior conteúdo de carbono, sendo o componente essencial para a redução do ferro no decorrer da produção de gusa (SILVA et al., 2020). A Tabela 11 apresenta os modelos estatísticos ajustados por espécie para esclarecer o comportamento do teor de carbono fixo em função da temperatura final de carbonização.

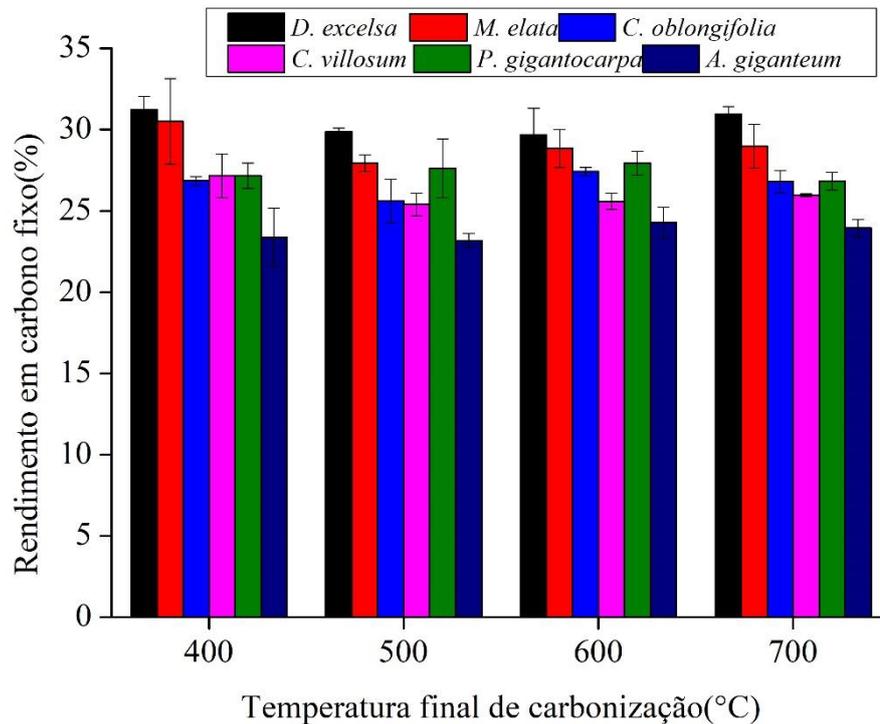
Tabela 11- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento do carbono fixo.

Espécie	Modelo	R ²	FC	p-valor
<i>D. excelsa</i>	$y = 42,3819 + 0,04691X + 0,00003X^2$	0,990	0,13	7,24E-01
<i>M. elata</i>	$y = 24,9869 + 0,0974X - 0,000004X^2$	0,970	0,00	9,67E-01
<i>C. oblongifolia</i>	$y = 42,9072 + 0,0624x$	0,990	57,82	0,000
<i>C. villosum</i>	$y = 26,2513 + 0,0918x$	0,993	125,14	0,000
<i>P. gigantocarpa</i>	$y = -24,1573 + 0,3249X - 0,0002X^2$	0,990	6,51	0,01396
<i>A. giganteum</i>	$y = 31,7951 + 0,0801x$	0,990	95,26	0,000

De maneira geral, a indústria do aço e o setor doméstico almejam carvão vegetal com altos teores de carbono fixo e baixos teores de materiais voláteis e cinzas, pois essas características melhoram o consumo específico, o que concede maior eficiência energética (LOUREIRO et al., 2021).

Com relação ao rendimento em carbono fixo (RCF) não foi verificada interação significativa entre espécie e temperatura. Os resultados encontrados demonstram efeito estatístico significativo apenas para espécie. Na carbonização da madeira residual de *D. excelsa* foi encontrado o maior RCF (30,44%). Por outro lado, o menor valor foi observado na carbonização da madeira de *A. giganteum* (23,69%) (Figura 17). O RCF se correlaciona positivamente com os teores de lignina e extrativos (OLIVEIRA, 2010), sendo encontrado maiores rendimentos em espécies que possuíram maiores valores dessas características. Lima et al. (2020) verificaram rendimento de carbono fixo para *D. excelsa* de 33,2%, *M. elata* 28,7%, *C. villosum* 26,5% e *C. oblongifolia* 26,8% a 450°C.

Figura 17- Análise do rendimento em carbono fixo dos carvões vegetais de madeiras residuais.



O RCF indica a quantidade de carbono presente na madeira e que permaneceu retida no carvão vegetal na forma de carbono sólido. Deste modo, espécies que possuem maior rendimento de carbono fixo são cobiçados para fins energéticos, pois preservarão maior quantidade de carbono na forma sólida (SIMETTI et al., 2018), ou seja, terão maior quantidade de energia e menor perda de energia na carbonização. Portanto, *D. excelsa* se destaca para a produção de biotermorreductor, já que possui maiores valores de RGC, RCF e densidade relativa aparente, associado a baixos teores de cinzas.

9.5 Propriedades energéticas, eficiência energética e classificação do carvão de resíduos madeireiros

A análise estatística demonstrou que para a densidade energética e eficiência energética não ocorreu efeito significativo da interação entre a espécie e temperatura, havendo apenas efeitos simples da espécie e da temperatura. Em contrapartida, foi observado para o poder calorífico superior o efeito significativo da interação da espécie e temperatura final de carbonização (Tabela 12).

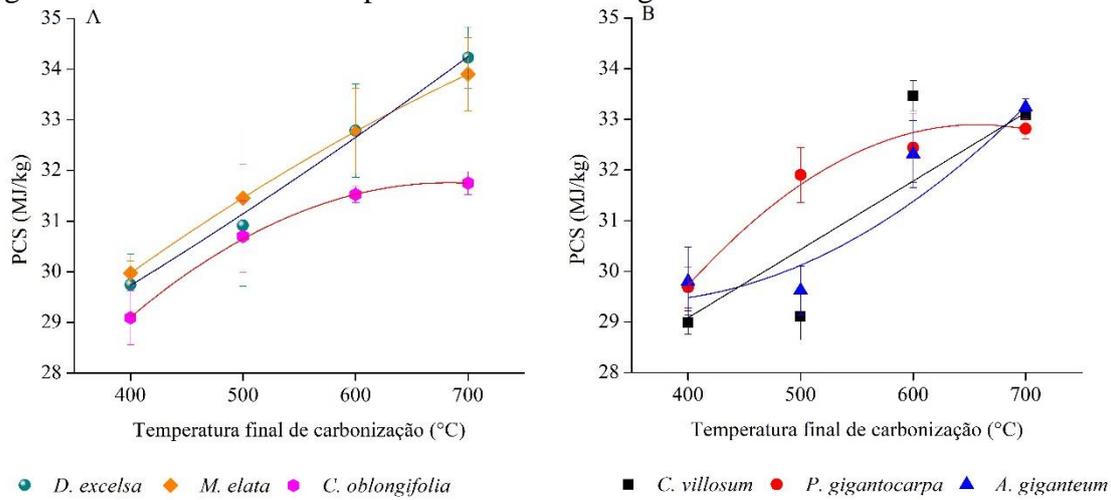
Tabela 12- Análises de variância das propriedades energéticas do carvão vegetal de resíduos madeireiros.

Fonte de variação	GL	PCS		DE		EE	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espécie	5	2,75	6,870*	189,69	52,743*	213,9	19,481*
Temperatura	3	51,23	127,857*	30,03	8,351*	416,7	37,952*
Espécie x Temperatura	15	1,5	3,737*	1,96	0,544 ^{n.s}	11,1	1,015 ^{n.s}
CVe	-		2,01		12,3		5,95

PCS = poder calorífico superior, DE = densidade energética, EE = eficiência energética, GL= Graus de liberdade, QM= Quadrado médio, Fc = F calculado, CVe = Coeficiente de variação experimental. *Significativo a 5% pelo teste F. N.S= não significativo a 5% de significância pelo teste F.

O poder calorífico superior indica a qualidade máxima de energia que será liberada pela queima do combustível isento de umidade (SHEN; AZEVEDO, 2005). Dentro da temperatura de 400°C e 600°C não foi encontrado diferença estatística entre as espécies. Já a 500°C a *P. gigantocarpa* (31,90 MJ/kg), *M. elata* (31,45 MJ/kg), *D. excelsa* (31,92 MJ/kg) e *C. oblongifolia* (30,7 MJ/kg) possuíram as maiores médias (Figura 18). Em contrapartida, *A. giganteum* (29,62 MJ/kg) e *C. villosum* (29,10 MJ/kg) tiveram os menores valores. A 700°C a *D. excelsa* (34,23 MJ/kg) e *M. elata* (33,9 MJ/kg) obtiveram os maiores valores. Nessa temperatura o menor valor foi encontrado para *C. oblongifolia* com 31,41 MJ/kg. Os menores valores para todas as espécies foram verificados em temperaturas mais baixas, por outro lado os valores mais elevados foram observados a 700°C.

Figura 18- Poder calorífico superior dos carvões vegetais de madeiras residuais.



Para espécies comerciais de *Eucalyptus* sp. são observadas variação de 28,2 a 32 MJ/kg (BARROS et al., 2023). Protásio et al (2021) verificaram que os carvões vegetais para clones de *Eucalyptus* apresentaram poder calorífico superior variando de 30,71 MJ/Kg a 31,77 MJ/Kg. Massuque et al. (2023) observaram o poder calorífico superior variando de 30,97 MJ/ kg a 31,63 MJ/Kg, para espécies de *Corymbia torelliana* e *Eucalyptus amplifolia*, respectivamente. Os carvões de resíduos madeireiros apresentaram poder calorífico superior dentro da faixa de temperatura normalmente usada para outras espécies e clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* relatados na literatura.

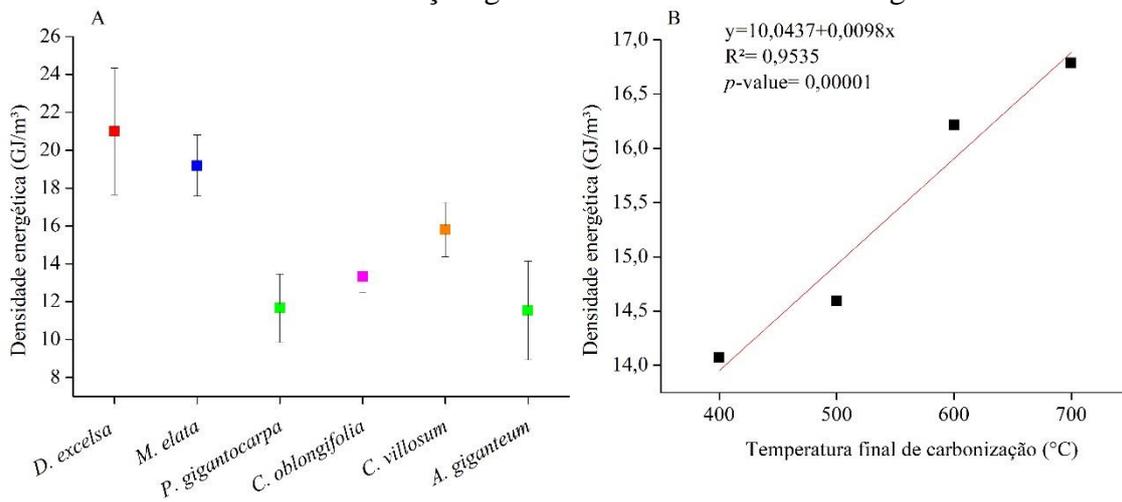
A *C. villosum* e a *C. oblongifolia* obtiveram menores valores para o poder calorífico superior em decorrência do teor de cinzas que provocam a diminuição das propriedades energéticas (LIMA et al., 2020b, ROUSSET et al., 2011). Massuque et al. (2021) verificaram essa correlação entre o teor de cinzas e o poder calorífico.

Tabela 13- Modelos polinomiais quadráticos e lineares ajustados por espécies para esclarecer o comportamento do poder calorífico.

Espécie	Modelo	R ²	FC	p-valor
<i>D. excelsa</i>	$y=25,4648+0,0078X+0,00001X^2$	0,99	0,14	7,12E-01
<i>M. elata</i>	$y= 22,2820+0,0227X-0,00001X^2$	1,00	0,23	6,34E-01
<i>C. villosum</i>	$y= 25,8761+0,0090x$	0,87	0,00	0,11002
<i>P. gigantocarpa</i>	$y= 12,8949+0,0606X-0,00005X^2$	0,98	6,35	0,01509
<i>A. giganteum</i>	$y= 32,1103-0,0174X+0,00003X^2$	0,89	2,29	0,137

A densidade energética corresponde a quantidade de energia armazenada por unidade de volume de combustível (SILVA et al., 2018). A densidade energética variou de 11,53 GJ/m³ a 20,99 GJ/m³ para os carvões de *A. giganteum* e *D. excelsa*, respectivamente (Figura 19). A indústria siderúrgica almeja biotermorreduzidor que possui maior densidade energética, pois essa característica pode aumentar a quantidade de energia liberada dentro do reator de volume fixo, resultando em economia de matéria prima (BARROS et al., 2023). A energia necessária para produzir 1 tonelada de ferro gusa corresponde a 17,21 GJ (SOUZA; PACCA, 2021), portanto, todas as espécies desse estudo possuem alta produtividade energética.

Figura 19- Análise da densidade energética dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização nessa variável (B). Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância.



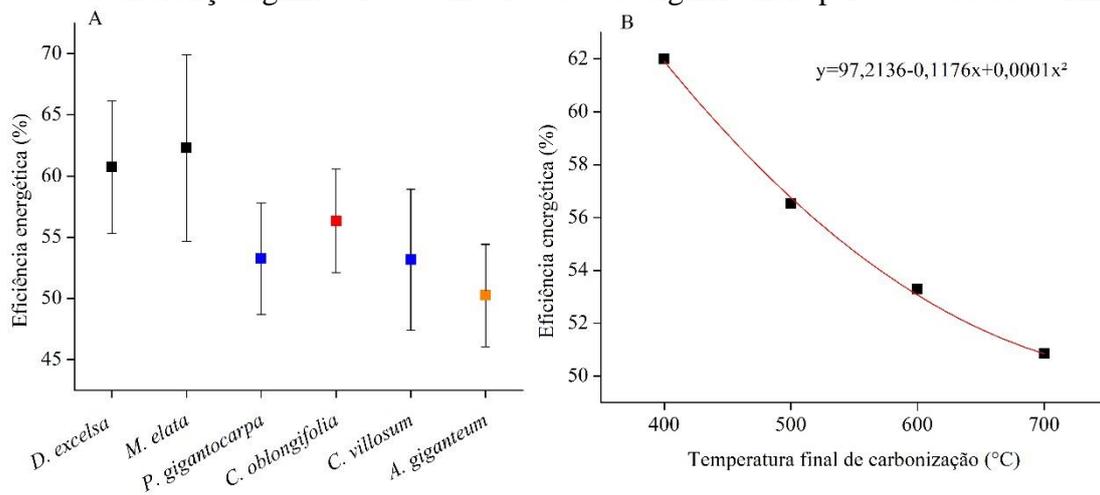
Realizando a conversão para saber o gasto de carvão para produção de 1 tonelada de ferro gusa, a *C. oblongifolia* (0,56 t carvão/t gusa), *C. villosum* (0,55 t carvão/t gusa) e *A. giganteum* (0,55 t carvão/t gusa) apresentaram os maiores gastos. Os menores valores foram apresentados pela *M. elata*, *D. excelsa* e *P. gigantocarpa* que tiveram médias de 0,54 t carvão/t gusa.

Os resultados encontrados nesse estudo foram superiores ao verificado por Protásio et al. (2020) estudando o potencial energético de clones de eucaliptos, ocorrendo variação de 8,2 GJ/m³ a 10,3 GJ/m³. Isso demonstra que o carvão vegetal produzido a partir de resíduos propicia valores de densidade energética superiores a espécies que são tradicionalmente utilizadas para fins siderúrgicos. Lima et al. (2020b) analisaram a densidade energética de carvões vegetais produzidos na temperatura final de 450°C das espécies *D. excelsa*, *M. elata*, *C. oblongifolia* e *C. villosum*, sendo verificado médias de 18,4, 16,7, 12,6 e 13,6 GJ/m³, respectivamente. Os

autores não verificaram densidade energética menores que $12,4 \text{ GJ/m}^3$ para os carvões vegetais de resíduos madeireiros.

Em relação a eficiência energética a análise de variância não verificou efeito significativo entre a espécie e temperatura. A eficiência energética varia com a temperatura de carbonização, ocorrendo diminuição com o aumento da temperatura. A *D. excelsa* e a *M. elata* possuíram os maiores resultados, sendo 60,73% e 60,29 %, respectivamente (Figura 20). O menor valor de eficiência energética foi para a carbonização da espécie *A. giganteum* (50,23%). Os valores encontrados para a *D. excelsa* e *M. elata* podem estar correlacionados aos altos valores de extrativos totais e em acetona encontrados para essas espécies. Em síntese, percebe-se que os valores encontrados nesse estudo são similares aos reportados na literatura.

Figura 20- Análise da eficiência energética dos carvões vegetais de madeiras residuais (A) e o efeito da temperatura final de carbonização (B). Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.



As espécies mais apropriadas para fornecer carvão de alta qualidade, segundo o FVI, foram ordenadas da seguinte forma: *D. excelsa*, *M. elata* e *C. villosum* (Tabela 14).

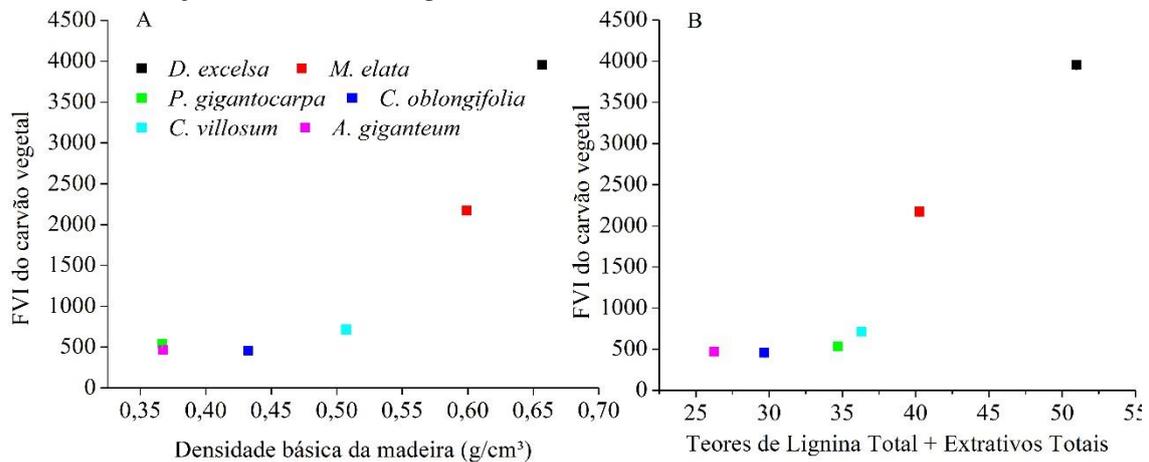
Tabela 14- Classificação energética do carvão vegetal de resíduos madeireiros.

Espécie	FVI	Ranking
<i>D. excelsa</i>	3952	1°
<i>M. elata</i>	2170	2°
<i>C. villosum</i>	713	3°
<i>P. gigantocarpa</i>	536	4°
<i>A. giganteum</i>	466	5°
<i>C. oblongifolia</i>	336	6°

A *D. excelsa* e *M. elata* possuem as melhores propriedades químicas, físicas e energéticas o que acarretou no maior valor de FVI. As espécies que possuíram menores valores para a densidade, lignina total e extrativos obtiveram menores valores de FVI (Figura 21).

Lima et al. (2020b) verificou a 400°C, FVI para a *D. excelsa* (3713), *M. elata* (1310), *C. vilosum* (708) e *C. oblongifolia* (344). As espécies que possuem menor FVI apresenta baixa densidade básica e alto teor de cinzas em comparação as outras espécies (MASSUQUE et al.,2021).

Figura 21: Análise do FVI em função da densidade básica das madeiras residuais (A) e FVI em função aos teores de lignina total e extrativos totais (B).



O FVI proporciona uma análise em conjunto do poder calorífico superior, densidade aparente e cinzas do carvão vegetal, por essa razão, esse índice tem sido utilizado para classificar os combustíveis de biomassa (MUSULE et al. 2018; ALVES et al. 2020). Esse índice é responsável por fornecer uma classificação entre as espécies em termos de inflamabilidade, produção de calor e possibilidade de corrosão de caldeiras (ALVES et al. 2020).

10.0 Conclusões

Madeira com alto teor de lignina e extrativos solúveis em acetona proporcionaram maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal durante a carbonização. Além disso, o maior teor de lignina e densidade impactaram na diminuição do consumo específico e aumento da densidade relativa aparente do carvão vegetal.

O estudo revelou que não ocorreu interação significativa entre o efeito espécie e temperatura final de carbonização no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, sendo a hipótese não comprovada, pois a característica mais importante foi a espécie.

O aumento da temperatura final de carbonização proporcionou diminuição do rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Para o RLP e RGNC não foi observado padrão definido, pois além da temperatura, há efeito de espécie.

A temperatura de carbonização não influenciou a densidade relativa aparente e o rendimento em carbono fixo. O acréscimo da temperatura de carbonização resultou na concentração de carbono fixo e cinzas. Já os materiais voláteis diminuiu com a temperatura.

Para a densidade energética ocorreu aumento com o acréscimo da temperatura final de carbonização, sendo o contrário observado para a eficiência energética. Para o poder calorífico superior foi verificado aumento com a temperatura final de carbonização e interação entre os efeitos analisados.

Todos os carvões vegetais apresentaram características adequadas para a indústria. No entanto, deve ser considerado o teor de cinzas que foi elevado para os carvões de *C. villosum*, *C. oblongifolia*, *P. gigantocarpa* e *A. giganteum*. Além disso, recomenda-se avaliar a possibilidade da separação dos carvões vegetais, produzidos a partir desses resíduos lenhosos, em classes de qualidade visando à minimização da variabilidade das propriedades do biotermorreductor.

As temperaturas entre 400-500 °C proporcionaram melhor balanço de massa, acarretando maior produtividade e melhores características para o carvão vegetal, sem prejuízos na concentração de carbono fixo e poder calorífico dos carvões vegetais.

11.0 Perspectivas futuras

Estudos futuros deverão discutir sobre a proporção S/G da lignina e composição dos extrativos, visto que essas características podem influenciar diretamente o rendimento e propriedades químicas do biotermorreductor. Além disso, é preciso analisar a cinética da

pirólise, higroscopicidade e combustibilidade dos carvões vegetais destinadas aos usos domésticos e industriais.

12.0 REFERÊNCIAS

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. 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 11941: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ABREU NETO, R., ASSIS, A. A., BALLARIN, A. W., HEIN, P. R. G. Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. *SN Applied Sciences*, v. 2, n. 6, pág. 1020, 2020.

ALVES, J. L. F., SILVA, J. C. G., MUMBACH, G. D., DI DOMENICO, M., SILVA FILHO, V. F., SENA, R. F., MACHADO, A. F., MARANGONI, C. Insights into the bioenergy potential of jackfruit wastes considering their physicochemical properties, bioenergy indicators, combustion behaviors, and emission characteristics. *Renewable Energy*, v. 155, p. 1328-1338, 2020

AMUTIO, M., LOPEZ, G., ARTETXE, M., ELORDI, G., OLAZAR, M., BILBAO, J. Influence of temperature on biomass pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Resources, Conservation And Recycling*, v. 59, p. 23-31, 2012.

AREF, I. M., SALEM, M. Z., SHETTA, N. D., ALSHAHRANI, T. S., NASSER, R. A. Possibility of using three invasive non-forest tree species as an alternative source for energy production. *Journal of Wood Science*, v. 63, n. 1, p. 104-114, 2017.

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, p. 519- 536, 2016.

ASTM, American Society for Testing and Materials. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal (**D1762-84**). West Conshohocken: ASTM International, 2013.

- ASTM, American Society For Testing Materials- **ASTM E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM International, p.8, 2004.
- BARROS, D. D. S., LIMA, M. D. R., DIAS JUNIOR, A. F., BUFALINO, L., MASSUQUE, J., SANTOS, E. V., TRUGILHO, P. F., OLIVEIRA, F. A., PROTÁSIO, T. D. P. Does the Segregation of Wood Waste from Amazonia Improve the Quality of Charcoal Produced in Brick Kilns?. **BioEnergy Research**, p. 1-14, 2023.
- CHENG, J., HU, S. C., KANG, K., LI, X. M., GENG, Z. C., ZHU, M. Q. The effects of pyrolysis temperature and storage time on the compositions and properties of the pyrolytic acids generated from cotton stalk based on a polygeneration process. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113226, 2021.
- COSTA, L. J., TRUGILHO, P. F., LIMA, J. T., SIMETTI, R., BASTO, T. A. Mechanic characterization of charcoal of *Corymbia* clones. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 629-639, 2017.
- COUTO, A. M., MONTEIRO, T. C., TRUGILHO, P. F., LIMA, J. T., DA SILVA, J. R. M., NAPOLI, A., ALMEIDA, D. P. Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, v. 34, n. 2, p. 531-538, 2023.
- COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., NAPOLI, A., LIMA, J. T., MOREIRA, J. R. S., PROTÁSIO, T. D. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n.108, p. 817-831., 2015.
- CRUZ FILHO, D., SILVA, J. N. M. Evaluation of the amount of coarse woody debris in area of logged and undisturbed forests, using line-intercept sampling, in the Medium Moju River, Eastern Amazonia, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 527-532, 2009.
- CSANÁDY, E.; MAGOSS, E.; TOLVAJ, L. **Quality of machined wood surfaces**. Springer International Publishing: New York City, 2015.
- CUVILAS, C., LHATE, I., JIRJIS, R., TERZIEV, N. The characterization of wood species from Mozambique as a fuel. **Energy Sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects**, v. 36, n. 8, p. 851-857, 2014.
- DALKHSUREN, D., IWABUCHI, K., ITOH, T., NARITA, T., PIASH, M. I., NACHIN, B., SUKHBAATAR, G. Effects of ash composition and combustion temperature on reduced particulate matter emission by biomass carbonization. **BioEnergy Research**, v. 16, p. 1629-1638, 2023.

DEMIRBAŞ, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357-1378, 2001.

DIAS JÚNIOR, A. F. Carvão vegetal para a cocção de alimentos: aspectos mercadológicos e de qualidade para o consumo. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, p. 103, 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F., ANDRADE, C. R., MILAN, M., BRITO, J. O., ANDRADE, A. M. D., SOUZA, N. D. D. Quality function deployment (QFD) reveals appropriate quality of charcoal used in barbecues. **Scientia Agricola**, v. 77 (2020), Article e20190021,

DIAS JÚNIOR, A. F., BRITO, J. O., ANDRADE, C. R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. **Revista Árvore**, v. 39, p. 1127-1133, 2015.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional – **Relatório síntese 2021**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 27 de abril de 2023.

FREDERICO, P. G. U. Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GOLDSCHMID, O. **Ultraviolet spectra**, in: Lignins Occur. Form. Struct. React, Wiley Interscience. New York, p. 241–266, 1971.

GONZÁLEZ, J. F., ENCINAR, J. M., CANITO, J. L., SABIO, E., CHACÓN, M. Pyrolysis of cherry stones: energy uses of the different fractions and kinetic study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 67, n. 1, p. 165-190, 2003.

GOUVÊA, A. F. G., TRUGILHO, P. F., ASSIS, C. O., ASSIS, M. R., COLODETTE, J. L., GOMES, C. M. Evaluation of syringyl/guaiacyl ratio of eucalypt lignin in the charcoal production. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 71-78, 2015.

GREENBERG, J. P., FRIEDLI, H., GUENTHER, A. B., HANSON, D., HARLEY, P., KARL, T. Volatile organic emissions from the distillation and pyrolysis of vegetation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 1, p. 81-91, 2006.

GUO, X. J., WANG, S. R., WANG, K. G., QIAN, L. I. U., LUO, Z. Y. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.

HYTÖNEN, J., NURMI, J. Heating value and ash content of intensively managed stands. **Wood Research**, v. 60, n. 1, p. 71-82, 2015.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual IBÁ 2021**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2022.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual IBÁ 2022**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>. Acesso em: 27 de abril de 2023.

KLASNJA, B., KOPITOVIC, S., ORLOVIC, S. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 6, p. 427-432, 2002.

KUMAR, R., CHANDRASHEKAR, N. Study on fuelwood and carbonization characteristics of *Prosopis juliflora*. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 13, p. 101-107, 2016.

LIMA, M. D. R., BUFALINO, L., SCATOLINO, M. V., HEIN, P. R. G., CARNEIRO, A. D. C. O., TRUGILHO, P. F., PROTÁSIO, T.P. Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. **Renewable Energy**, v. 211, p. 772-788, 2023.

LIMA, M. D. R., MASSUQUE, J., BUFALINO, L., TRUGILHO, P. F., RAMALHO, F. M. G., PROTÁSIO, T. P., HEIN, P. R. G. Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 166, p. 105636, 2022.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, 2020a.

LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020b.

LIU, Q., WANG, S., WANG, K., LUO, Z., CEN, K. Pyrolysis of wood species based on the compositional analysis. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 26, p. 548-553, 2009.

LOUREIRO, B. A., ASSIS, M. R. D., MELO, I. C. N. A. D., OLIVEIRA, A. F. F. D., TRUGILHO, P. F. Carbonization gravimetric yield and qualitative characterization of charcoal from hybrid *Corymbia* spp clones for industrial use. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 214-232, 2021.

- MASSUQUE, J., ASSIS, M. R., LOUREIRO, B. A., MATAVEL, C. E., TRUGILHO, P. F. Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, p. 527-535, 2021.
- MELZER, M., BLIN, J., BENSACKHRIA, A., VALETTE, J., BROUST, F. Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 104, p. 448-460, 2013.
- MENUCELLI, J. R., AMORIM, E. P., FREITAS, M. L. M., ZANATA, M., CAMBUIM, J., DE MORAES, M. L. T., YAMAJI, F. M. JÚNIOR, F. G. S. LONGUI, E. L. Potential of Hevea brasiliensis clones, Eucalyptus pellita and Eucalyptus tereticornis wood as raw materials for bioenergy based on higher heating value. **Bioenergy Research**, v. 12, p. 992-999, 2019.
- MORIANA, R., VILAPLANA, F., EK, M. Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties. **Cellulose**, v. 22, p. 3409-3423, 2015.
- MOULIN, J. C.; NOBRE, J. R. C.; CASTRO, J. P.; TRUGILHO, P. F.; ARANTES, M. D. C. Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in Amazon Rainforest. **Cerne**, v. 23, p. 209–218, 2017.
- MOUTINHO, V. H. P., TOMAZELLO FILHO, M., BRITO, J. O., BALLARIN, A. W., ANDRADE, F. W. C. Influence of the wood physical properties on the charcoal physical and mechanical properties. **Scientia Forestalis**, n. 111, p. 557-561, 2016.
- MUSULE, R., ACUÑA, E., ROMERO-HERMOSO OSORIO, L. S., DOMÍNGUEZ, Z., BÁRCENAS-PAZOS, G. M., PINEDA-LÓPEZ, M. R., TEIXEIRA, R., M., GONZÁLEZ, M. E., SÁNCHEZ-VELÁSQUEZ, L. R. Growing up at different altitudes: changes in energy content of the Abies religiosa wood. **BioEnergy Research**, v. 11, p. 209-218, 2018.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, set/2010.
- PARÁ. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Instrução Normativa 05, de 10 de setembro de 2015. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável – PMFS nas florestas. **Diário Oficial do Estado**, Brasil, 2015.
- PENG, F. U., SONG, H. U., XIANG, J., LUSHI, S. U. N., TAO, Y., ZHANG, A., ZHANG, J. Mechanism study of rice straw pyrolysis by Fourier transform infrared technique. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 17, n. 3, p. 522-529, 2009.

- PEREIRA, A. A., LIMA, M. D. R., PATRÍCIO, E. P. S., NUMAZAWA, S., GOULART, S. L., PROTÁSIO, T. P. Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, v. 48, p. 127, 2020.
- PEREIRA, B. L. C., CARNEIRO, A. D. C. O., CARVALHO, A. M. M. L., COLODETTE, J. L., OLIVEIRA, A. C., FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.
- PEREIRA, B. L. C., OLIVEIRA, A. C., CARVALHO, A. M. M. L., CARNEIRO, A. D. C. O., SANTOS, L. C., VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, 2012.
- PROTÁSIO, T. D. P., TRUGILHO, P. F., NAPOLI, A., SILVA, M. G. D., COUTO, A. M. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 189-196, 2014.
- PROTÁSIO, T. P., DA COSTA, J. S., SCATOLINO, M. V., LIMA, M. D. R., ASSIS, M. R., DA SILVA, M. G., TRUGILHO, P. F. 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, n. 5, p. 4491-4508, 2022.
- PROTÁSIO, T. P., LIMA, M. D. R., TEIXEIRA, R. A. C., ROSÁRIO, F. S., ARAÚJO, A. C. C., ASSIS, M. R., HEIN, P. R. G., TRUGILHO, P. F. Influence of extractives content and lignin quality of Eucalyptus wood in the mass balance of pyrolysis process. **Bioenergy Research**, v. 14, n. 1, p. 175-189, 2021.
- PROTÁSIO, T. P., SCATOLINO, M. V., DE ARAÚJO, A. C. C., DE OLIVEIRA, A. F. C. F., FIGUEIREDO, I. C. R., DE ASSIS, M. R., TRUGILHO, P. F. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior Eucalyptus firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626-641, 2019.
- PROTÁSIO, T. P., SCATOLINO, M. V., LIMA, M. D. R., DE ARAÚJO, A. C. C., FIGUEIREDO, I. C. R., BUFALINO, L., HEIN, P. R. G., TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of Eucalyptus clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105835, 2020.
- QI, Y., JANG, J. H., HIDAYAT, W., LEE, A. H., LEE, S. H., CHAE, H. M., KIM, N. H. Carbonization of reaction wood from *Paulownia tomentosa* and *Pinus densiflora* branch woods. **Wood Science and Technology**, v. 50, p. 973-987, 2016.

- QUIRINO, W. F. VALE, A. D., ANDRADE, A. D., ABREU, V. L. S., AZEVEDO, A. D. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista Madeira**, Curitiba, n. 89, p. 100-106, 2005.
- Core Team R: uma linguagem e ambiente para computação estatística. Fundação R para Computação Estatística, Viena, 2019.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus sp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- ROUSSET, P., FIGUEIREDO, C., SOUZA, M., QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. *Fuel processing technology*, v. 92, n. 10, p. 1890-1897, 2011.
- ROY, C., PAKDEL, H., BROUILLARD, D. The role of extractives during vacuum pyrolysis of wood. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 41, n. 1-2, p. 337-348, 1990.
- SHEN, D. K., GU, S., BRIDGWATER, A. V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicellulose. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 1, p. 39-45, 2010.
- SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 28, n. 5, p. 499-507, 2005.
- 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, L. F. F., DE CASTRO, A. R. S., OLIVEIRA, R. S., DA SILVA, S. S., PAMPLONA, V. M. S., DE SOUZA BARROS, D., NOBRE, J. R. C. NUMAZAWA, S. Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, 2020.
- SILVA, M. F.; FORTES, M. F.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from Eucalyptus clones. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 3, p. e20160350, 2018.
- SILVA, R. C., MARCHESAN, R., FONSECA, M. R., DIAS, A. C. C., VIANA, L. C. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.
- SIMETTI, R., BONDUELLE, G. M., SILVA, D. A. Wood quality of five Eucalyptus species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 30, n. 2, p. 175-181, 2018.
- SINDIFER, Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico**, p. 52, 2021. Disponível em: < <http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>>. Acesso em: 27 de abril de 2023.

- SOUZA, J. F. T., PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105517, 2021.
- SYRODOY, S. V., KUZNETSOV, G. V., GUTAREVA, N. Y., BUGAEVA, K. A., TABURCHINOV, R. I. The conditions and characteristics of wood particles ignition in the stream of the high temperature gases. **Combustion Science and Technology**, v. 190, n. 4, p. 663-686, 2018.
- TELMO, C., LOUSADA, J. he explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1663-1667, 2011.
- TIHAY, V., GILLARD, P. Pyrolysis gases released during the thermal decomposition of three Mediterranean species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 88, n. 2, p. 168-174, 2010.
- TRUGILHO, P. F. SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001.
- YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12/13, p. 1781-1788, Jan. 2007.
- ZHAO, X., HU, Q., WANG, X., DING, X., HE, Q., ZHANG, Z., SHEN, R., LU, S., LIU, T., FU, X., CHEN, L. Composition profiles of organic aerosols from Chinese residential cooking: case study in urban Guangzhou, south China. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 72, p. 1-18, 2015.