



GENILSON MAIA CORRÊA

**EFEITO DOS EXTRATIVOS NOS PROCESSOS DE
COMBUSTÃO E PIRÓLISE DE RESÍDUOS LENHOSOS DA
AMAZÔNIA**

**LAVRAS – MG
2025**

GENILSON MAIA CORRÊA

**EFEITO DOS EXTRATIVOS NOS PROCESSOS DE COMBUSTÃO E PIRÓLISE DE
RESÍDUOS LENHOSOS DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio - UFLA
Orientador

Prof. Dr. Edgar Amaral Silveira - UnB
Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho - UFLA
Coorientadores

**LAVRAS – MG
2025**

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

Corrêa, Genilson Maia.

Efeito dos extrativos nos processos de combustão e pirólise de resíduos lenhosos da
Amazônia / Genilson Maia Corrêa. - 2025.

76 p.

Orientador: Thiago de Paula Protásio

Coorientador: Edgar Amaral Silveira

Coorientador: Paulo Fernando Trugilho

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Composição química. 2. Poder calorífico. 3. Biomassa. 4. Carvão vegetal. I.
Protásio, Thiago de Paula. II. Silveira, Edgar Amaral. III. Trugilho, Paulo Fernando.
IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

GENILSON MAIA CORRÊA

**EFEITO DOS EXTRATIVOS NOS PROCESSOS DE COMBUSTÃO E PIRÓLISE DE
RESÍDUOS LENHOSOS DA AMAZÔNIA**

**EFFECT OF EXTRACTIVES ON THE COMBUSTION AND PYROLYSIS
PROCESSES OF WOODY RESIDUES FROM THE AMAZONIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de fevereiro de 2025

Dr. Thiago de Paula Protásio - UFLA

Dr. Edgar Amaral Silveira - UnB

Dr. Ananias Francisco Dias Junior - UFES

Dr. Tiago José Pires de Oliveira - UFLA

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio - UFLA
Orientador

Prof. Dr. Edgar Amaral Silveira - UnB
Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho - UFLA
Coorientadores

**LAVRAS – MG
2025**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me proporcionou essa oportunidade e me deu forças para chegar à conclusão de mais uma etapa de minha formação profissional. A mim, que apesar das dificuldades e desafios sempre fui em busca de crescer profissionalmente e por nunca desistir de meus objetivos.

Aos meus pais Benedito e Osmarina, que sempre me apoiaram e que me fizeram ser a pessoa e profissional que sou hoje, a eles minha profunda e sincera gratidão. Às minhas irmãs, que mesmo de longe sempre me apoiaram e que me deram forças e bons conselhos (apesar da distância) para que eu pudesse permanecer firme na pós-graduação.

Aos amigos que fiz durante esse período, que foram e são essenciais em muitos aspectos, principalmente no apoio mútuo durante o período de cumprimento das disciplinas, no apoio aos experimentos de laboratório, e suporte durante os períodos mais difíceis durante essa jornada.

Ao meu orientador Thiago Protásio, por todo apoio para o desenvolvimento da pesquisa, orientação e ensinamentos para que o trabalho pudesse ser bem desenvolvido, assim como para a parte experimental da pesquisa.

Agradeço, também, ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa (LAMBEB/DCF), coordenado pelo Prof. Paulo Trugilho, por todo apoio durante a etapa de experimentos, e por proporcionar todas as análises necessárias para que esse trabalho pudesse ser construído com qualidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo nº 406053/2022-7) pelo financiamento do projeto “Geração de bionergia a partir de resíduos do manejo florestal sustentável: descentralização da matriz energética e impactos socioambientais na Amazônia”.

Ao Grupo Keila pela doação das madeiras utilizadas.

E à Universidade Federal de Lavras, e aos professores, que foram essenciais para minha formação, e que contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

“Porque dele, por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém!” Romanos 11: 36

RESUMO

Utilizar biomassas residuais provenientes de manejo florestal, além de ser fonte de energia renovável, é adequado diante das necessidades atuais de reaproveitamento dos recursos naturais. Diversos fatores podem influenciar a utilização desses resíduos, dentre eles os extrativos, que podem aumentar o poder calorífico da madeira, influenciar a densidade, permeabilidade e rendimentos do processo de pirólise. Entretanto, os estudos sobre os efeitos dos extrativos na pirólise e combustão não são amplamente conduzidos em resíduos lenhosos de espécies nativas da Amazônia. Dessa forma, objetiva-se avaliar a influência dos extrativos nas características da madeira e no comportamento dos resíduos lenhosos durante os processos de combustão e pirólise. Selecionou-se a biomassa lenhosa de cinco espécies oriundas dos resíduos do manejo florestal na Amazônia: *Dinizia excelsa*, *Protium cf altissimum*, *Parkia pendula*, *Inga* spp. e *Manilkara* spp. Os teores de holocelulose, celulose, hemiceluloses e lignina dos resíduos lenhosos foram mensurados. Os teores de extrativos totais, extrativos solúveis em acetona, água quente e água fria foram determinados. Foram realizadas as análises de poder calorífico superior e composição química imediata, tanto do material *in natura* como no material sem extrativos pelos diferentes métodos de remoção. A análise termogravimétrica foi realizada em atmosfera oxidativa e inerte, e determinados os índices de combustão e de pirólise do material *in natura* e livre de extrativos. A espécie que obteve o maior teor de holocelulose foi *Manilkara* spp. (75,10% base massa seca - bs), enquanto o menor foi *Dinizia excelsa* (58,07% bs). Para lignina total, os valores variaram de 27,61% bs (*Inga* spp.) a 23,94% bs (*Dinizia excelsa*). Para celulose, os valores variaram de 36,68% bs (*P. altissimum*) a 47,86% bs (*Manilkara* spp.) a. O menor teor de cinzas foi encontrado nos resíduos lenhosos de *Inga* spp. (0,52% bs). Para os extrativos, os maiores valores foram encontrados em *Manilkara* spp. (5,91% bs) para água fria e *D. excelsa* (9,95% e 6,61% bs) para água quente e acetona. A espécie *D. excelsa* se destacou devido à presença de elevada proporção de extrativos totais no lenho (16,38% bs). Na composição química imediata, os teores de material volátil variaram de 79,35% (*P. altissimum*) a 85,54% (*Inga* spp.) para o material *in natura*. As cinzas variaram de 0,29% (*D. excelsa*) a 1,31% (*Inga* spp.), enquanto o carbono fixo variou de 13,76% (*Inga* spp.) a 19,84% (*D. excelsa*), sendo influenciados pela remoção de extrativos. Não houve diferença significativa entre o poder calorífico superior (PCS) do material *in natura* e do material livre de extrativos, sendo o maior valor para *D. excelsa* (20,49 MJ/kg). Nas curvas DTG, houve diferenças, principalmente na temperatura máxima de decomposição, deslocando a curva para temperaturas ligeiramente mais altas após a remoção dos extrativos. Para *D. excelsa* e *P. altissimum*, os extrativos reduziram a estabilidade térmica. Para *P. pendula* e *Manilkara* spp., os extrativos tiveram pouco efeito na degradação térmica. Para *Inga* spp., retardaram levemente a degradação, sem grande impacto na pirólise. Os resultados indicam que a remoção prévia dos extrativos dos resíduos lenhosos é viável, sem causar impactos negativos significativos nos processos de combustão e pirólise.

PALAVRAS-CHAVE: composição química; poder calorífico; biomassa; carvão vegetal.

ABSTRACT

The use of residual biomass from forest management, in addition to being a source of renewable energy, is appropriate given the current need to reuse natural resources. Several factors can influence the utilization of these residues, including extractives, which can increase the calorific value of the wood and affect its density, permeability, and the yields of the pyrolysis process. However, studies on the effects of extractives during pyrolysis and combustion are not widely conducted on woody residues from native Amazon species. Therefore, the aim of this study is to evaluate the influence of extractives on wood characteristics and behavior during combustion and pyrolysis processes of woody residues. Woody biomass from five species derived from forest management residues in the Amazon were selected: *Dinizia excelsa*, *Protium cf. altissimum*, *Parkia pendula*, *Inga* spp., and *Manilkara* spp. The contents of holocellulose, cellulose, hemicellulose, and lignin in the woody residues were measured. The contents of total extractives, and extractives soluble in acetone, hot water, and cold water were also determined. Analyses of higher heating value and proximate chemical composition were conducted on both the raw material and the extractive-free material, using different removal methods. Thermogravimetric analysis was performed under oxidative and inert atmospheres, and combustion and pyrolysis indices were determined for both the raw and extractive-free materials. The species with the highest holocellulose content was *Manilkara* spp. (75.10% dry basis), while the lowest was *Dinizia excelsa* (58.07% db). For total lignin, values ranged from 27.61% db (*Inga* spp.) to 23.94% db (*Dinizia excelsa*). Cellulose content ranged from 47.86% db (*Manilkara* spp.) to 36.68% db (*P. altissimum*). The lowest ash content was found in *Inga* spp. woody residues (0.52% db). Regarding extractives, the highest values were found in *Manilkara* spp. (5.91%) for cold water, and in *D. excelsa* (9.95% and 6.61%) for hot water and acetone, respectively. *D. excelsa* stood out due to its high total extractives content in the wood (16.38% db). In the proximate composition analysis, volatile matter content ranged from 79.35% (*P. altissimum*) to 85.54% (*Inga* spp.) in the raw material. Ash content ranged from 0.29% (*D. excelsa*) to 1.31% (*Inga* spp.), while fixed carbon ranged from 13.76% (*Inga* spp.) to 19.84% (*D. excelsa*), being influenced by the removal of extractives. There was no significant difference in the higher heating value (HHV) between the raw and extractive-free materials, with the highest value observed for *D. excelsa* (20.49 MJ/kg). In the DTG curves, differences were observed mainly in the maximum decomposition temperature, with the curve shifting to slightly higher temperatures after extractive removal. For *D. excelsa* and *P. altissimum*, extractives reduced thermal stability. For *P. pendula* and *Manilkara* spp., extractives had little effect on thermal degradation. In *Inga* spp., they slightly delayed degradation, with little impact on pyrolysis. The results indicate that prior removal of extractives from woody residues is feasible, without causing significant negative impacts on combustion and pyrolysis processes.

KEYWORDS: chemical composition; calorific value; biomass; charcoal.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa fornece subsídios para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis no setor bioenergético, contribuindo para a valorização das espécies amazônicas e dos resíduos gerados durante a exploração de impacto reduzido de planos de manejo florestal. O estudo auxiliará na utilização de biomassa lenhosa proveniente de resíduos do manejo florestal sustentável na Amazônia, iniciando assim, uma nova abordagem quanto a caracterização do material, e novos resultados quanto ao seu comportamento nos processos termoquímicos de conversão (combustão e pirólise). A pesquisa está inserida dentro do projeto financiado pelo CNPq que estuda a geração de bioenergia a partir dos resíduos do manejo florestal sustentável na Amazônia (Processo nº 406053/2022-7). Os resultados poderão ser importantes para a definição de usos múltiplos dos resíduos lenhosos, sem comprometer significativamente o comportamento da madeira durante os processos de conversão em energia e produtos energéticos. Destaca-se que os resultados estão relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS 7 e 13, que tratam da energia e das mudanças climáticas. O ODS 7 está relacionado a geração de energia limpa, em que um dos pontos é aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética global. Por outro lado, o ODS 13 está associado às ações contra a mudança global do clima, em que um dos seus pontos é reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Finalmente, menciona-se que os objetivos que a presente pesquisa busca alcançar são: i) utilizar fontes renováveis de energia e, ii) reduzir a emissão de gases de efeito estufa a partir da valorização energética de resíduos lenhosos disponíveis na Amazônia brasileira.

IMPACT INDICATORS

The research provides support for the development of sustainable strategies in the bioenergy sector, contributing to the valorization of Amazonian species and the residues generated during low-impact forest management plans. The study will aid in the utilization of woody biomass from sustainable forest management residues in the Amazon, thus initiating a new approach to material characterization and generating new results regarding its behavior in thermochemical conversion processes (combustion and pyrolysis). This research is part of a project funded by CNPq that investigates bioenergy generation from sustainable forest management residues in the Amazon. The results may be important for defining multiple uses of woody residues without significantly compromising the wood's behavior during energy conversion processes. It is noteworthy that the results align with the Sustainable Development Goals (SDGs) 7 and 13, which address energy and climate change. SDG 7 relates to clean energy generation, with one of its goals being to increase the share of renewable energy in the global energy matrix. On the other hand, SDG 13 is associated with actions against global climate change, including the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions. Finally, the objectives of this research are: (i) to utilize renewable energy sources and (ii) to reduce greenhouse gas emissions by enhancing the energy potential of woody residues available in the Brazilian Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	29
Figura 2 – Valores estimados de energia e valores de massa de extrativos totais em tonelada/hectare em relação a madeira em tora destinada à serraria e resíduos lenhosos gerados durante a exploração de impacto reduzido(a), diagrama de Sankey com o balanço energético da combustão após a remoção dos extrativos (c, d, e).	44
Figura 3 – Relação entre o teor de extrativos totais e a energia remanescente da biomassa após a remoção dos extrativos.	45
Figura 4 – Termogravimetria em atmosfera de ar sintético de todas as espécies avaliadas, tanto do material in natura como livre de extrativos.	46
Figura 5 - Derivada das curvas termogravimétricas de todas as espécies estudadas, tanto do material in natura como do material livre de extrativos.	47
Figura 6 – Termogravimetria em atmosfera de nitrogênio de todas as espécies avaliadas, tanto do material in natura como livre de extrativos.	56
Figura 7 - Derivada das curvas termogravimétricas de todas as espécies estudadas, do material in natura e do material livre de extrativos.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos sobre determinação do teor de extrativos em madeiras utilizando diferentes métodos e aplicações.	14
Tabela 2 – Trabalhos sobre caracterização de madeiras provenientes de resíduos.	19
Tabela 3 – Normas utilizadas para cada método de extração, solvente utilizado e compostos removidos da madeira.	28
Tabela 4 – Composição química estrutural dos resíduos lenhosos de espécies amazônicas em base massa seca total (bs).	34
Tabela 5 – Composição química estrutural dos resíduos lenhosos de espécies amazônicas em base massa seca livre de extrativos (bsle).	34
Tabela 6 – Valores médios do teor de extrativos em água fria, água quente e acetona para os resíduos lenhosos de espécies amazônicas.	35
Tabela 7 – Composição química imediata da biomassa in natura, livre de extrativos totais, livre de extrativos removidos em água quente, água fria e acetona.	37
Tabela 8 – Valores médios de poder calorífico superior (PCS) dos resíduos lenhosos de espécies amazônicas.	40
Tabela 9 – Perda de massa e temperatura dos picos obtidas por TGA, nos estágios da combustão para o material in natura e livre de extrativos para biomassa lenhosa de resíduos amazônicos.	51
Tabela 10 – Parâmetros da combustão da biomassa lenhosa de espécies amazônicas para o material in natura e livre de extrativos.	53
Tabela 11 – Perda de massa por faixas de temperatura para o material in natura e livre de extrativos para biomassa lenhosa de resíduos amazônicos.	59

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1.	Objetivo Geral.....	15
2.2.	Objetivos específicos	15
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1.	Potencial energético dos resíduos do manejo florestal.....	15
3.2.	Legislação Brasileira.....	17
3.3.	Valorização energética dos resíduos do manejo florestal.....	19
3.4.	Qualidade da biomassa lenhosa para fins energéticos.....	22
3.5.	Efeito dos extrativos no processo de pirólise	23
3.6.	Efeito dos extrativos no processo de combustão.....	25
3.7.	Normas para quantificação de extrativos	26
4.	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1.	Coleta e preparo do material	28
4.1.1.	Determinação do teor de extrativos.....	29
4.1.2.	Composição química imediata	30
4.1.3.	Determinação dos teores holocelulose, celulose, hemiceluloses e lignina	30
4.2.	Análise termogravimétrica em atmosferas inerte e oxidativa.....	31
4.3.	Poder calorífico superior e estimativas energéticas	33
4.4.	Análise estatística	33
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1.	Composição química estrutural.....	33
5.2.	Composição química imediata	36
5.3.	Poder calorífico superior (PCS).....	39
5.4.	Análises termogravimétricas (TG/DTG)	46
5.4.1.	Combustão (atmosfera oxidativa).....	46
5.4.2.	Pirólise (atmosfera inerte).....	55
6.	Conclusão.....	62
	REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos do manejo florestal são uma atraente fonte de matéria prima para a produção de bioenergia e podem ser utilizados em forma de cavacos, pellets e briquetes, além da conversão em energia térmica e produção de carvão vegetal. Essas são alternativas de utilização energética dos resíduos lenhosos que podem adicionar renda ao manejo florestal, tendo em vista que esses biocombustíveis possuem potencial para produção de produtos com alto valor agregado (Thiffault *et al.*, 2015; Dulys-Nusbaum *et al.*, 2019).

O uso energético de biomassas residuais provenientes de manejo florestal, além de fonte de energia renovável, se qualifica nas necessidades atuais de aproveitamento dos recursos naturais com o mínimo desperdício. Os resíduos da exploração madeireira do manejo florestal, são altamente heterogêneos quanto às suas propriedades tecnológicas e dimensões, o que implica em baixa densidade energética e eficiência de conversão (Nunes; Matias; Catalão, 2017).

Nos planos de manejo florestal realizados na Amazônia Brasileira quantidades significativas de resíduos florestais são geradas, em especial os resíduos madeireiros da etapa de exploração de impacto reduzido. É estimado que para cada 1 tonelada de madeira extraída na forma de tora, sejam geradas 2,13 toneladas de resíduos que podem ser sapopemas, restos de troncos e galhos deixados no interior da floresta (Numazawa *et al.*, 2017). Partindo disso, os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável são uma fonte promissora de bioenergia na região Norte do Brasil, especialmente para a produção de energia elétrica em comunidades remotas na Amazônia e suprimento de carvão vegetal com finalidades industrial e doméstica. O aproveitamento dos resíduos produzidos nos planos de manejo para a produção de energia é previsto no Artigo 2, Inciso XIV, da Instrução normativa nº 5 de 11 de dezembro de 2006 (Brasil, 2006). Assim a utilização energética desses resíduos contribui para o gerenciamento de resíduos e reduz a poluição ambiental, alinhando-se às práticas sustentáveis do manejo florestal (Mesquita *et al.*, 2024).

No entanto, esses resíduos provenientes do manejo florestal sustentável na Amazônia apresentam alta heterogeneidade (Lima *et al.*, 2020), baixa densidade energética, alta umidade e variabilidade diamétrica, fatores que dificultam o seu uso como fonte de energia, principalmente para a geração direta de calor (combustão) e produção de carvão vegetal. Estudar a pirólise e a combustão de biomassas lignocelulósicas é essencial para entender os processos de conversão, e otimizar a produção de energia, melhorar o rendimento em carvão

vegetal, que é influenciado tanto pelas características do material, como do processo operacional (Ismail e Ramzy, 2021).

A pirólise da biomassa abrange um conjunto de reações termoquímicas complexas, incluindo despolimerização, abertura de anel, quebra de grupo lateral, isomeração, recombinação e condensação, entre outras. Além disso, é amplamente reconhecido que os rendimentos, composições e características dos produtos resultantes variam dependendo dos parâmetros operacionais e da composição da biomassa (Basu e Kaushal, 2024). É vista como o processo precursor de todas as tecnologias de conversão termoquímica, uma vez que engloba todas as reações químicas para formar sólidos (carvão vegetal ou biochar), líquidos (líquido pirolenhoso ou bio-óleo) e gases (CO_2 , CO , CH_4 , H_2) (Rodinova *et al.*, 2022). Já a combustão é um processo termoquímico que normalmente é utilizado para converter energia química em calor. É uma reação exotérmica entre o combustível e comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor e formar como produto substâncias residuais da reação dos reagentes, como NO_x , CO_2 , CO , CH_4 e cinzas (Ong *et al.*, 2019).

Diversos fatores podem auxiliar a utilização da madeira como combustível, dentre eles estão os extrativos, que são uma classe de compostos que dão propriedades particulares aos componentes das árvores, não somente à madeira, como, também, folhas e cascas. Estes compostos conferem resistência ao ataque de agentes deterioradores, diminuição da permeabilidade e da higroscopicidade (Pedrazzi *et al.*, 2019). Além disso, podem aumentar o poder calorífico da madeira e do carvão, contribuir com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Lima *et al.*, 2020) e influenciar na densidade, permeabilidade e valor energético (Bufalino *et al.*, 2012). A presença, ou ausência dos extrativos na biomassa, afeta de maneira diferente suas propriedades, quando presente catalisa a formação de compostos ácidos, e quando ausente favorece a formação de CO_2 e água no processo de pirólise (Guo *et al.*, 2010).

Entretanto, estudos sobre a influência dos extrativos na pirólise e combustão não são amplamente conduzidos em espécies nativas da Amazônia, que é rica em biomassa lenhosa, uma vez que essas espécies possuem alta variação no teor de extrativos totais de 1,8% a 17,9% bs (Lima *et al.*, 2020). Essa ausência de investigações (Tabela 1), destaca a importância de se realizar pesquisas a esse respeito, fazendo com que se torne mais eficiente o aproveitamento energético dos resíduos gerados na Amazônia, ampliando as possibilidades de valorização do material residual para múltiplos usos. A questão científica que norteia o trabalho é: i) como diferentes teores de extrativos influenciam na eficiência energética dos processos de pirólise e combustão da madeira? A presença de extrativos se correlaciona com várias propriedades energéticas, incluindo conteúdo de carbono fixo, estudos mostram que o conteúdo de extrativos

totais está ligado ao rendimento gravimétrico e ao poder calorífico do carvão, e extrativos específicos, como os solúveis em água quente, contribuem para o maior valor de aquecimento (Zanuncio *et al.*, 2014; Moulin *et al.*, 2017). Dessa forma, se torna necessário compreender essas influências, tendo em vista a melhoria do processo de pirólise ou, até mesmo, como forma de valorizar os extrativos em produto de maior valor agregado no contexto de biorrefinarias lignocelulósicas.

Tabela 1 – Trabalhos sobre determinação do teor de extrativos em madeiras utilizando diferentes métodos e aplicações.

Título do artigo	Tipo de análise dos extrativos/resultados	Referência
Rapid estimation of wood density and total extractives of two important <i>Dalbergia</i> species using near-infrared (NIR) spectroscopy and multivariate analysis	Os teores de extrativos foram determinados usando métodos químicos convencionais. A partir disso, foram desenvolvidos modelos preditivos para estimar o conteúdo de extrativos em <i>Dalbergia latifolia</i> e <i>D. sissoo</i> usando espectroscopia de infravermelho próximo e análise multivariada.	Mani; Shukla, 2024
Extractives of tree biomass of Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.) for biorrefining in four climatic regions in Finland – lipophilic compounds, stilbenes, and lignans	Os extrativos totais da madeira de pinheiro silvestre foram determinados usando extração acelerada por solvente (ASE), seguida por cromatografia gasosa (GC) para quantificação de grupos extrativos e compostos individuais, revelando variações no conteúdo em diferentes componentes de biomassa.	Verksalo <i>et al.</i> , 2022
Variation analyses of extractive contents by NIR-spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry wlnut (<i>Julgans regia x nigra</i>) trees	Foram realizadas extrações em etanol e água nas amostras de madeira provenientes de agrossilvicultura e nogueiras florestais para determinação do conteúdo de extrativos. A espectroscopia NIR e a imagem hiperespectral analisaram as amostras revelando diferenças químicas significativas na composição dos extrativos entre os dois sistemas florestais.	Heim <i>et al.</i> , 2022
Multidimensional exploration of wood extractives: a review of compositional analysis, decay resistance, light stability, and staining applications	Discute a extração dos extrativos de madeiras utilizando solventes de polaridade variadas, como etanol, metanol, acetona, hexano e clorofórmio, que podem ser aplicados para analisar o conteúdo extrativo em diferentes tipos de madeira. Após a extração, a composição dos extrativos foi analisada, buscando entender os tipos e quantidades de compostos presentes na madeira.	Gao; Cui; Matsumura, 2024
Wood extractives: main families, functional properties,	A análise enfatiza os extrativos encontrados nos resíduos de madeira, destacando suas propriedades e as aplicações, o foco nos resíduos de madeira	N'Guessan <i>et al.</i> , 2023

Fields of application and interest of wood waste	sugere um potencial utilização do que geralmente é considerado um subproduto.	
Optimization of polyphenol extraction with potential application as natural food preservatives from Brazilian amazonian species <i>Dalbergia monetaria</i> and <i>Croton cajucara</i>	O conteúdo de extrativos das espécies, foi determinado por meio de análise gravimétrica após extração com etanol, otimizando as condições usando a metodologia de superfície de resposta para avaliar a quantidade de biomassa e a concentração de etanol para uma extração efetiva de polifenóis.	Araújo <i>et al.</i> , 2023
Impacto f thermal treatment on properties of assacú (<i>Hura creptans</i> L.) and murici (<i>Byrsonima crista</i> A. Juss.) Amazon woods	Após o tratamento térmico a 220°C, o conteúdo de extrativos das madeiras de assacú e murici aumentou 4,99% e 7,49%, respectivamente. Isso indica mudanças significativas nas propriedades químicas dessas madeiras amazônicas devido ao tratamento térmico.	Leite <i>et al.</i> , 2024

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência dos diferentes tipos de extrativos nas características da madeira e no comportamento de resíduos oriundos do manejo florestal da Amazônia durante os processos de combustão e pirólise.

2.2. Objetivos específicos

- Quantificar os extrativos presentes nos resíduos lenhosos de diferentes espécies amazônicas.
- Caracterizar a influência dos extrativos nas propriedades do material.
- Analisar a influência dos extrativos no processo de combustão por meio de análises termogravimétricas e índices de combustibilidade e ignição.
- Estudar a influência dos extrativos no processo de pirólise a partir de ensaios termogravimétricos em atmosfera inerte.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Potencial energético dos resíduos do manejo florestal

O manejo florestal sustentável na Amazônia envolve equilíbrio entre viabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e justiça social. Inclui concessões florestais, extração de madeira a partir da exploração de impacto reduzido, possuindo colaboração entre governo,

comunidades e gestores de recursos para promover o uso responsável dos recursos (Morais *et al.*, 2019).

Como a maior parte da floresta permanece intacta, a aplicação do manejo florestal sustentável não só impediria a mudança global no uso da terra e remoção ilegal dos recursos naturais, mas, também, preservaria o estoque de carbono terrestre (Putz *et al.*, 2008).

Os resíduos florestais, que são subprodutos das principais atividades industriais, destacam-se como potenciais matérias-primas para a produção de combustíveis renováveis, produtos químicos e energia. Utilizar esses resíduos é altamente vantajoso, pois sua disponibilidade não é prejudicada pela necessidade de terras, além disso, aproveitamento dos resíduos evita o seu acúmulo (Ferreira-Leitão *et al.*, 2010).

Estudos demonstram que o manejo florestal, conforme estipulado pelo Código Florestal Brasileiro, gera uma quantidade significativa de resíduos oriundos da exploração madeireira que muitas vezes são deixados na área de corte (Sist; Ferreira, 2007; Sasaki *et al.*, 2016; West, Vidal; Putz, 2014). Uso legal e com potencial para os resíduos oriundos do manejo florestal, no âmbito do Código Florestal Brasileiro, é a produção de carvão vegetal, que traz benefícios como coproduto florestal (Lima *et al.*, 2023). Utilizar os resíduos para a produção de carvão vegetal ajuda a mitigar o desmatamento e aumentar a restauração florestal e de terras (Numazawa *et al.*, 2020).

Os resíduos são por natureza heterogêneos em tamanho, composição e estrutura. De acordo com o Inventário Florestal Nacional, pequenos pedaços de madeira, incluindo cascas de árvores, são os principais resíduos obtidos na indústria florestal, correspondendo a 71% do total de resíduos (Citação). A serragem vem em segundo lugar, com 22% (Brito, 1995). Além disso, ocorrem grandes perdas de madeira durante o processamento da madeira no setor moveleiro, em alguns casos, até 80% de uma árvore é perdida entre o corte da árvore na floresta e a fabricação dos móveis (Ferreira-Leitão *et al.*, 2010).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a região Amazônica representa 83,4% da produção de madeira em tora (IBGE, 2022). Os resíduos dessa produção tornam-se resíduos de biomassa e são estimados em 58 – 62% do volume de madeira em tora (Veríssimo, 2002). No Brasil, a cada ano, cerca de 16 milhões de toneladas (matéria seca) de resíduos são gerados pelas indústrias florestais (Ferreira-Leitão, 2010). Na Amazônia, 25% dos resíduos gerados pela indústria florestal não são valorizados (SFB; Imazon, 2010) e os que são muitas vezes trazem poucos benefícios.

O potencial energético dos resíduos do manejo florestal no Brasil é significativo com cerca de 16 milhões de toneladas de biomassa, segundo a Empresa de Pesquisa Energética

(EPE, 2018). Destacam-se, com vários estudos relacionados a adequação de diferentes tipos de biomassa para a produção de energia, a partir de processos termoquímicos como pirólise e bioquímicos, como digestão anaeróbica e fermentação. Além da coprodução, combinando a biomassa com outras fontes de energia, assim como utilização da biomassa oriunda do manejo florestal sustentável para conversão em energia por meio da gaseificação, como pellets (Zhang, 2025; Milovanović; Janičić Milovanović, 2023; Brandão *et al.*, 2021; Mesquita *et al.*, 2024). Além disso, espécies de florestas tropicais urbanas foram identificadas como fontes acessíveis de biomassa para geração de energia, com valores caloríficos superiores a 19 MJ/kg e densidade energética variando de 4,45 a 10,80 GJ/m³ (Klindeberg *et al.*, 2020).

Essas descobertas enfatizam coletivamente o vasto potencial energético dos resíduos do manejo florestal no Brasil, oferecendo alternativas sustentáveis às fontes de energia tradicionais, e, ao mesmo tempo, mitigando emissões de carbono (Alves *et al.*, 2023a).

Quanto ao aspecto da legislação para utilização desses resíduos, ela desempenha um papel crucial para a determinação do seu uso para a produção de energia. A viabilidade econômica é essencial para projetos de bioenergia, como a biomassa florestal precisando competir com outros usos e ser econômica em comparação com fontes alternativas de energia (Lunnan *et al.*, 2008). Resíduos florestais e agrícolas tem um potencial significativo de valorização de energia.

3.2. Legislação Brasileira

A legislação brasileira, conforme destacado em vários trabalhos de pesquisa (Alves *et al.*, 2023a; Alves *et al.*, 2023b; Lima *et al.*, 2020; Tisi; Matos; Carneiro, 2023) desempenha papel crucial na promoção do uso de resíduos do manejo florestal para produção de bioenergia. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, autorizada pela Lei 12.305/2010, enfatiza a necessidade de práticas sustentáveis de gestão de resíduos, incluindo a recuperação energética de resíduos agrícolas e resíduos madeireiros. A legislação e as iniciativas em vigor visam minimizar o descarte em aterros sanitários, reduzir as emissões de carbono e impulsionar o desenvolvimento do setor de transformação de resíduos em energia no Brasil, contribuindo, em última instância, para a matriz energética mais sustentável e ecologicamente correta.

O Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012, prevê a utilização de costaneiras, aparas, cavacos e outros resíduos provenientes de atividades industriais assim como oriunda de Planos de Manejo Florestal Sustentável. A Instrução Normativa nº 05 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará, define a utilização de resíduos provenientes da exploração florestal como galhos, sapopemas, restos de

troncos de árvores provenientes de árvores exploradas (árvores derrubadas), que podem ser utilizados como produtos secundários tanto para a produção de madeira como para energia.

A Instrução Normativa do IBAMA nº 8, de 25 de março de 2022, estabelece os procedimentos para a autorização de exportação de produtos e subprodutos madeireiros de espécies nativas, provenientes de florestas naturais ou plantadas. Seu objetivo é complementar o controle de exportação de cargas de madeira nativa no âmbito do IBAMA, em consonância com normativas anteriores, como a Instrução Normativa nº 21/2014 (Sinaflor), a Instrução Normativa nº 17/2021 e a Portaria nº 8/2022.

A Resolução Nº 474, de 6 de abril de 2016 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, dispõe sobre procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos e subprodutos florestais madeireiros de origem nativa, bem como os respectivos padrões de nomenclatura e coeficientes de rendimento volumétrico, inclusive de carvão vegetal. Assim como define o que é carvão vegetal e carvão vegetal de resíduos, sendo este último definido como: “Substância combustível, sólida, negra, resultante da carbonização de resíduo da industrialização da madeira, podendo apresentar diversas formas e densidades”. E, também, define o que são os resíduos da indústria madeireira para fins energéticos: aparas, costaneiras, sobras do processo de desdobro da madeira, maravalhas, grânulos e serragem destinados para fins energéticos e passíveis de aproveitamento em peças de madeira.

Quanto a origem, esses resíduos são provenientes de áreas de manejo florestal sustentável, realizadas em áreas de concessão e de áreas privadas que utilizam técnicas que garantem que a floresta permaneça saudável e de pé. A área concedida é manejada em um rodízio, o que permite a produção contínua e sustentável de madeira, o retorno a mesma área ocorrerá a cada 25 a 30 anos, garantindo o tempo necessário para a recuperação plena da floresta manejada. As concessões florestais servem de contraponto às práticas de exploração irregular da madeira, ajudando a diminuir a grilagem em terras públicas, coibindo as ações criminosas de queimada e furto de madeira (SFB, 2019).

De igual modo, no Brasil há a Lei nº 13,576, de 26 de dezembro de 2017, que institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), com o objetivo principal de expandir a produção e uso de biocombustíveis no Brasil, garantindo a previsibilidade, sustentabilidade ambiental, segurança energética e desenvolvimento do setor. Essa lei cria um marco regulatório para estimular o uso de biocombustíveis sustentáveis, incluindo os originados de biomassa, tanto para transporte quanto para outras finalidades energéticas, como geração de energia elétrica. Ela estabelece um sistema de certificação ambiental e valorização de créditos de carbono, criando incentivos econômicos para produtores eficientes e sustentáveis.

Finalmente, a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima, com o objetivo de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), incentivar o uso de fontes renováveis de energia e promover o desenvolvimento sustentável. Ela cria um marco legal para políticas de mitigação das mudanças climáticas; reconhece e incentiva o uso energético de biomassa e resíduos; valoriza a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, como o bio-óleo ou o carvão vegetal; e estimula o desenvolvimento de projetos sustentáveis e de baixa emissão, que podem se beneficiar de apoios governamentais ou mecanismos de mercado de carbono.

3.3. Valorização energética dos resíduos do manejo florestal

Por valorização de resíduos compreende-se qualquer processo que recupere ou extraia os materiais ou o conteúdo energético dos resíduos. A valorização pode ser qualquer medida tomada após uma substância, objeto ou material tenha se tornado resíduo, como principal intuito de substituir fontes de matéria prima englobando operações de reutilização, reciclagem, e recuperação energética (Reis, 2016). Pesquisas já exploram o tema de aproveitamento de resíduos (Tabela 2), principalmente os provenientes do manejo florestal sustentável na Amazônia, visando à caracterização energética dessas biomassas como alternativa para sistemas de conversão na Amazônia e sua equivalência energética com combustíveis fósseis. Alguns trabalhos reportados na literatura avaliaram o efeito das espécies de madeira provenientes desses resíduos no processo de pirólise lenta e o que isso impacta na qualidade do carvão vegetal (Lima *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2025).

Tabela 2 – Trabalhos sobre caracterização de madeiras provenientes de resíduos.

Artigo	Principais resultados	Referência
Exploring the effects of slow pyrolysis temperature and species on the quality of charcoal from Amazonian woody wastes	Os resultados da pesquisa fornecem informações valiosas para melhorar os processos de produção de produção de carvão vegetal na Amazônia, contribuindo para a sustentabilidade da indústria siderúrgica nacional. O estudo enfatiza a importância de selecionar espécies de madeira e temperaturas de pirólise apropriadas para melhorar a qualidade do carvão vegetal.	Santos <i>et al.</i> , 2025
Wood waste pellets from sustainable forest management in the Amazon as an energy source	Os resíduos do manejo florestal sustentável na Amazônia, especificamente de espécies como <i>Dinizia excelsa</i> , <i>Parkia</i> spp. e <i>Licania canescens</i> , podem ser convertidos em pellets de biomassa, servindo como	Mesquita <i>et al.</i> , 2024

	uma fonte de energia valiosa com propriedades físicas e energéticas variadas.	
Evaluating wood waste pellet quality and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon	São utilizados resíduos do processamento de madeiras de espécies amazônicas manejadas de forma sustentável em pellets de biocombustível, aumentando a densidade energética e mitigando as emissões de CO ₂ , apoiando assim a recuperação descentralizada de energia e reduzindo a dependência do diesel.	Sá <i>et al.</i> , 2024
Solid biofuel from the Amazon: a circular economy approach to briquette production from wood waste	O artigo destaca que os resíduos de madeira oriundo do manejo florestal sustentável na Amazônia podem ser reaproveitados para geração de energia por meio da produção de briquetes, fornecendo renda para os moradores locais e reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis, promovendo assim a economia circular.	Vilas Boas <i>et al.</i> , 2024
Forest biomass as a viable pathway for sustainable energy supply in isolated villages of Amazonia	Os resíduos de biomassa do manejo florestal podem ser utilizados para a geração de eletricidade por meio de sistemas de gaseificação e ciclo Rankine, fornecendo fonte de energia limpa e renovável que reduz a dependência de energia externa e promove o desenvolvimento econômico local.	Brandão <i>et al.</i> , 2021
Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuel for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon	Resíduos madeireiros de espécies manejadas de forma sustentável na Amazônia brasileira mostram características energéticas promissoras, com certas espécies como <i>Dinizia excelsa</i> superando as espécies plantadas convencionais, tornando-as alternativas viáveis para a mitigação da emissão de CO ₂ .	Lima <i>et al.</i> , 2020a
Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia	O estudo caracteriza carvões vegetais de resíduos madeireiros na Amazônia brasileira, revelando seu potencial para a geração de bioenergia. Esses carvões apresentam propriedades energéticas adequadas e podem substituir com eficácia os combustíveis fósseis, atendendo às necessidades de energia industrial e doméstica da região.	Lima <i>et al.</i> , 2020b
Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns	O artigo enfatiza que a carbonização dos resíduos de madeiras amazônicas com propriedades físicas, químicas e energéticas semelhantes, pode melhorar a qualidade do carvão vegetal resultante. Isso sugere que o gerenciamento adequado dos resíduos de madeira pode levar a melhores resultados energéticos.	Lima <i>et al.</i> , 2023

A avaliação energética dos resíduos do manejo florestal é aspecto crucial da utilização sustentável da biomassa. Pesquisas demonstram que resíduos de atividades de manejo florestal sustentável, como resíduos madeireiros de diversas espécies amazônicas podem servir como fonte de riqueza para geração de energia, com características promissoras (Mesquita *et al.*, 2024). Já existem projetos que utilizam desses resíduos para produção de energia, como o projeto Floresta Limpa, que visa converter resíduos da biomassa florestal em bioenergia, a produção de biocombustíveis sintéticos de 2ª geração, biometanol, éter bio-dimetílico (bio-DME) e biogás, dependendo das condições operacionais do processo (Gomes *et al.*, 2022).

Diferentes planos de gerenciamento de resíduos, destaca a importância de escolher métodos que não apenas geram energia, mas que contribuam para o sequestro de carbono, enfatizando o papel do gerenciamento de resíduos na mitigação das mudanças climáticas (Simões *et al.*, 2023). Processo de recuperação de resíduos incluem a produção de combustíveis como carvão vegetal, bio-óleo, pellets, gás de síntese por meio de abordagens termoquímicas e biogás por métodos bioquímicos. Todos esses processos visam agregar valor aos resíduos da biomassa florestal, materiais ricos em celulose, hemiceluloses e lignina, transformando-os em alternativas sustentáveis para diversas indústrias (Braghiroli; Passarini, 2020).

Quanto a utilização dos resíduos para geração de energia em indústrias, destaca-se o polo siderúrgico de Carajás, localizado nos estados do Pará e Maranhão. A qualidade da biomassa utilizada é fundamental para seu abastecimento, pois impacta a produção de biocombustíveis e carvão vegetal utilizado na indústria siderúrgica (Rodrigues *et al.*, 2019). A qualidade da biomassa, descrita por fatores como umidade e composição química, influencia significativamente o custo e a eficiência da produção de biocombustíveis, enfatizando a importância de atualização na entrega de biomassa de entrada para minimizar custos (Aboytes-Ojeda; Castillo-Villar; Eksioğlu, 2022).

O uso de combustível de biomassa na indústria siderúrgica, como substituto do coque, requer análise cuidadosa de suas propriedades para manter a qualidade da sinterização e reduzir as emissões de gases poluentes (Kang *et al.*, 2021). Analisar as propriedades físicas e químicas de diferentes espécies florestais para a produção de carvão vegetal é essencial para garantir a qualidade e eficiência do fornecimento de biomassa para atender a demanda do polo siderúrgico (Fortaleza *et al.*, 2019).

Os desafios relacionados a heterogeneidade das matérias-primas para a produção de carvão vegetal são devidos às variações na composição e propriedades da matéria prima, como diferentes composições químicas, níveis de umidade e teores de cinzas, que influenciam o comportamento da pirólise (Adam *et al.*, 2023; Fadeyibi *et al.*, 2020). Da mesma forma, os

resíduos industriais contêm componentes heterogêneos que podem ser reaproveitados em produtos úteis, necessitando de métodos de processamento complexos para transformação (Pystin; Sherstobitov; Minnigullova, 2019).

3.4. Qualidade da biomassa lenhosa para fins energéticos

A qualidade da biomassa lenhosa para fins energéticos é aspecto crucial no setor de energia renovável. Pesquisas mostram que a produção de biocombustíveis sólidos a partir da biomassa florestal, incluindo vários tipos de resíduos de madeira, desempenham papel significativo na produção de energia primária. Stolarski *et al.* (2023), avaliaram as características termofísicas e a composição elementar de diferentes tipos de biocombustíveis sólidos comerciais, destacando variações nas propriedades como teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico com base no tipo de biomassa e no tempo de aquisição.

Além disso, a produção sustentável de biomassa lenhosa para uso energético foi explorada. As descobertas indicam diferentes rendimentos e qualidades de biomassa entre diferentes espécies lenhosas de rápido crescimento, enfatizando a importância da seleção de espécies e práticas de manejo para garantir sistemas de cultivo sustentáveis e melhoria do solo (Alaejos *et al.*, 2023). Dessa forma, torna-se importante a necessidade de avaliar e otimizar a qualidade da biomassa lenhosa para aumentar sua eficiência e eficácia como fonte de energia renovável.

Dentre as características da madeira para uso energético, as características físicas mais importantes são a densidade básica e umidade. Para uma maior eficiência na carbonização da biomassa, a umidade deve ser $< 30\%$ (base seca), pois o processo de evaporação da umidade absorve energia em combustão, o que acaba reduzindo o poder calorífico líquido da madeira (Assis *et al.*, 2012).

Resíduos agroflorestais de culturas como semente de açaí, casca de cacau, casca de coco, cacho de dendê e sabugo de milho mostraram baixa densidade energética com valores de 1,19 a 6,94 GJ/m³ e baixo teor de cinzas (média de 1,4% bs) tornando-os valiosos para aplicações de bioenergia (Costa *et al.*, 2023).

Determinar as propriedades físicas e químicas é indispensável, pois se relacionam com o desempenho energético da biomassa, como densidade básica, teor de lignina, holocelulose, extrativos, cinzas e poder calorífico superior (Soares *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2016). O elevado teor de lignina e a qualidade desta macromolécula podem contribuir para maiores rendimentos durante o processo de pirólise (Pereira *et al.*, 2013; Araújo *et al.*, 2016).

A composição química das substâncias orgânicas influencia significativamente o desempenho de processos termoquímicos como pirólise e combustão, impactando a qualidade dos produtos energéticos obtidos. Pesquisas indicam que a composição das matérias-primas exerce função essencial no sucesso desses processos, com pequenas variações (Demin; Pavlov; Khasiyatullo, 2021; Maksymov *et al.*, 2022).

Quanto ao teor de extrativos para biomassas de espécies amazônicas, Santana e Okino (2007) encontraram variação de 0,6% a 17,3% bs (2007), valores similares ao encontrado por Lima *et al.* (2020) com variação de 1,8% a 17,8% bs para resíduos de espécies amazônicas. Nascimento (2022), quantificou o teor de extrativos totais de 10 espécies amazônicas e encontrou variação de 2,37% a 7,8% bs. E, Moulin *et al.* (2017) encontraram variação de 7,36 a 10,50% bs de teor de extrativos pra madeiras provenientes de resíduos madeireiros da Amazônia.

Quando se objetiva a produção de carvão vegetal, dependendo da resistência à degradação térmica dos extrativos presentes na madeira, maior porcentagem de extrativos poderá colaborar para o aumento do poder calorífico do carvão, além de elevar o rendimento em carbono fixo, em função da natureza dessas substâncias possuírem, de maneira geral, compostos de levado teor de carbono (Santos *et al.*, 2016).

O nível de temperatura durante a pirólise afeta a composição dos componentes voláteis, com temperaturas mais altas levando ao aumento da produção de gás e a melhoria da qualidade do gás combustível (Zolotovska *et al.*, 2022). Os processos de pirólise, gaseificação e liquefação, oferecem conversão sustentável de resíduos em produtos valiosos, enfatizando a importância de otimizar esses processos para eficiência energética, rendimento do produto e impacto ambiental (Durak, 2023).

A presença de extrativos na biomassa influencia significativamente seu desempenho combustível e durante o processo de pirólise. Extrativos e cinzas impactam as temperaturas iniciais de degradação e as características de perda de massa durante a pirólise (Protásio *et al.*, 2022). Além disso, a remoção de extrativos afeta a composição do bio-óleo e do biocarvão, com impactos distintos em produtos de pirólise de celulose, hemiceluloses e lignina (Zhang *et al.*, 2020).

3.5. Efeito dos extrativos no processo de pirólise

A pirólise dentre os processos termoquímicos, apresenta-se como o método mais eficaz para a produção de produtos com alto poder calorífico a partir de resíduos sólidos (Pang *et al.*, 2021). Diversos parâmetros de operação são fundamentais para a classificação do processo de

pirólise, entre eles, a taxa de aquecimento, o tempo de residência, o tamanho das partículas da matéria prima e a faixa de temperatura.

O processo de pirólise ocorre em três etapas (Borél, 2018): 1) secagem, que ocorre até 150°C, e tem como objetivo evaporar a umidade presente na biomassa; 2) pirólise primária, que ocorre entre 200-600°C, e tem como objetivo liberar a água intrínseca e os gases com baixa massa molecular, como CO e CO₂, ocorre também a decomposição das estruturas básicas da matéria prima; 3) pirólise secundária, que ocorre entre 300-900°C, gerando o carvão e alguns gases não condensáveis.

A pirólise primária é o estágio em que a biomassa se decompõe em alcatrão, carvão e gases. Na biomassa as reações primárias são geralmente endotérmicas, exigindo calor para conduzir a decomposição (Cereijo *et al.*, 2024). O rendimento dos voláteis primários é influenciado por fatores como taxa de aquecimento e temperatura, com taxas mais altas aumentando a produção de voláteis (Wang *et al.*, 2024).

Já na pirólise secundária ocorre a fase de reação subsequente em que o alcatrão e os voláteis mais pesados são posteriormente transformados em gases mais leves, as reações secundárias são tipicamente exotérmicas, liberando energia e contribuindo para a produção de gás (Cereijo *et al.*, 2024). A pirólise em dois estágios reduz significativamente o rendimento de alcatrão ao converter voláteis pesados em gases, alcançando redução de até 89,9% na produção de alcatrão (Chen *et al.*, 2024).

Os extrativos podem ser essenciais na pirólise da biomassa à medida que sua concentração aumenta (Wan *et al.*, 2019). O aumento da energia de ativação das reações de pirólise, o aumento da produção de ácido acético e a inibição da formação de levoglucosana são efeitos que os extrativos podem causar na reação (Guo *et al.*, 2010).

A presença de extrativos pode alterar as vias de decomposição térmica, potencialmente levando a variações na produção de gases, carvão vegetal e alcatrão. Além disso, as interações entre os extrativos e os principais componentes da biomassa podem aumentar ou inibir a formação de produtos específicos de pirólise, dependendo de sua natureza química e concentração (Bielecki; Zubkova, 2022).

Os extrativos da madeira exercem função essencial no processo de pirólise devido à sua influência na composição química da madeira e no comportamento térmico subsequente. Os extrativos da madeira podem ser categorizados em quatro grupos principais: i) componentes lipídicos, ii) compostos fenólicos, iii) ceras e gorduras e, iv) alcaloides. Cada grupo possui características distintas e usos potenciais. Os componentes lipídicos, que inclui terpenos,

terpenóides, triglicerídeos e ácidos graxos são significativos por seus papéis em produtos de biorrefino e bioenergia (Verkasalo *et al.*, 2022). Compostos fenólicos são divididos em fenóis simples, lignanas, flavonoides e taninos, conhecidos por suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas, tornando-os valiosos na preservação de embalagem e alimentos (Sosa *et al.*, 2024). As ceras e gorduras contribuem para as propriedades hidrofóbicas da madeira, influenciando sua durabilidade e resistência a decomposição. Os alcaloides, embora menos comuns também desempenham papel na atividade biológica dos extrativos da madeira (N'Guessan *et al.*, 2023).

Pesquisas mostram que a presença de extrativos como terpenos e terpenóides, afetam os perfis dos produtos de pirólise e as fragmentações características, impactando a formação de compostos aromáticos durante a pirólise e podem diminuir as temperaturas iniciais de degradação da biomassa. Por exemplo, a casca de cacau (20,1% bs) e o cacho vazio de frutos de dendê (17,3% bs), com altos teores de extrativos apresentam degradação inicial em temperaturas ≤ 200 °C (Protásio *et al.*, 2022).

A decomposição térmica dos próprios extrativos produz ácidos adicionais alterando a distribuição final do bio-óleo. Os extrativos solúveis em água se decompõem sequencialmente, enquanto os extrativos lipossolúveis produzem olefinas durante a pirólise (Peng *et al.*, 2021). O maior conteúdo de extrativos correlaciona com a diminuição das temperaturas de degradação, aumentando a taxa de devolatilização da celulose mais do que das hemiceluloses (Moya *et al.*, 2017).

3.6. Efeito dos extrativos no processo de combustão

Combustão é uma reação de oxidação que o combustível sofre, ocorrendo quando a quantidade de O₂ é suficiente para transformá-lo em gases, deixando como resíduo somente as cinzas. É uma reação francamente exotérmica com variação de entalpia negativa ($\Delta H < 0$), isto é, com liberação de energia (Trugilho *et al.*, 2017).

O processo de combustão ocorre em seis etapas consecutivas, bem definidas, conforme relatadas por Nogueira e Lora (2003) e Brand (2010): 1) secagem: ocorre em temperaturas inferiores a 200°C, sendo responsável pelo consumo de 20% da massa do combustível; 2) emissão de voláteis: ocorre em temperaturas de até 400°C; 3) ignição dos voláteis: ocorre até 600°C, chegando à perda de 40% da massa do combustível; 4) combustão dos voláteis (combustão homogênea): que ocorre até 800°C, na qual 60% da massa do combustível é perdida; 5) extinção da chama dos voláteis: ocorre acima de 800°C, com continuidade da perda

de massa do combustível; 6) combustão dos resíduos de carbono sólido (incandescência): que ocorre acima de 800°C, restando somente as cinzas no final do processo.

O processo de combustão da madeira é significativamente influenciado pela presença de extrativos, que podem tanto alterar a eficiência quanto as emissões do material queimado, e desempenham grande influência na determinação das características de combustão. Esses compostos influenciam a ignição, a eficiência e as emissões de gases, pois aumentam as emissões de CO e particulados em caso de queima incompleta. Por outro lado, os compostos inorgânicos são os que possuem maior potencial de alterar significativamente as características de combustão (Lee *et al.*, 2020).

Os extrativos podem modificar o comportamento de degradação térmica da madeira, afetando as temperaturas nas quais a combustão ocorre. Na literatura foi demonstrado que a remoção de extrativos aumenta a estabilidade térmica de compostos de madeira, levando a maiores temperaturas de degradação (Sheshmani *et al.*, 2012). Altos níveis de extrativos solúveis em água quente na biomassa como cachos de dendê (10,8% bs) e casca de cacau (18,0% bs), teve o segundo menor pico durante o segundo estágio de combustão (258 °C) dentre as biomassas avaliadas, e maior liberação de energia durante a combustão (Costa *et al.*, 2023).

3.7. Normas para quantificação de extrativos

Para determinar e agrupar tipos de extrativos são utilizados produtos de extração sequencial com solventes polares, como etanol e água. Esses tipos de solventes tipicamente separam flavonoides (polifenóis), cumarílico (ácidos), taninos (polifenóis), açúcares e saponinas (açúcares). Já as ceras, pigmentos, alcaloides e terpenos são extraídos com solventes como a acetona - CH_3COCH_3 (Thammasouk *et al.*, 1997; Karaseva *et al.*, 2019).

Atualmente, as normas mais utilizadas para a determinação de extrativos da madeira são as da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e a Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI. Ambas tratam de formas de obtenção do teor de extrativos da madeira, com diferentes técnicas e solventes.

As normas NBR – 14853 (2010) e TAPPI T 208 pm-99 (1999a) descrevem os procedimentos para a determinação de componentes da madeira que são solúveis em acetona. Este solvente extrai conteúdo da madeira como ácidos graxos, ácidos resínicos, esteróis, ceras e hidrocarbonetos não voláteis. Para o procedimento de extração é necessário, balão volumétrico com capacidade de 250 ml, tubo de extração Soxhlet com capacidade até o topo do sifão de cerca de 100 ml, dispositivo de aquecimento, banho de vapor ou manta de aquecimento e capela de exaustão química.

Quanto aos reagentes são utilizados acetona com grau mínimo de pureza de 99,5% (CH_3COCH_3) por volume. É necessário ter alguns cuidados e precauções ao utilizar este solvente, pois é altamente inflamável. Para o procedimento de extração, a madeira é moída e peneirada e utilizado o material que fica retido na bandeja de 60 mesh, sendo utilizado 4 g do material para o processo de extração, a determinação se dá por duplicata. Utiliza-se 150 ml de acetona para o processo de extração, que irá circular nas amostras por não menos que 24 extrações durante o período de 4 a 5 horas.

Para solubilidade em água, as normas NBR – 14577 (2017) e TAPPI T 207 cm-99 (1999b) determinam os procedimentos tanto para água quente como para água fria. A extração em água normalmente se aplica quando os extrativos não são removidos com solventes orgânicos. Para a determinação da solubilidade em água fria, a madeira é extraída com água a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ com agitação por 48 horas. Para determinação em água quente, a extração ocorre com água em banho-maria fervente por 3 horas. A extração com água fria remove uma parte de compostos inorgânicos, taninos, gomas, açúcares e corantes presentes na madeira. Já o de água quente também remove amidos. A amostra de madeira utilizada é moída e peneirada, sendo destinada ao ensaio 2,0 g que passou pela peneira de 40 mesh, para solubilidade em água quente ou fria. A seguir são indicados os procedimentos laboratoriais que devem ser adotados:

Solubilidade em água fria - em um béquer de 400 ml adicionar lentamente 300 ml de água destilada, e certificar que o material está bem molhado inicialmente para evitar a tendência de flutuar. Efetuar a extração a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ com agitação constante por 48 h. Posteriormente, transferir o material para um cadinho filtrante previamente seco e de massa constante a uma temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, lavar com 200 ml de água destilada fria e secar até massa constante a $105 \pm 3^\circ\text{C}$.

Solubilidade em água quente - transferir a amostra para um erlenmeyer de 250 ml, adicionar 100 ml de água destilada quente e colocar em banho maria fervente, certificando-se do nível de água do banho maria é mantido acima do nível da água do frasco. Transferir o conteúdo do balão para um cadinho filtrante que tenha sido previamente seco a $105 \pm 3^\circ$ e que se obteve um peso constante, lavar com 200 ml de água quente e secar a $105 \pm 3^\circ$ até massa constante.

Extrativos totais – utiliza-se 2g do material moído e peneirado que ficou retido na peneira de 60 mesh. Após a pesagem o material é seco em estufa até massa constante, e logo após submetido ao processo de extração, primeiramente com o solvente etanol/tolueno na proporção de 2:1 por um período de 6 horas, depois submetido a extração apenas com etanol por um período de 5 horas, e por fim lavado com água destilada quente com três porções de

300 ml. Na Tabela 3 estão descritas as normas e o que cada solvente remove da biomassa lignocelulósica, como a madeira.

Tabela 3 – Normas utilizadas para cada método de extração, solvente utilizado e compostos removidos da madeira.

Normas	Solvente utilizado	Compostos removidos
NBR – 14853/2010 TAPPI T 280 pm-99	Etanol-tolueno	Carboidratos de baixa massa molecular, sais, polifenóis e substâncias solúveis em água
	Acetona	Ácidos graxos, ácidos resínicos, esteróis e hidrocarbonetos não voláteis.
NBR – 14577/2017 TAPPI T 207 cm-99	Água fria	Compostos inorgânicos, taninos, gomas, açúcares e materiais corantes
	Água quente	Amidos e compostos que são removidos em água fria.

Fonte: ABNT (2017); ABNT (2010); TAPPI (1999)

4. MATERIAL E MÉTODOS

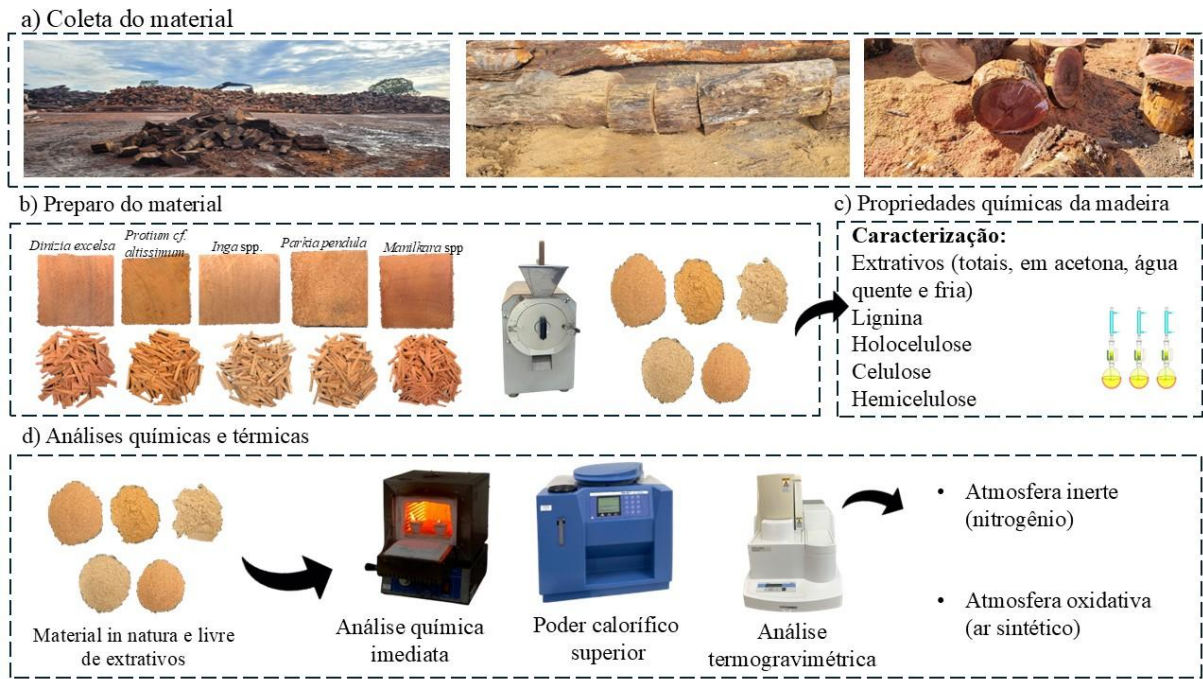
4.1. Coleta e preparo do material

O material utilizado foi proveniente dos resíduos do manejo florestal sustentável, realizado na Fazenda Rio Capim, no município de Paragominas – PA. Foram selecionadas 5 espécies segundo seu teor de extrativos totais: *Dinizia excelsa* (Angelim-vermelho) *Protium cf altissimum* (Breu barrote), *Manilkara* spp. (Maçaranduba), *Parkia pendula* (Faveira) e *Inga* spp (Ingá), classificadas em alto, médio e baixo teor de extrativos. O material utilizado foi proveniente de galhos das árvores manejadas e que estavam disponíveis no pátio de estocagem de resíduos. Foram cortados 16 toretes de 30 cm por espécie, retirados 2 discos de 20 cm por peça para cada espécie, totalizando 8 discos/espécie, e a partir desses discos foram confeccionados os corpos de prova com dimensões de 4x4cm.

Para a realização análises o material foi transformado em palitos, em seguida moídos em moinho de facas modelo SL – 32, e classificados nas peneiras de 40,60 e 200 mesh. O

material utilizado para as análises químicas foi o que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh, e para análise termogravimétrica o que ficou retido na peneira de 200 mesh (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Do Autor (2025)

4.1.1. Determinação do teor de extrativos

Os teores de extrativos totais e em acetona foram realizados de acordo com a NBR 14853 (ABNT, 2010). Esses processos envolvem a utilização de 2 g de amostra secas e, em seguida, submetida ao processo de extração em extrator soxhlet com etanol/tolueno (2:1) por um período de 6 horas, extração em etanol por 5 horas, e por fim lavado com água destilada quente em três porções de 300 ml, após essas etapas, o material foi seco em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas. A extração em acetona foi realizada por um período de 4 horas até completar 24 ciclos, após esse processo as amostras foram secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante.

Os extrativos solúveis em água quente e fria foram determinados segundo as normas NBR 14577 (ABNT, 2017). Para a determinação do teor de extrativos em água quente utilizou-se 2 g de amostra em um frasco Erlenmeyer de 250 ml, e adicionado 100 ml de água destilada quente e colocadas em banho de água em ebulição por 3 horas, após esse período, o material foi filtrado em cadinho de vidro sinterizado nº 2 previamente seco, e lavado com 200 ml de água destilada quente e seco em estufa de secagem até massa constante. Para extração em água fria, foram pesadas 2 g da amostra seca em um béquer de 400 ml e adicionado 300 ml de água

destilada permanecendo em uma temperatura de 23 ± 2 °C, por 48 h. Após esse período filtrou-se o material em cadinho de vidro sinterizado nº 2, e levado para secagem em estufa até massa constante. Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

4.1.2. Composição química imediata

A análise química imediata foi realizada utilizando 1 g de amostra para cada repetição, sendo duas repetições em triplicata e, posteriormente secas em estufa a 103 ± 2 °C para obtenção da massa seca. A determinação dos materiais voláteis e cinzas foi realizada em forno elétrico tipo mufla, conforme a norma D 1762-84 (ASTM, 2021). O teor de carbono fixo foi obtido pela diferença entre os resultados obtidos de teor de materiais voláteis e cinzas. O ensaio foi realizado com o material in natura, e os materiais livres de extrativos (removidos por água quente, água fria e acetona).

4.1.3. Determinação dos teores holocelulose, celulose, hemiceluloses e lignina

O teor de holocelulose foi obtido seguindo-se o procedimento descrito por Browning (1963), no qual 2 g (com precisão de 0,1 mg) do material livre de extrativos previamente seco a 105 ± 2 °C, foi colocado em um erlenmeyer de 125 ml, juntamente com 55 ml de água, 2 ml de uma solução de clorito de sódio 30% (m/v) e 2 ml de uma solução de ácido acético (1:5, v/v). O erlenmeyer foi tampado com tampa de porcelana, e o conjunto foi colocado em um banho termostaticado, a 70 ± 5 °C. Além disso, a adição de solução de ácido acético e clorito de sódio foi repetida a cada 45 minutos. Ao final de aproximadamente 4 horas a mistura foi resfriada lentamente e filtrada em cadinho de vidro com placa porosa nº 2 previamente tarado. A holocelulose (resíduo sólido) resultante foi lavada exaustivamente com água fria e com três porções de metanol e, posteriormente, seca em estufa a 103 ± 2 °C, até massa constante.

O teor de celulose foi determinado seguindo o procedimento de Kennedy, Phillips e Willians (1987). Adicionou-se cerca de 1 g de holocelulose seca e 15 ml de solução de KOH 24% em um recipiente de plástico. Agitou-se à temperatura ambiente por 15 horas, filtrou-se com cadinho de vidro tarado, lavou-se o resíduo com água destilada até neutralidade, depois com ácido acético 1% e etanol. Secou-se a celulose em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante. As hemiceluloses foram quantificadas pela diferença entre os teores de holocelulose e celulose. Os valores de holocelulose, celulose e hemiceluloses foram calculadas considerando o teor de extrativos da amostra em base massa seca total, de acordo com as Equações 1, 2, e 3, respectivamente.

$$\text{Holocelulose (\%)} = H\% * (100 - TE (\%)) \quad (1)$$

Em que: H%: teor de holocelulose em porcentagem da base massa seca - bs; TE: teor de extrativos totais base massa seca.

$$\text{Celulose (\%)} = \frac{\text{Massa de Celulose seca}}{\text{Massa Seca total}} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Hemiceluloses (\%)} = \text{Holocelulose (\% bs)} - \text{Celulose (\% bs)} \quad (3)$$

Para obter os teores de lignina insolúvel (Klason) e solúvel, seguiu-se a norma NBR 7989 (ABNT, 2010), com adaptação. Pesou-se 0,300 g de amostra livre de extrativos, adicionou-se 3 ml de ácido sulfúrico 72% e aqueceu-se por 1 hora em banho-maria a $30 \pm 0,2$ °C, agitando frequentemente. Após esse processo distribuiu-se em frascos de vidro de 100 ml, em que foram adicionados 84 ml de água destilada, fechou-se com tampa de borracha e lacre de alumínio, e levado para ferver sob pressão por 1 hora. O material nos frascos foi filtrado com 500 ml de água destilada em cadinhos de vidro sinterizado revestidos com óxido de alumínio, previamente desfibrados em solução de água destilada e ácido sulfúrico (72%) sob fervura. Após a filtração, os cadinhos com lignina insolúvel foram secos por 24 horas em estufa a 40°C e depois a 103 ± 2 °C por 4 horas. A lignina solúvel foi determinada por espectroscopia UV (Modelo Shimadzu UV-1601PC), segundo Goldschmid (1971). O teor total de lignina foi obtido somando-se os valores de lignina solúvel e insolúvel. Os teores de lignina base massa seca livre de extrativos foram recalculadas para a base massa seca total, conforme a Equação 4.

$$\text{Lig} = \frac{P1}{P2} * (100 - TE\%) \quad (4)$$

Em que: Lig: teor de lignina corrigida (%); P1: peso do resíduo de lignina (g); P2: peso inicial da amostra de madeira (a.s), livre de extrativos (g); TE%: teor de extrativos da amostra de madeira.

4.2. Análise termogravimétrica em atmosferas inerte e oxidativa

Para análise termogravimétrica da madeira utilizou-se o equipamento DTG 60-H da Shimadzu. As análises foram realizadas em duplicata, em atmosfera inerte (nitrogênio) e atmosfera de ar sintético (~21% de oxigênio e 79% de nitrogênio), utilizando 4 mg do material *in natura* e livre de extrativos, sendo utilizado aquele que ficou retido na peneira de 200 mesh.

Para o teste em atmosfera inerte (nitrogênio) adotou-se os seguintes parâmetros, vazão de 70 ml/min com taxa de aquecimento de 5°C/min com temperatura final de 750°C, e mantida por 30 min à 100 °C para secagem do material. Para atmosfera oxidativa utilizou-se taxa de aquecimento de 10°C/min, vazão de 70 ml/min e temperatura final de 750°C. O material foi mantido durante 30 min à 100 °C para secagem.

Os seguintes parâmetros foram usados para avaliar a combustão da madeira: temperatura de ignição (T_i), temperatura burnout (T_b), temperatura máxima do estágio de combustão ($T_{máx}$), tempo correspondente a taxa máxima de combustão (t_p), tempo de ignição (t_{ig}), taxa máxima ($(dm/dt)_{máx}$), taxa média ($(dm/dt)_{média}$) de combustão, índice de combustão (S), índice de ignição (Di) e o índice de inflamabilidade (Ci). As temperaturas de ignição e burnout foram sugeridas por Sahu *et al.* (2010), Wang *et al.* (2011), Wang *et al.* (2012) e Moon *et al.* (2013). A definição da temperatura de ignição foi definida como a temperatura na qual a taxa de combustão aumenta 1% min^{-1} , indicando o ponto inicial de combustão principal. A temperatura burnout é definida como a temperatura na qual a taxa de combustão diminui 1% min^{-1} , isso designa o fim do processo de combustão. O índice de combustão (S) foi obtido pela Equação 5, citada por Moon *et al.* (2013), Qian *et al.* (2012) e Liu *et al.* (2013). O índice de ignição (Di) foi obtido pela Equação 6 e foi determinado por Xiang-Guo *et al.* (2006). Já o índice de inflamabilidade (Ci) foi obtido pela equação 7 determinado por Alves *et al.* (2020) e Zou *et al.* (2019).

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{me}}{T_i^2 \times T_b} \quad (5)$$

Em que: $(dm/dt)_{\max}$ é a taxa máxima de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$), $(dm/dt)_{me}$ é a taxa média de combustão, T_i é a temperatura de ignição ($^{\circ}\text{C}$) e T_b é a temperatura burnout ($^{\circ}\text{C}$).

$$Di = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{T_{máx} \times t_{ig}} \quad (6)$$

Em que: $(dm/dt)_{\max}$ é a taxa máxima de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$), $T_{máx}$ é o tempo correspondente a taxa máxima de combustão (min) e t_{ig} é o tempo de ignição (min).

$$Ci = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max}}{T_i^2} \quad (7)$$

Em que: $(dm/dt)_{\max}$ é a taxa máxima de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$), T_i é a temperatura de ignição ($^{\circ}\text{C}$).

Para a plotagem dos gráficos e obtenção dos parâmetros de combustão foi desconsiderada a fase de secagem do material.

4.3. Poder calorífico superior e estimativas energéticas

O poder calorífico superior (PCS), do material in natura e do material livre de extrativos, foi determinado em triplicata, utilizando bomba calorimétrica digital modelo C-200, IKA, seguindo a metodologia da norma E711-87 (ASTM, 2004). Utilizou-se o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh. O material foi seco em estufa até massa constante para a realização do ensaio de poder calorífico.

Para estimar a quantidade de energia total e remanescente na biomassa florestal após a remoção dos extrativos, realizou-se os cálculos para a estimativa de massa de extrativos totais em tonelada/hectare em relação a madeira em tora que é destinada a serraria e os resíduos que são gerados pela atividade do manejo florestal sustentável. O valor de energia restante na biomassa após a remoção dos extrativos foi determinado segundo a equação 8. Também foi feita a relação entre o teor de extrativos totais e a energia remanescente da biomassa após a remoção dos extrativos.

$$Em_{t/ha} = (M_{tora} + M_{resíduos}) \times \left(\frac{E\%}{100}\right) \quad (8)$$

Em que: $EM_{t/ha}$ é a massa de extrativos totais por hectare, M_{tora} é a massa da madeira em tora por hectare (t/ha), $M_{resíduos}$ é a massa seca dos resíduos do manejo florestal, $E\%$ é o teor de extrativos totais da madeira (em % da massa seca).

4.4. Análise estatística

As análises estatísticas foram conduzidas por meio de análise de variância (ANOVA), utilizando delineamento inteiramente casualizado. Para verificar a normalidade dos resíduos, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk, considerando nível de significância de 5%. A homogeneidade das variâncias foi avaliada por meio do teste de Levene. Quando identificadas diferenças significativas entre os tratamentos, procedeu-se a comparação múltipla das médias utilizando o teste de Scott-Knott. Todas as análises foram realizadas no software R.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Composição química estrutural

Os valores médios da composição química estrutural das madeiras das diferentes espécies estudadas estão apresentados na Tabela 4 em base massa seca e na Tabela 5 os valores expressos na base massa seca livre de extrativos. A análise de variância indicou efeito de espécie para os teores de holocelulose, lignina total, extrativos totais, celulose, hemiceluloses e cinzas. O maior valor para o teor de holocelulose foi encontrado para a madeira da espécie *Inga*

spp. (69,08% base massa seca - bs), enquanto para a espécie *Dinizia excelsa* foi obtido o menor valor (59,14% bs).

Tabela 4 – Composição química estrutural dos resíduos lenhosos de espécies amazônicas em base massa seca total (bs).

Espécies	Extrativos totais (% bs)	Lignina total (% bs)	Holocelulose (% bs)	Celulose (%bs)	Hemiceluloses (%bs)	Cinzas (% bs)
<i>Dinizia excelsa</i>	16,38 (0,23) a	23,94 (1,61) b	59,14 (1,64) d	38,90 (1,04) c	20,24 (0,62) c	0,54 (0,05) a
<i>Protium cf. altissimum</i>	11,30 (0,44) b	25,40 (0,77) b	62,58 (0,47) c	36,68 (0,33) c	25,90 (0,51) b	0,72 (0,21) b
<i>Parkia pendula</i>	4,17 (0,13) d	27,52 (0,42) a	67,84 (0,45) b	39,93 (0,58) b	27,91 (0,23) a	0,47 (0,23) b
<i>Inga spp.</i>	2,78 (0,07) e	27,61 (0,27) a	69,08 (0,21) b	41,60 (0,01) b	27,48 (0,22) a	0,52 (0,07) b
<i>Manilkara spp.</i>	6,83 (0,19) c	24,53 (1,35) c	68,01 (1,28) a	43,34 (1,49) a	24,67 (0,33) a	0,63 (0,05) b

Dados entre parênteses representam o desvio padrão.

Fonte: Do Autor, (2025)

Tabela 5 – Composição química estrutural dos resíduos lenhosos de espécies amazônicas em base massa seca livre de extrativos (bsle).

Espécies	Lignina total (% bsle)	Holocelulose (% bsle)	Celulose (% bsle)	Hemiceluloses (% bsle)
<i>Dinizia excelsa</i>	28,83 (2,28) b	59,72 (0,36) c	39,28 (0,29) b	20,44 (0,08) d
<i>Protium cf. altissimum</i>	25,40 (0,88) a	68,45 (0,29) b	40,12 (0,37) e	28,33 (0,37) b
<i>Parkia pendula</i>	27,51 (0,38) a	74,76 (1,31) b	44,01 (0,15) c	30,75 (0,15) a
<i>Inga spp.</i>	27,62 (0,45) a	75,48 (0,42) b	45,45 (0,20) d	30,03 (0,20) a
<i>Manilkara spp.</i>	27,33 (1,91) c	75,69 (0,47) a	48,23 (0,52) a	27,46 (0,94) c

Dados entre parênteses representam o desvio padrão.

Fonte: Do Autor, (2025)

Para o teor de lignina total os resíduos lenhosos das espécies *Inga spp.* e *Parkia pendula* obtiveram os maiores valores, com 27,61% e 27,52% bs, respectivamente, não diferindo estatisticamente entre si. Em relação as outras espécies, os menores teores de lignina foram para as espécies *D. excelsa* e *Manilkara spp.* com 23,94% e 24,53% respectivamente. A lignina é o composto químico que mais influencia o uso energético da madeira, pela sua elevada estabilidade térmica (Órfão; Antunes; Figueiredo, 1999).

Quanto ao teor de celulose, a espécie que apresentou o maior teor foi *Manilkara spp.* com 43,34% bs, enquanto *P. altissimum* o menor valor, de 36,68% bs. *P. pendula* e *Inga spp.* formam o grupo com os maiores valores de hemiceluloses com 27,91% bs e 27,48% bs,

respectivamente, enquanto *D. excelsa* apresentou o menor valor (20,24% bs). As hemiceluloses possuem menor estabilidade térmica, o que influencia a decomposição durante a carbonização.

A espécie *D. excelsa* apresentou o maior teor de extrativos totais com 16,08% bs, enquanto *Inga* spp. teve o menor valor de 2,78%. Valor semelhante reportado por Lima *et al.*, (2020) que encontraram ampla variação no teor de extrativos totais (1,8 – 17% bs) incluindo *D. excelsa*, (17% bs) e *P. altissimum* (10% bs). Santana e Okino (2007) encontraram variação semelhante para os extrativos totais (0,6 a 17,3% bs) em 36 espécies amazônicas. Estudos mostram que os extrativos contribuem para o aumento do poder calorífico superior, sendo aconselhável priorizar madeiras com alto teores desses componentes químicos para geração de energia térmica (Menucelli *et al.*, 2019).

Quanto ao teor de cinzas os valores variaram de 0,52% (*Inga* spp.) a 0,63% bs (*Manilkara* spp.). Ferreira *et al.* (2023) encontraram teor de cinzas em pellets de *D. excelsa* e *Manilkara elata* variando de 0,18% a 0,65% bs. As cinzas afetam negativamente o poder calorífico da madeira. O baixo teor de cinzas encontrados na madeira é desejável, pois os minerais não participam das reações de degradação térmica. (Bustamante-García *et al.*, 2013). A proporção de cinzas está diretamente relacionada com a quantidade de minerais presentes na biomassa, que provocam a redução do carbono fixo e, conseqüentemente, na massa combustível e no poder calorífico.

Observando os resultados obtidos (Tabela 6), os teores de extrativos solúveis em água fria variaram de 1,15% a 5,91% bs, em água quente de 1,81% a 9,95% bs, e em acetona de 0,54% a 6,61% bs, considerando todas as espécies estudadas. Dentre os métodos de extração, a água quente apresentou maior amplitude de teores, seguida da água fria e da acetona. Essas diferenças refletem a diversidade de compostos extraídos por cada solvente e a variabilidade química entre as espécies.

Tabela 6 – Valores médios do teor de extrativos em água fria, água quente e acetona para os resíduos lenhosos de espécies amazônicas.

Espécies	Extrativos em água fria (% bs)	Extrativos em água quente (% bs)	Extrativos em acetona (% bs)
<i>Dinizia excelsa</i>	5,86 _(0,75) a	9,95 _(0,06) a	6,61 _(0,31) a
<i>Protium cf. altissimum</i>	3,58 _(0,52) b	5,77 _(0,10) b	5,59 _(0,13) b
<i>Parkia pendula</i>	1,86 _(0,23) c	2,09 _(0,08) d	1,68 _(0,17) d
<i>Inga</i> spp.	1,15 _(0,42) d	1,81 _(0,09) c	0,54 _(0,02) e
<i>Manilkara</i> spp.	5,91 _(0,10) a	6,14 _(0,16) b	2,23 _(0,25) c

Dados entre parênteses representam o desvio padrão.

Fonte: Do Autor, (2025)

Observou-se que no método de remoção em água quente obteve-se maiores valores percentuais de extrativos, seguido do método em água fria (Tabela 5). Para todos os métodos de extração, a espécie que se destacou foi *D. excelsa* com maior percentual médio. Já o menor percentual médio foi para as espécies *P. pendula* e *Inga* spp.

Os valores de extrativos removidos em água quente foram menores (1,81 – 9,95% bs) que os encontrados por Medeiros *et al.* (2020). Os autores investigaram biomassas oriundas de plano de manejo florestal das espécies *Piptadenia suaveolens*, *Caryocar villosum*, *Bowdichia nitida*, e *Manilkara huberi*, e encontraram teores de extrativos em água quente de 10,21% a 13,48% bs. Comparado ao presente estudo os valores foram superiores. No entanto, extrativos em acetona foram superiores ao encontrado pelos autores, com valores de 0,08% a 3,73% bs, foram inferiores ao encontrados para este trabalho, com valores de 0,54% a 6,61% bs. A maior quantidade de extrativos removidos em água quente, se deve as frações solúveis em água, como taninos hidrolisáveis, sais inorgânicos e substâncias pécticas (Trugilho, *et al.*, 2003).

A variação e a redução dos teores de extrativos removidos em acetona, pode ser explicada pelos tipos de compostos extraídos, visto que este solvente remove componentes lipofílicos como ácidos graxos, ceras, pigmentos e substâncias não saponificáveis (Sarto; Sansgliolo, 2010). Apesar da menor proporção de extrativos do que os constituintes primários da parede celular lenhosa, os extrativos precisam de consideração total na avaliação energética da biomassa (ver tópico 5.3). Esses compostos são componentes não estruturais, o que significa que sua remoção mantém a parede celular intacta (Wang; Dai G; Luo, 2017).

5.2. Composição química imediata

Na Tabela 7 estão apresentados os dados médios da composição química imediata do material in natura, livre de extrativos, e do material que foi submetido aos processos de remoção por água quente, água fria e acetona.

Tabela 7 – Composição química imediata da biomassa *in natura*, livre de extrativos totais, livre de extrativos removidos em água quente, água fria e acetona.

Espécies	<i>In natura</i>			Livre de extrativos			Água quente			Água fria			Acetona		
	Material volátil	Cinzas	Carbono Fixo	Material volátil	Cinzas	Carbono Fixo	Material volátil	Cinzas	Carbono Fixo	Material volátil	Cinzas	Carbono Fixo	Material volátil	Cinzas	Carbono Fixo
-----% base massa seca-----															
<i>Dinizia excelsa</i>	79,62 (0,49)	0,54 (0,06)	19,84 (0,53)	82,07 (0,53)	0,32 (0,04)	17,61 (0,53)	82,76 (0,54)	0,29 (0,02)	16,96 (0,56)	81,03 (0,27)	0,42 (0,11)	18,55 (0,33)	81,38 (3,36)	0,39 (0,02)	18,22 (3,37)
<i>Protium cf. altissimum</i>	79,35 (0,21)	1,05 (0,01)	19,60 (0,26)	82,68 (0,78)	0,92 (0,03)	16,40 (0,77)	83,65 (0,28)	0,59 (0,04)	15,77 (0,25)	83,21 (1,20)	0,68 (0,07)	16,10 (1,13)	80,62 (0,13)	0,93 (0,02)	18,45 (0,14)
<i>Parkia pendula</i>	84,18 (0,86)	1,12 (0,025)	14,70 (0,99)	84,08 (0,10)	0,77 (0,06)	15,16 (0,08)	84,14 (1,26)	0,49 (0,08)	15,37 (1,19)	84,37 (0,64)	0,76 (0,00)	14,87 (0,64)	82,17 (0,42)	1,03 (0,06)	16,81 (0,38)
<i>Inga spp.</i>	81,39 (0,97)	0,52 (0,17)	18,09 (0,85)	83,99 (0,21)	0,44 (0,08)	15,57 (0,21)	85,54 (0,86)	0,69 (0,09)	13,76 (0,86)	84,58 (0,36)	1,31 (1,22)	14,10 (1,48)	81,87 (0,53)	0,65 (0,03)	17,48 (0,53)
<i>Manilkara spp.</i>	83,14 (0,04)	0,61 (0,02)	16,25 (0,09)	85,36 (0,51)	0,36 (0,07)	14,27 (0,57)	83,75 (0,16)	0,40 (0,03)	15,84 (0,19)	84,18 (1,15)	0,76 (0,61)	15,06 (0,67)	82,98 (0,19)	0,46 (0,08)	16,56 (0,17)

Fonte: Do Autor, (2025)

A partir da análise imediata da madeira das espécies estudadas (Tabela 7), observa-se que os teores de materiais voláteis variaram de 79,35s (*P. altissimum*) a 84,18% bs (*P. pendula*) para o material in natura, e de 82,07 (*D. excelsa*) a 85,36% bs (*Manilkara* spp) para o material livre de extrativos. Valores de a 82,76 (*D. excelsa*) a 85,54% bs (*Inga* spp) para o material em que os extrativos foram removidos em água quente. Para o material em que os extrativos foram removidos em água fria e acetona, variaram de 81,03 (*D. excelsa*) a 84,58% bs (*Inga* spp) e de 80,62 (*P. altissimum*) a 82,98% bs (*Manilkara* spp).

Os valores obtidos na análise de cinzas variaram de 0,52(*Inga* spp) a 1,05% (*P. altissimum*) para o material in natura. Para o material livre de extrativos de 0,32 (*D. excelsa*) a 0,92% (*P. altissimum*). Já para material submetido a remoção dos extrativos em água quente e fria foram os teores de cinzas vaiaram de 0,29 (*D. excelsa*) a 0,69% (*Inga* spp), 0,42 (*D. excelsa*) a 1,31% (*Inga* spp). Para o material lenhoso submetido a remoção em acetona os valores variaram de 0,39 (*D. excelsa*) a 1,03% bs (*P. pendula*).

O teor de cinzas representa o resíduo inorgânico que permanece após a combustão do carbono fixo. A utilização de madeiras com alto teor de cinzas causa danos às tubulações e câmaras de combustão devido à deposição de escória e incrustações (Hytonen; Nurmi, 2015), reduz o poder calorífico e a eficiência da combustão (Klasnja; Kopitovic; Orlovic, 2002).

Para o teor de carbono fixo os valores variaram de 14,70 (*P. pendula*) a 19,84% bs (*D. excelsa*) para o material in natura. Já para o livre de extrativos variou de 14,27 (*Manilkara* spp) a 17,61% bs (*D. excelsa*). O teor de carbono fixo do material submetido a extração prévia em água quente e fria foi variou de 13,76 (*Inga* spp) a 16,96% bs (*D. excelsa*) e de 14,10 (*Inga* spp) a 18,55% bs (*D. excelsa*). Por outro lado, o material lenhoso submetido à extração em acetona apresentou teor de carbono fixo variando de 16,56 (*Manilkara* spp) a 18,45% bs (*P. altissimum*).

Geralmente, a remoção de extrativos aumenta o material volátil e reduz o carbono fixo, isso ocorre porque extrativos podem contribuir para o conteúdo geral de carbono, sua ausência significa que menos carbono permanece (Duan *et al.*, 2024). Quanto aos solventes utilizados, a água fria e quente remove substâncias hidrossolúveis, como taninos, açúcares e ácidos orgânicos. O material submetido a extração prévia em água quente apresentou maior teor de material volátil, uma vez que a ausência desses extrativos mais pesados permite que uma proporção maior de componentes mais leves e voláteis permaneça, aumentando assim o conteúdo de material volátil (Moulin *et al.*, 2017).

Para o material que foi submetido a extração em acetona, a remoção dos extrativos causou menor variação nos teores de materiais voláteis em comparação às extrações com água quente e fria. Esse comportamento está relacionado à natureza dos extrativos removidos pela

acetona, majoritariamente compostos lipofílicos, como ceras, ácidos graxos e pigmentos, que apresentam maior estabilidade térmica. Esses compostos, além de serem extraídos em menor quantidade, têm menor contribuição para a formação de voláteis durante a degradação térmica da biomassa, dessa forma, a remoção desses extrativos impactou menos a quantidade de materiais voláteis.

Dentre os resultados obtidos, a espécie *D. excelsa* apresenta valores relativamente altos de carbono fixo com valores de 19,84, 17,61, 18,55, 18,22 e, 18,22% bs para os cinco tratamentos, in natura, livre de extrativos, água quente, água fria e acetona, respectivamente. Já a *P. pendula* tem altos teores de materiais voláteis, indicando queima mais rápida, e *Inga spp.* apresentou menor teor de carbono fixo após a remoção dos extrativos, sugerindo que os extrativos são importantes na sua composição.

As espécies com o maior impacto dos extrativos foram *P. atissimum* e *Inga spp.*, que apresentaram grande redução de carbono fixo e aumento de material volátil devido a remoção dos extrativos em água. As espécies mais estáveis foram *P. pendula* e *Manilkara spp.*, cujos parâmetros pouco variaram com os as remoções dos extrativos nos diferentes solventes. A espécie com maior potencial energético foi a *D. excelsa* que combina baixos teores de cinzas e alta estabilidade no carbono fixo.

Os materiais voláteis e o carbono fixo são importantes frações químicas da madeira que influenciam a reação de oxidação, afetando conseqüentemente a taxa de queima e a homogeneidade da chama na câmara de combustão (Santos *et al.*, 2013). A maior proporção de material volátil permite que a biomassa inflame mais facilmente, resultado que poderá ser confirmado pelos resultados da TGA (ver tópico 5.4). As espécies *D. excelsa* e *P. altissimum* apresentaram os menores valores de material volátil e maior carbono fixo, esses valores estão relacionados, provavelmente ao teor de lignina total. Espera-se que o menor teor de material volátil dessas espécies reduzirá a reatividade da combustão (Zhou *et al.*, 2016). Madeiras com alto teor de carbono fixo apresentam maior PCS, portanto, liberarão energia por mais tempo durante o processo de combustão (Brun *et al.*, 2018).

5.3. Poder calorífico superior (PCS)

Na Tabela 8 estão apresentadas as médias das propriedades energéticas avaliadas de poder calorífico superior (PCS).

Para o material lenhoso *in natura* não houve diferença significativa entre as espécies para o PCS (média de 20,31 MJ/kg). Para os valores de PCS do material livre de extrativos, a espécie *D. excelsa* apresentou o maior valor de PCS com 20,49 MJ/kg, seguido por *Manilkara*

spp., *Inga* spp. e *P. altissimum* com 19,81 MJ/kg, 19,66 MJ/kg e 19,66 MJ/kg, respectivamente. O resíduo lenhoso da espécie *P. pendula* apresentou o menor valor (19,06 MJ/kg).

Tabela 8 – Valores médios de poder calorífico superior (PCS) dos resíduos lenhosos de espécies amazônicas.

Poder calorífico superior (MJ/kg)					
Espécie	Material <i>in natura</i> *	Livre de extrativos	Água fria	Água quente	Acetona
<i>Dinizia excelsa</i>	21,02 (0,43)	20,49 (0,07) a	20,33 (0,25) a	20,52 (0,04) a	20,51 (0,08) a
<i>Protium cf. altissimum</i>	19,88 (0,18)	19,62 (0,13) b	19,81 (0,04) b	20,00 (0,06) b	20,14 (0,19) a
<i>Parkia pendula</i>	20,84 (1,01)	19,06 (0,09) c	19,54 (0,16) c	19,55 (0,15) c	19,65 (0,33) a
<i>Inga</i> spp.	20,07 (0,24)	19,66 (0,35) b	19,31 (0,14) c	19,49 (0,09) c	20,13 (0,22) a
<i>Manilkara</i> spp.	20,09 (0,37)	19,81 (0,22) b	19,94 (0,09) b	20,36 (0,10) a	20,24 (0,26) b
CV	2.27%	1.01%	0.78%	0.48%	1.15%

Dados entre parênteses representam o desvio padrão.

*De acordo com o teste F, as médias não podem ser consideradas estatisticamente diferentes entre si.

Fonte: Do Autor, (2025)

Para os valores de PCS do material sem extrativos em água fria, *D. excelsa* e *Manilkara* spp. apresentaram o maior valor, com 20,33 MJ/kg e 19,94 MJ/kg, respectivamente. Os menores valores foram para *P. pendula* e *Inga* spp. com 19,54 MJ/kg e 19,31 MJ/kg, respectivamente.

A espécie que apresentou o maior valor de PCS do material sem extrativos em água quente foi *D. excelsa* com 20,52 MJ/kg. A *P. pendula* e *Inga* spp. obtiveram os menores valores, 19,55 MJ/kg e 19,49 MJ/kg, respectivamente. Para o tratamento em acetona também foi encontrado o maior valor para a espécie *D. excelsa* com 20,51 MJ/kg, enquanto *P. pendula* apresenta menor valor (19,65 MJ/kg).

Diante disso, podemos concluir que, a madeira da espécie *D. excelsa* apresentou consistentemente os maiores valores de PCS após todos os métodos de remoção de extrativos, sendo a espécie mais eficiente em termos de energia. *P. pendula* mostrou os menores valores de PCS em todos os tratamentos, possivelmente devido a sua composição química, podendo ser considerada a menos eficiente no contexto energético. Outras espécies como *Manilkara* spp., *Inga* spp. e *P. altissimum* apresentaram desempenho intermediário, agrupando-se em níveis semelhantes de valores de PCS.

O maior conteúdo de extrativos na madeira pode contribuir para o aumento do poder calorífico, como observado para a espécie *D. excelsa*, que possui maior conteúdo de extrativos e os maiores valores de poder calorífico. Determinadas classes de extrativos, especialmente os de caráter fenólicos em sua composição, eleva o teor de carbono fixo do combustível, aumentando assim o poder calorífico do material (Santos *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2016).

A quantidade de calor despreendida da madeira é muito importante para conhecer sua capacidade energética. Essa capacidade é afetada por algumas características como o teor de extrativos, teor de cinzas e o teor de lignina, sendo a lignina o componente mais energético da madeira em decorrência do alto nível de aromaticidade, o tamanho, arranjo de sua estrutura e elevado teor de carbono. Assim espera-se que a madeira com maior teor de lignina apresente maior PCS.

O poder calorífico superior das espécies estudadas nos mostraram variações sutis em função dos extrativos e da composição química da madeira. Espécies com alto teor de extrativos como *D. excelsa* (16,38% bs extrativos totais, sendo 6,61% bs solúveis em acetona), mantiveram o PCS elevado (20,5 MJ/kg) mesmo após a remoção, pois sua energia é compensada pelo teor de lignina (23,94% bs) e celulose (39,28% bs). Já em *P. altissimum*, a remoção de extrativos em acetona reduziu levemente o PCS (19,62 MJ/kg), indicando que seus compostos lipídicos contribuem positivamente. Espécies com baixos extrativos hidrossolúveis, como *Inga* spp. (1,15% bs em água fria) e *P. pendula* (2,09% bs em água quente), tiveram PCS menos afetado, pois esses compostos (açúcares) têm menor contribuição energética. A estabilidade do PCS após remoção de extrativos deve-se à predominância da lignina e celulose na geração de energia, enquanto os materiais voláteis (hemiceluloses) e cinzas influenciaram negativamente. Os resultados sugerem que a extração seletiva de compostos valiosos (resinas e taninos) pode ser feita sem comprometer significativamente o uso energético da biomassa, especialmente em espécies como *D. excelsa*, que combinam alta densidade energética e resíduos termicamente estáveis.

A remoção dos extrativos reduziu o PCS de forma variável conforme espécie e o tipo de solvente utilizado, devido às diferenças na composição química. Espécies ricas em extrativos lipofílicos, como *P. altissimum* (5,59% em acetona) apresentaram maior redução no PCS após extração (de 19,88 para 19,62 MJ/kg), pois esses compostos contribuem significativamente para o poder calorífico. Já em *D. excelsa*, a remoção com água quente (9,95% bs) levou a um ligeiro aumento do PCS (20,25 para 20,49 MJ/kg), pois eliminou compostos hidrossolúveis menos energéticos. Espécies com baixo teor de extrativos, como *Inga* spp. (2,78% s) tiveram reduções menores, já que sua energia deriva principalmente da lignina (27,61% bs).

O PCS está mais relacionado com as características inerentes de cada espécie, como o teor e o tipo de extrativos presentes na madeira, que pode contribuir para a quantidade de calor liberado durante a queima do material e influenciar a capacidade energética do combustível (Carneiro *et al.*, 2017).

O tipo de solvente mostrou efeitos distintos: a acetona, que remove lipídios energéticos, causou maiores reduções, enquanto a água fria, que extrai principalmente sais e açúcares, teve impacto mínimo. Esses resultados demonstram que a influência dos extrativos no PCS depende tanto de sua natureza química quanto da composição estrutural da biomassa, com a lignina atuando como fator compensatório nas espécies onde está presente em maior quantidade.

Devido a estrutura e composição química diferentes dos componentes da biomassa, exceto a celulose, como consequência os valores de poder calorífico podem variar muito entre as diferentes espécies. Além disso, a composição química da biomassa não varia apenas com os materiais, mas, também, do procedimento de análise. Quanto a influência dos extrativos, sua estrutura química também depende das espécies de biomassa e dos solventes extrativos utilizados (Sheng e Azevedo, 2005).

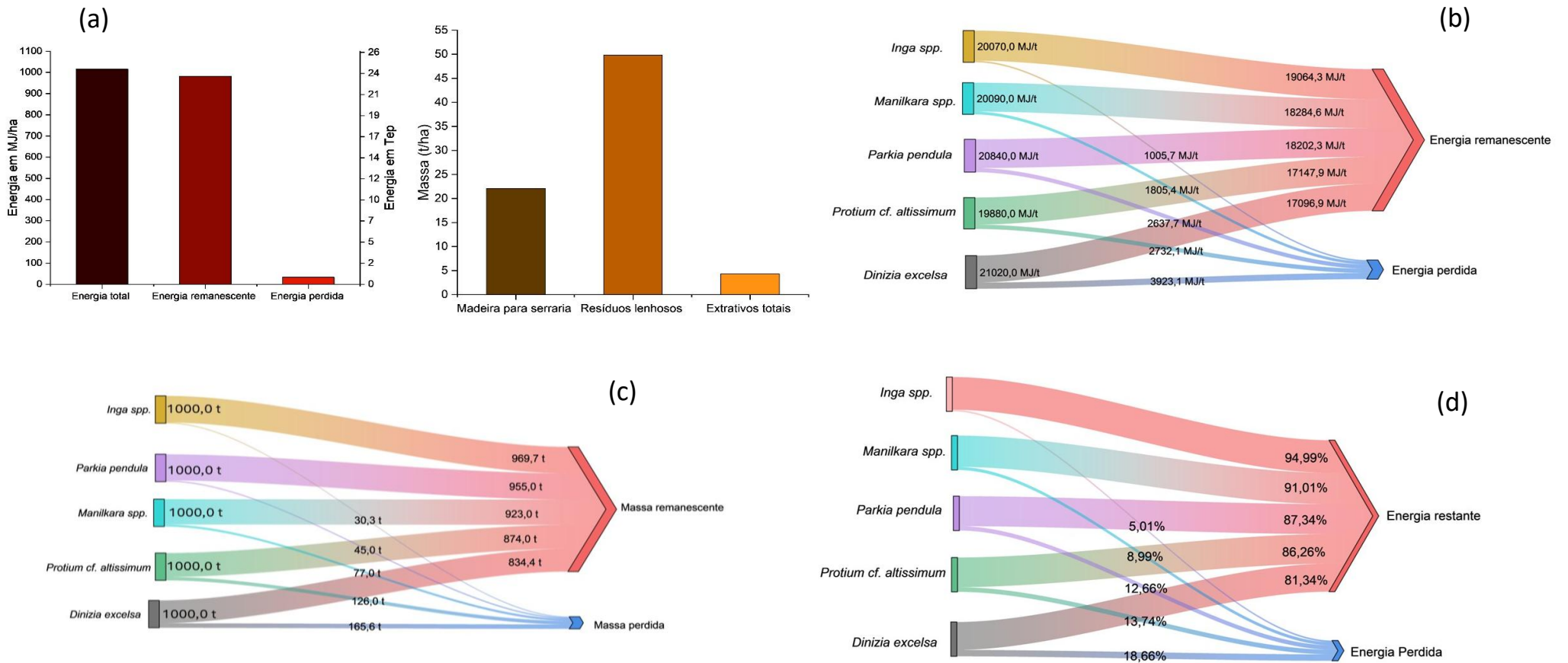
Observou-se que as espécies com maiores teores de carbono fixo apresentaram, de maneira geral, também maiores valores de poder calorífico superior (PCS). Tal comportamento está associado ao fato de o carbono fixo ser o principal responsável pela combustão lenta e pela liberação prolongada de energia na queima da biomassa, como descrito por Protásio *et al.* (2022).

Na Figura 2 são apresentadas as estimativas da presença dos extrativos em relação a energia total da biomassa, energia remanescente e a energia perdida, assim como a estimativa de massa dos extrativos em relação aos resíduos lenhosos e madeira para serraria. A análise da contribuição dos extrativos na biomassa e energia remanescente evidência que eles representam uma fração relativamente pequena da massa total por hectare, conforme indicado na Figura 2 (a). Apesar da baixa contribuição em termos de massa, os extrativos influenciam a energia disponível da biomassa, devido a perda de massa conforme demonstrado na Figura 2 (b).

A Figura 2 demonstra que a perda energética após a remoção de extrativos variou significativamente entre as espécies, correlacionando-se diretamente com sua composição química. Enquanto espécies como *D. excelsa* e *Inga* spp. apresentaram perdas mínimas (<1%) – evidenciadas no diagrama de Sankey – isso se deve ao teor de lignina das espécies, que compensou a remoção, particularmente quando solventes como água quente extraíram compostos pouco energéticos. Por outro lado, *P. altissimum* e *P. pendula* tiveram perdas mais acentuadas (1,3 – 8,5%), refletidas no fluxo energético da Figura 2, pois seus extrativos

lipofílicos/fenólicos (removidos por acetona) contribuíam significativamente para o PCS. A figura 2 destaca que espécies com maior proporção de extrativos totais (*D. excelsa*) mantiveram melhor balanço energético pós-extração, sustentando a viabilidade de biorrefinaria para estas biomassas, desde que considerados os tipos de solventes e extrativos envolvidos.

Figura 2 – Valores estimados de energia e valores de massa de extrativos totais em tonelada/hectare em relação a madeira em tora destinada à serraria e resíduos lenhosos gerados durante a exploração de impacto reduzido(a), diagrama de Sankey com o balanço energético da combustão após a remoção dos extrativos (c, d, e).

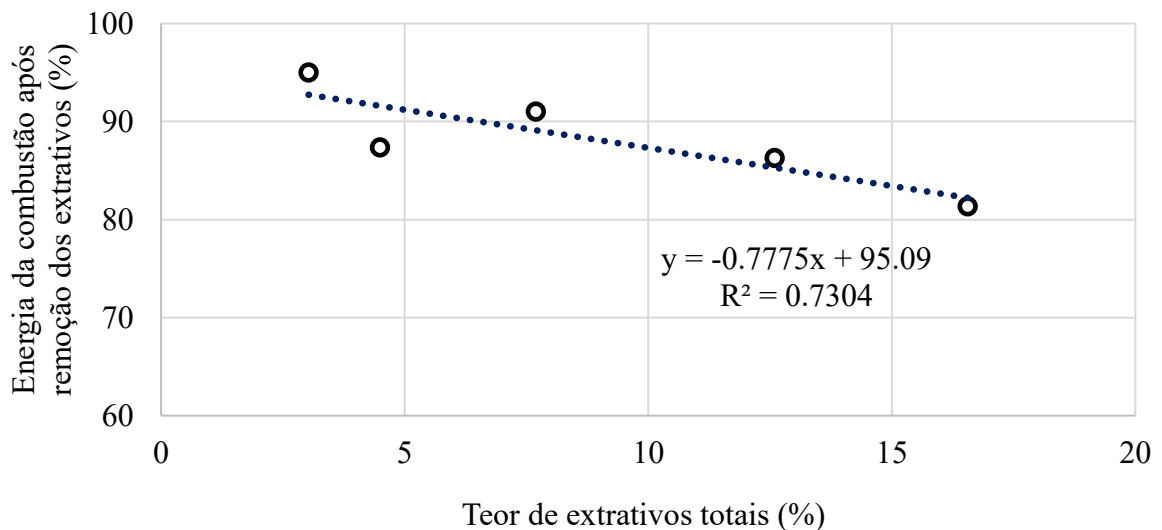


Fonte: Do Autor, 2025

A perda energética após a remoção dos extrativos não foi significativa para todas as espécies, e sua magnitude dependeu criticamente da interação entre três fatores: 1) tipo e quantidade de extrativos, 2) composição estrutural da madeira (proporção lignina/celulose), e 3) solvente utilizado. Essas estimativas são cruciais para estratégias de aproveitamento da biomassa, especialmente em aplicações energéticas, em que a maximização da energia útil é essencial. A remoção dos extrativos pode reduzir compostos indesejáveis, mas ao custo de perdas energéticas, devendo ser ponderada conforme os objetivos de uso da biomassa.

A figura 3 apresenta a relação entre o teor de extrativos totais e a energia remanescente na biomassa após a remoção desses compostos. Verifica-se uma correlação expressiva ($R^2 = 0,7304$), demonstrando que a energia da biomassa tende a diminuir com o aumento do conteúdo de extrativos. A equação da regressão linear indica que, para cada acréscimo de 1% no teor de extrativos, há uma redução média de 0,78% na energia remanescente. Esse comportamento confirma que os extrativos possuem alto valor energético, contribuindo significativamente para o poder calorífico da madeira. Assim, a remoção desses compostos impacta diretamente o rendimento energético, sobretudo em espécies com maiores teores de extrativos, comprometendo sua estabilidade térmica e eficiência em processos termoquímicos.

Figura 3 – Relação entre o teor de extrativos totais e a energia remanescente da biomassa após a remoção dos extrativos.



Fonte: Do Autor, 2025

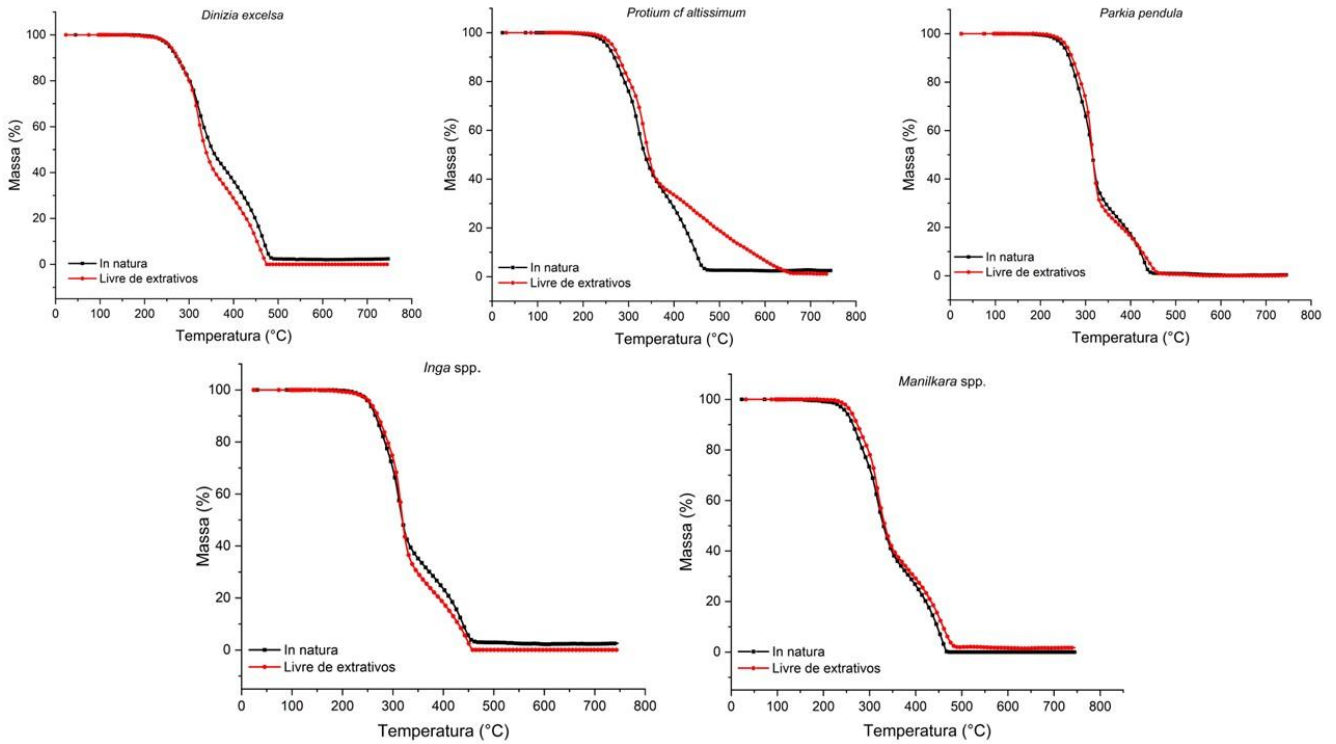
Estudos com resíduos da madeira de teca (Arévalo e Marti, 2020), principalmente os provenientes de poda e resíduos, possuem um potencial energético significativo, com valores de poder calorífico superior atingindo 17,373 kJ/kg para biomassa seca.

5.4. Análises termogravimétricas (TG/DTG)

5.4.1. Combustão (atmosfera oxidativa)

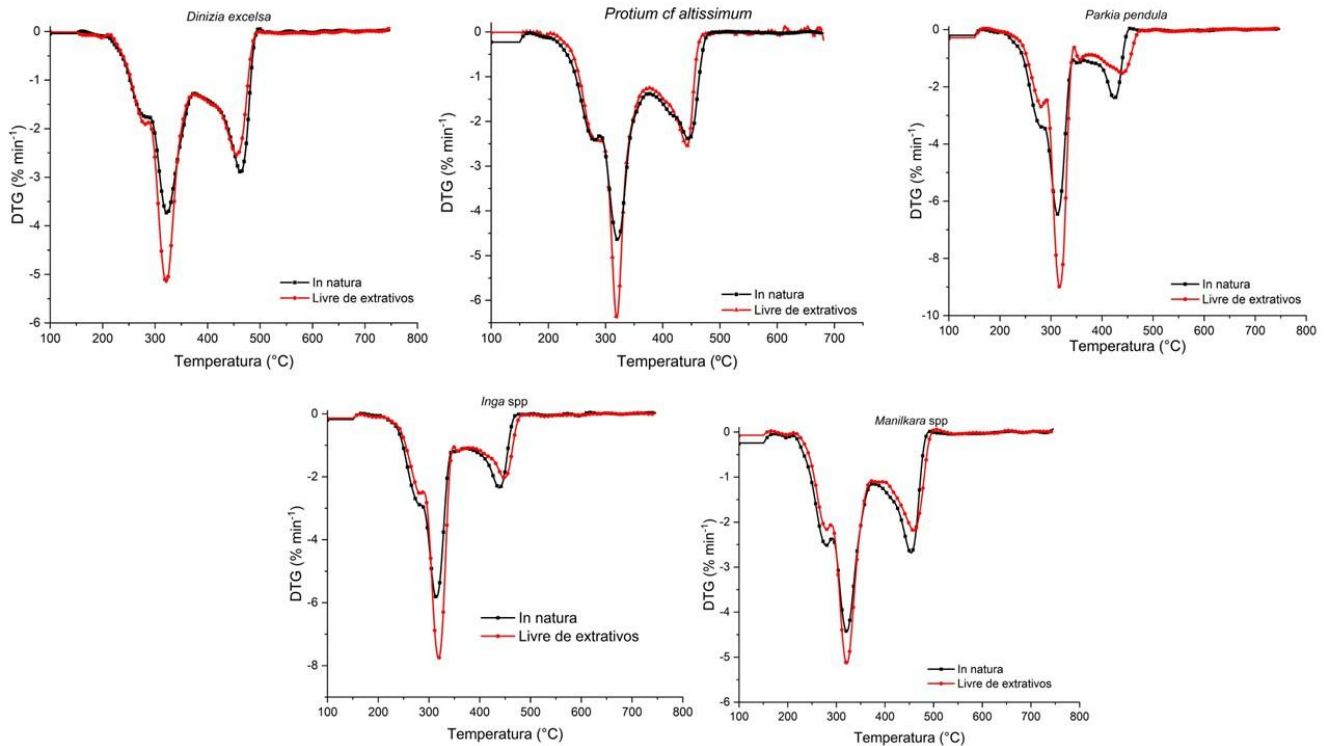
As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas termogravimétricas e sua derivada para as cinco espécies estudadas, respectivamente.

Figura 4 – Termogravimetria em atmosfera de ar sintético de todas as espécies avaliadas, tanto do material in natura como livre de extrativos.



Fonte: Do Autor, (2025)

Figura 5 - Derivada das curvas termogravimétricas de todas as espécies estudadas, tanto do material in natura como do material livre de extrativos.



Fonte: Do Autor, (2025)

As análises termogravimétricas mostraram perfis típicos de biomassas lignocelulósicas (Figuras 4 e 5), com dois estágios principais de perda de massa. Os diferentes picos e estágios de perda de massa observados nas curvas DTG são atribuíveis a desvolatilização, combustão de material volátil (estágio principal da reação) e combustão do carbono fixo (Mian *et al.*, 2020; Laougé e Merdum, 2020; Sher *et al.*, 2020). A diferença na composição química leva a diferentes vias de decomposição térmica, variações qualitativas e quantitativas dos componentes da biomassa (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos) influenciam diretamente sua reatividade química e comportamento de combustão (Sher *et al.*, 2020; Garcia-Maraver *et al.*, 2013).

Os gráficos de TGA mostram que a perda de massa inicial ocorreu entre 100 e 250°C, e está associada à evaporação de compostos voláteis, como extrativos voláteis. Após 300°C, a queima de compostos lignocelulósicos se torna mais evidente. A diferença entre as curvas *in natura* e livre de extrativos reflete o papel dos extrativos na estabilidade térmica. O resíduo final, fração acima de 600°C representa os materiais mais resistentes (carbono fixo ou cinzas). Espécies como *D. excelsa* e *Manilkara spp.* possuem perfis com resíduo final semelhante entre os dois tratamentos, enquanto *P. altissimum* mostra uma redução no resíduo quando os extrativos são removidos.

Os gráficos de DTG mostram que houve diferença entre as curvas tanto para as amostras *in natura* como para livre de extrativos, na temperatura máxima de decomposição ($T_{m\acute{a}x}$), e indicam o efeito dos extrativos na reatividade térmica. Espécies como *P. altissimum* têm uma diferença mais marcante, especialmente na região de temperatura próxima a 400 °C. Espécies como *P. pendula* e *Manilkara* spp. mostram uma diminuição na intensidade dos picos ao remover os extrativos, sugerindo menor reatividade na combustão. Para as espécies como *Inga* spp, os picos permanecem próximos, sugerindo menor influência dos extrativos no comportamento térmico.

A espécie *D. excelsa*, em seu comportamento térmico geral, a curva apresenta uma perda de massa inicial até cerca de 250 °C, atribuída à perda de materiais voláteis. A principal decomposição ocorre entre 250 °C e 400 °C, com pouca diferença entre os tratamentos *in natura* e livre de extrativos. A massa residual final acima de 600°C é semelhante para ambas as condições, indicando que os extrativos não impactam significativamente o material remanescente após a queima. Os gráficos DTG mostram que o $T_{m\acute{a}x}$ está próximo de 300°C e é muito semelhante entre os tratamentos. Isso mostra que os extrativos não afetam a temperatura máxima de decomposição. O material *in natura* apresenta um pico um pouco mais intenso do que o livre de extrativos indicando que os extrativos contribuem para uma maior taxa de combustão nessa faixa de temperatura (300 – 400°C).

Os gráficos TGA da espécie *P. altissimum*, mostram que no comportamento térmico há clara diferença entre as curvas *in natura* e livre de extrativos. A remoção de extrativos reduz significativamente a estabilidade térmica do material, especialmente na faixa de 300°C a 400°C. Isso ocorre porque esses compostos atuam como moduladores naturais da degradação, com efeitos distintos conforme sua composição química. Extrativos lipofílicos promovem a fusão inicial da matriz lignocelulósica, facilitando a decomposição térmica precoce, enquanto extrativos fenólicos, formam intermediários estáveis que retardam a degradação.

O material livre de extrativos apresenta um resíduo final menor, indicando que os extrativos contribuem para a formação de carbono fixo ou cinzas. Os gráficos DTG, no pico principal de decomposição ($T_{m\acute{a}x}$), mostram que a remoção de extrativos desloca o $T_{m\acute{a}x}$ para temperatura mais baixas, indicando menor estabilidade térmica. O material livre de extrativos apresenta um pico maior (5,60 dm/dt_{m $\acute{a}x$}), evidenciando que a remoção dos extrativos aumenta a intensidade da combustão nessa faixa.

O comportamento térmico da espécie *P. pendula* mostra que as curvas para as condições *in natura* e livre de extrativos são muito semelhantes, com perda de massa concentrada na faixa de 300°C a 400°C. A quantidade de resíduo final é semelhante, indicando que os extrativos têm

pouco impacto na formação do material remanescente. Para os gráficos de DTG, a $T_{m\acute{a}x}$ é semelhante para ambas as condições, próximo de 300°C. O material livre de extrativos tem picos mais intensos, o que indica que os extrativos contribuem com uma combustão ligeiramente mais ativa.

Para *Inga* spp, nos gráficos de TGA, assim como para outras espécies, a perda de massa ocorre de forma semelhante para ambas as condições. Há uma leve diferença inicial na faixa de 250°C a 300°C, em que os extrativos são eliminados no material *in natura*. As curvas DTG mostram que o $T_{m\acute{a}x}$ ocorre próximo de 300°C para ambas as condições. O material *in natura* apresenta um pico um pouco mais acentuado, mostrando que os extrativos aumentam a taxa de combustão nessa região.

As curvas TGA do material *in natura* e livre de extrativos da espécie *Manilkara* spp. têm comportamento muito semelhante, com perda de massa principal ocorrendo entre 250°C e 400°C, o resíduo final é praticamente o mesmo, indicando que os extrativos não afetam significativamente a quantidade de material residual após a queima. Nos gráficos DTG, o $T_{m\acute{a}x}$ foi de aproximadamente 300°C. A intensidade dos picos no material livre de extrativos é ligeiramente menor, indicando que os extrativos contribuem para uma combustão mais ativa.

A remoção dos extrativos geralmente melhora a estabilidade térmica, conforme indicado pelas mudanças na $T_{m\acute{a}x}$ para temperaturas ligeiramente mais altas (Shebani, van Reenen e Meincken, 2008), como identificado para a maioria das espécies. O deslocamento da decomposição térmica para temperaturas mais altas ocorre devido a menor volatilidade da celulose e da lignina em comparação ao extrativos (Poletto *et al.*, 2012).

Espécies como *P. altissimum* mostraram maior impacto na remoção dos extrativos, *P. pendula* também apresentou diferenças na perda de massa quando os extrativos foram removidos, assim como *Manilkara* spp. tiveram comportamento praticamente inalterado. A quantidade de resíduo final é pouco afetada pela presença ou ausência de extrativos, indicando que eles têm um papel mais significativo na fase inicial e intermediária da combustão. Espécies como *P. altissimum* mostraram maior impacto na remoção dos extrativos, enquanto *P. pendula* e *Manilkara* spp. tiveram comportamento praticamente inalterado.

Polleto (2016), estudou os efeitos da remoção dos extrativos na combustibilidade de madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. Os resultados obtidos pelo estudo indicaram que, após a remoção dos extrativos as madeiras das duas espécies mostraram aumento na estabilidade térmica. Isso significa que a madeira requer mais energia para iniciar a degradação, permitindo melhor desempenho em aplicações onde a estabilidade térmica é crucial. As madeiras sem extrativos apresentaram maior tempo de degradação e menor taxa de degradação,

o estudo relata que madeiras sem extrativos são mais estáveis termicamente, exigindo maior gasto energético para promover sua degradação térmica.

Nesta pesquisa os resultados indicam que a composição química das espécies influencia diretamente sua reatividade térmica e comportamento de combustão, espécies como *D. excelsa* e *Manilkara* spp. demonstram maior estabilidade térmica, enquanto *P. altissimum* depende dos extrativos para manter essa estabilidade. Os extrativos influenciaram a combustão principalmente ao modificar a estabilidade térmica e reatividade das biomassas, ao ser removido, a intensidade dos picos de decomposição foram deslocadas para temperaturas mais altas, indicando maior estabilidade térmica.

Madeiras como *D. excelsa* que possuem altos teores de extrativos, apresentam melhor combustibilidade em baixas temperaturas (150–600 °C). Isso porque esses componentes químicos são altamente voláteis, facilitam a ignição e reduzem as temperaturas de degradação térmica (Janković e Dodevski, 2018). A presença de extrativos podem acelerar a degradação, enquanto sua ausência leva a uma estabilidade prolongada (Özsin, 2024). Já Ross *et al.*, (2012), constataram que amostras de biomassa que não tiveram os extrativos removidos demonstraram o maior grau de degradação térmica, o que indica que a remoção de extrativos não torna a biomassa mais resistente a degradação, mas leva ao aumento da decomposição térmica em temperaturas mais altas.

As curvas TG/DTG da madeira indicaram duas faixas de degradação térmica (Tabela 9). No estágio 1 foi observado perda de massa maior para *P. pendula* (73,06%) para o material livre de extrativos, e a menor perda de massa para *D. excelsa* com 59,35% para o material in natura. A perda de massa no estágio 1 está relacionada com a emissão, ignição e combustão dos materiais voláteis produzidos a partir da degradação térmica da celulose e hemiceluloses, entre 200-400 °C. Essa é a fase em que ocorre a maior perda de massa, pois os carboidratos representam a maior proporção da composição química das madeiras avaliadas (em média 66,53%).

A perda de massa no estágio 2, está relacionado à decomposição da lignina e consequentemente, do carbono fixo resultante da sua degradação térmica (Pereira *et al.*, 2013), que ocorre em uma faixa mais ampla (até 600 °C). As perdas de massa mais significativas foram para *D. excelsa* (38,35%) com maior perda de massa para o material in natura, e está diretamente relacionada ao seu menor teor de carbono fixo após ter seu extrativos removidos (17,61%), que reflete uma proporção mais elevada de material volátil (82,07%). Essa composição favorece a combustão intensa e rápida dos voláteis entre 200–400°C, enquanto a menor quantidade de

carbono fixo resulta em menor resíduo pós-combustão. *P. pendula* 26,27% e 26,72 com a menor perda de massa para o material livre de extrativos e in natura respectivamente.

Tabela 9 – Perda de massa e temperatura dos picos obtidas por TGA, nos estágios da combustão para o material in natura e livre de extrativos para biomassa lenhosa de resíduos amazônicos.

Espécie	Tratamento	Estágio 1		Estágio 2	
		Perda de massa (%)	T _{máx} (°C)	Perda de massa (%)	T _{máx} (°C)
<i>Dinizia excelsa</i>	in natura	59,35	322,4	38,35	463,1
	Livre de extrativos	65,30	321,5	32,67	456,6
<i>Protium cf. altissimum</i>	in natura	66,06	321,0	33,88	445,3
	Livre de extrativos	66,18	344,7	30,82	435,4
<i>Parkia pendula</i>	in natura	72,30	313,6	26,72	424,9
	Livre de extrativos	73,06	316,6	26,27	439,2
<i>Inga spp.</i>	in natura	64,45	314,9	32,60	439,9
	Livre de extrativos	70,22	319,9	26,93	447,5
<i>Manilkara spp.</i>	in natura	68,33	321,4	29,66	452,5
	Livre de extrativos	70,17	321,4	27,79	459,9

Fonte: Do Autor (2025)

Em algumas espécies, a exemplo *P. altissimum* e *Inga spp.*, a remoção dos extrativos aumentou a perda de massa no estágio 1. Para outras como *P. altissimum*, a perda de massa no estágio 2 diminuiu significativamente após a remoção dos extrativos, sugerindo que esses compostos contribuem para a formação de carbono fixo e, conseqüentemente, degradação em temperaturas mais elevadas (>400°C). A remoção dos extrativos causou um leve aumento ou diminuição de T_{máx}, mostrando como os compostos presentes influenciam a estabilidade térmica.

Como exemplo para a variação da temperatura máxima (T_{máx}), temos a *D. excelsa*, que apresentou maior perda de massa no estágio 1 após a remoção dos extrativos, passando de 59,35% para 65,3%, e menor no estágio 2, reduzindo de 38,35% para 32,67%. A temperatura máxima da decomposição no estágio 2 diminuiu de 463,12°C para 456,55°C, isso indica que os extrativos dessa espécie são mais resistentes a degradação térmica, já espécie foi a que encontrado os maiores valores de extrativos totais (16,38% bs), esses compostos podem ampliar o tempo de combustão e, portanto, a perda de massa em temperaturas maiores.

Para o material *in natura*, a espécie que apresentou maior perda de massa no estágio 1 foi *P. pendula* (72,3%) e a menor foi *D. excelsa* (59,35%). No estágio 2, a maior perda de massa

foi observada em *D. excelsa* (38,35%) e a menor em *P. pendula* (26,72%). Para o material livre de extrativos, a maior perda de massa no estágio 1 ocorreu em *P. pendula* (73,06%) e a menor em *D. excelsa* (32,67%). No estágio 2, a maior perda de massa foi registrada para *D. excelsa* (23,67%) e a menor para *P. pendula*.

No estágio 1, a remoção dos extrativos aumentou a perda de massa, com *Inga* spp apresentando maior aumento, de 64,45% para 70,22%. No estágio 2, a madeira de *D. excelsa* sofreu a maior redução após a remoção dos extrativos, passando de 38,35% para 32,67%. Isso sugere que a remoção dos extrativos torna as hemiceluloses mais suscetíveis a degradação no primeiro estágio. A remoção dos extrativos, normalmente degradados em temperaturas elevadas, contribui para a formação de carbono fixo e aumento da perda de massa no segundo estágio da combustão. Portanto, como não há participação desses compostos a perda de massa nesse estágio diminuiu. Sendo mais significativo para a madeira de *D. excelsa*, pois ela possui elevada proporção de extrativos. Nessa etapa, ocorre a degradação térmica dos compostos voláteis, resultante da decomposição da celulose, hemiceluloses e parte da lignina. Conforme relatado por López-González *et al.* (2013), essa fase envolve a liberação de voláteis e sua subsequente ignição, gerando a formação de carbono fixo. Neste estágio inicial, a perda de massa e a intensidade da chama que pode ser produzida dependem da quantidade de voláteis presentes no material (Carneiro *et al.*, 2013).

No segundo estágio, ocorre a decomposição da lignina e a combustão do carbono fixo previamente gerado. De acordo com Brito e Barrichelo (1978), a lignina apresenta maior estabilidade térmica em comparação à celulose e às hemiceluloses. Durante este estágio, a lignina está presente em grande quantidade, uma vez que a maioria dos outros constituintes já foi degradada na fase de desvolatilização.

A perda de massa, de maneira geral, foi consideravelmente menor para o estágio 2 em relação ao estágio 1 da combustão (Tabela 8), pois a madeira possui maior teor de materiais voláteis (Tabela 6) e a combustão do carbono fixo é mais lenta (Tenório e Moya, 2013). Na Tabela 10 estão apresentadas as médias dos parâmetros de combustão das espécies estudadas, para o material in natura e livre de extrativos.

Tabela 10 – Parâmetros da combustão da biomassa lenhosa de espécies amazônicas para o material in natura e livre de extrativos.

Espécie	Tratamento	Tig	Tb	Tmáx	(dm/dt) _{max}	(dm/dt) _{médi}	t _p (min)	t _{ig} (min)	S x 10 ⁷ % ² /(min ² °C ³)	Ci x 10 ⁴ % min ⁻¹ 1/°C ²	Di x 10 ³ (% min ⁻³)
					(% min ⁻¹)	(% min ⁻¹)					
<i>Dinizia excelsa</i>	in natura	250,9 (0,64)	491,0 (5,66)	75,5 (0,71)	4,20 (0,14)	0,82 (0,01)	75,7 (0,40)	62,4 (0,64)	1,1 (0,06)	0,7 (0,02)	0,90 (0,00)
	Livre de extrativos	254,5 (1,80)	501,5 (0,71)	76,0 (0,00)	5,50 (0,00)	0,82 (0,01)	75,6 (0,06)	63,2 (0,34)	1,4 (0,05)	0,85 (0,01)	1,15 (0,07)
<i>Protium cf. altissimum</i>	in natura	247,9 (0,09)	480,0 (9,90)	76,0 (0,00)	5,20 (0,00)	0,85 (0,01)	75,7 (0,05)	62,0 (0,04)	1,5 (0,04)	0,84 (0,00)	1,10 (0,00)
	Livre de extrativos	259,5 (1,34)	386,5 (12,02)	50,0 (1,41)	5,60 (0,28)	0,90 (0,07)	49,9 (1,63)	33,9 (0,16)	2,0 (0,33)	0,83 (0,04)	3,30 (0,00)
<i>Parkia pendula</i>	in natura	246,2 (0,25)	461,0 (0,00)	75,0 (0,00)	7,50 (0,14)	0,83 (0,00)	74,8 (0,07)	61,6 (0,00)	2,2 (0,04)	1,2 (0,02)	1,65 (0,07)
	Livre de extrativos	253,9 (0,29)	468,5 (0,71)	75,5 (0,71)	11,30 (0,14)	0,80 (0,00)	75,6 (0,39)	63,2 (0,21)	3,0 (0,01)	1,8 (0,02)	2,40 (0,00)
<i>Inga spp.</i>	in natura	247,9 (0,24)	469,5 (0,71)	75,0 (0,00)	7,05 (0,07)	0,82 (0,00)	74,9 (0,42)	61,8 (0,26)	2,0 (0,04)	1,1 (0,02)	1,50 (0,00)
	Livre de extrativos	254,4 (0,96)	486,5 (0,71)	75,5 (0,71)	9,60 (0,14)	0,85 (0,01)	75,6 (0,27)	63,2 (0,42)	2,6 (0,08)	1,5 (0,04)	2,00 (0,00)
<i>Manilkara spp.</i>	in natura	248,1 (0,11)	494,5 (6,36)	76,0 (0,00)	5,00 (0,14)	0,86 (0,00)	75,9 (0,20)	62,1 (0,03)	1,4 (0,01)	0,82 (0,02)	1,05 (0,07)
	Livre de extrativos	254,8 (1,48)	499,0 (1,41)	75,5 (0,71)	5,90 (0,14)	0,85 (0,02)	75,6 (0,39)	63,2 (0,55)	1,6 (0,06)	0,91 (0,01)	1,20 (0,00)

Tig: temperatura de ignição; **Tb:** temperatura burnout; **Tmáx:** temperatura máxima do estágio de combustão; **tp:** tempo correspondente a taxa máxima de combustão; **tig:** tempo de ignição; **dm/dt máx:** taxa máxima de combustão; **dm/dt médio:** taxa média de combustão; **S:** índice de combustão; **Ci:** índice de inflamabilidade; **Di:** índice de ignição.

Fonte: Do Autor, (2025)

A temperatura de ignição (T_{ig} °C) indica que o material livre de extrativos de maneira geral, possui valores ligeiramente superiores, demonstrando maior estabilidade térmica inicial. No entanto, para a espécie *P. altissimum* isso não ocorreu, pois, os extrativos provavelmente contribuíram para uma proteção térmica inicial, e com sua remoção o material ficou mais suscetível à ignição, apresentou menor estabilidade térmica inicial, e teve uma degradação mais rápida e intensa. Isso indica que, ao contrário de outras espécies, os extrativos dessa madeira exerciam um papel de protetor térmico em vez de catalisador da ignição. A temperatura burnout (T_b °C), ponto em que a combustão se completa, a madeira in natura tende a apresentar valores de T_b mais baixos que as amostras livres de extrativos, sugerindo que os extrativos podem intensificar a decomposição em temperaturas menores. A $T_{máx}$, temperatura na qual ocorre a máxima perda de massa, os valores diferentes indicam o pico de degradação da biomassa que pode ser influenciado pela composição química da madeira. $Dm/dt_{máx}$ (% min), representa a taxa máxima de perda de massa, mostra a velocidade média de decomposição térmica ao longo do processo de combustão. O tempo necessário para atingir o pico de perda de massa (t_p), os valores distintos indicam que os extrativos alteraram significativamente o tempo até o pico de combustão. O índice de combustibilidade (S), que indica a facilidade com que a madeira é consumida pelo fogo, valores mais altos indicam maior reatividade. O índice $C_i \times 10^4$, indicador de reatividade térmica, mede a relação entre a velocidade de combustão e a temperatura, valores crescentes sugerem maior reatividade ao calor. O índice de ignição (D_i), avalia a intensidade da combustão com base na taxa de perda de massa ao longo do tempo, valores mais altos indicam maior intensidade no processo de combustão, e maior facilidade de ignição.

Para a espécie *D. excelsa* a T_{ig} e T_b aumentaram após a remoção dos extrativos, sugerindo maior estabilidade térmica. Houve pequena variação no índice de combustibilidade (S) e no índice de reatividade (C_i), o que indica que os extrativos possuem efeito limitado na combustibilidade dessa espécie. Já para a espécie *P. altissimum* o maior impacto foi observado no $T_{máx}$, que diminuiu significativamente na amostra livre de extrativos. A combustibilidade (S) aumentou na ausência de extrativos, indicando que a madeira se torna mais reativa após a sua remoção.

Na espécie *P. pendula* houve grande aumento na taxa máxima de degradação térmica e no índice de degradação (D_i) após a remoção dos extrativos, refletindo maior intensidade de combustão. A reatividade (C_i) e a combustibilidade (S) também aumentaram significativamente.

Para *Inga* spp. a ausência de extrativos resultou em um aumento moderado nos índices de combustibilidade e reatividade térmica. A estabilidade térmica aumentou ligeiramente, conforme indicado por valores maiores de T_{ig} e T_b . Para a espécie *Manilkara* spp. foram observadas ligeiras diferenças entre as condições *in natura* e livre de extrativos, com aumentos moderados em $(dm/dt)_{max}$, S e D_i na ausência de extrativos. Os resíduos lenhosos de *Manilkara* spp. apresentaram menor sensibilidade aos extrativos em relação às outras espécies.

De forma geral, as amostras livres de extrativos apresentaram maior reatividade térmica (C_i) e combustibilidade (S) na maioria das espécies, sugerindo que a presença de extrativos contribui para uma combustão mais lenta e menos intensa. No entanto para a espécie *D. excelsa* isso não ocorreu, provavelmente devido ao seu alto teor de extrativos (16,38% bs) que apesar de ser um valor alto espécie pode não possuir substâncias que influenciem significativamente esses índices. *P. altissimum* foi a espécie que mais sofreu alterações com a remoção de extrativos, com uma queda acentuada em $T_{máx}$ e aumento nos índices de combustibilidade e degradação térmica. As espécies com maior estabilidade térmica inicial (valores mais altos de T_{ig}) foram *D. excelsa* e *Manilkara* spp., enquanto as amostras mais reativas foram *P. pendula* e *P. altissimum*.

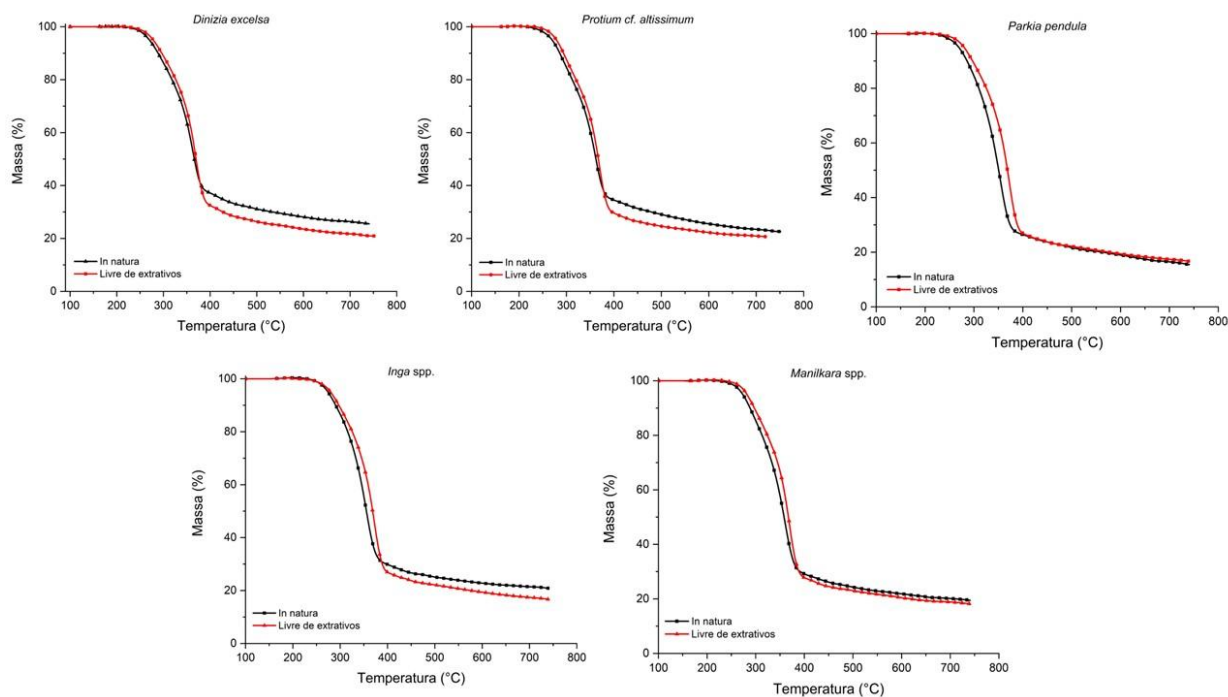
É importante destacar que o índice de combustão (S) reflete a reatividade durante o processo. Em todas as espécies, o valor do índice aumentou após a remoção dos extrativos, indicando que esses compostos atuavam como barreira térmica, retardando o início da reação de combustão. Espécies como *P. pendula*, *P. altissimum* e *Inga* spp., não só mostraram maiores valores desse índice, como também maiores aumentos, mostrando-se mais sensíveis à remoção dos extrativos e, portanto, mais reativas no processo de combustão. Dessa forma, a madeira com um valor mais elevado de S apresenta melhor desempenho no processo de combustão. Além disso, os índices de ignição representam o desempenho durante a ignição e a reatividade da biomassa. Portanto, quanto maior for este índice, melhor será o desempenho da biomassa durante o processo de combustão (Qian *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2014).

5.4.2. Pirólise (atmosfera inerte)

As Figuras 6 e 7 apresentam as curvas de termogravimetria (TGA) e sua derivada para as cinco espécies, realizado no material *in natura* e livre de extrativos. As curvas TGA mostram a perda de massa da biomassa conforme a temperatura aumenta, podendo ser identificadas duas regiões principais: de 200 a 400°C, ocorre a maior perda de massa

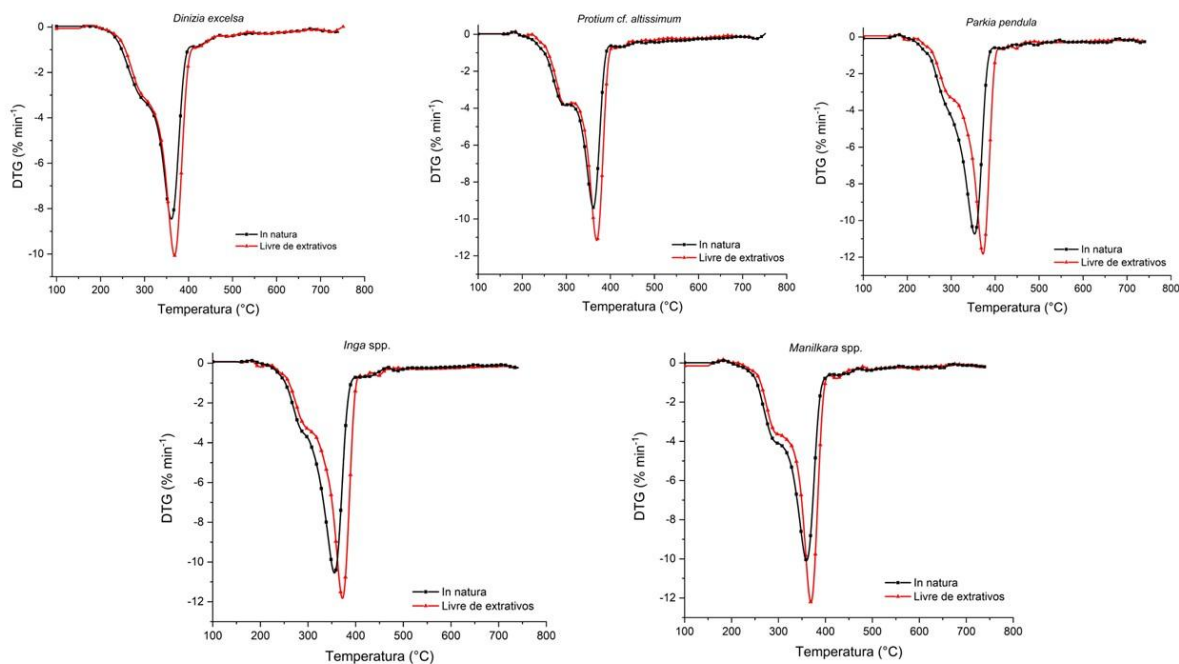
devido a degradação das hemiceluloses e celulose, e de 400°C a 600°C a decomposição da lignina, que ocorre mais lentamente. A ausência de um pico referente a degradação da lignina é devido a decomposição térmica mais difícil e com baixa perda de massa, uma vez que sua decomposição ocorre desde o início da degradação térmica até aproximadamente 900°C (Yang *et al.*, 2007).

Figura 6 – Termogravimetria em atmosfera de nitrogênio de todas as espécies avaliadas, tanto do material in natura como livre de extrativos.



Fonte: Do Autor, (2025)

Figura 7 - Derivada das curvas termogravimétricas de todas as espécies estudadas, do material in natura e do material livre de extrativos.



Fonte: Do Autor, (2025)

Quando comparamos as curvas TGA dos tratamentos *in natura* e livre de extrativos, observa-se que a remoção de extrativos geralmente desloca a curva para temperaturas ligeiramente mais altas, indicando que esses compostos podem catalisar a degradação térmica. Como comprovado por diversas pesquisas (Strezov, Moghataderi e Lucas, 2003; Garcia-Nunez *et al.*, 2008; Real e Tannous, 2020) que a remoção dos extrativos podem, de fato, deslocar a decomposição para temperaturas mais altas, e ocasionar maior resistência a degradação térmica, pois o comportamento da biomassa é influenciado por sua composição química.

Já nas curvas DTG, indicam que os principais picos de decomposição ocorrem em torno de 350°C a 400°C, representando a degradação da celulose, enquanto a lignina se decompõe de forma mais ampla entre 200°C e 600°C. A biomassa *in natura* apresenta picos de degradação mais largos, enquanto a livre de extrativos tem picos mais definidos e ligeiramente deslocados para temperaturas mais altas, sugerindo que os extrativos podem reduzir a estabilidade térmica e facilitar a pirólise.

Durante a análise das curvas TGA em atmosfera inerte, observou-se que a biomassa *in natura* de *D. excelsa* apresentou maior resíduo final (24,87%) em comparação a biomassa livre de extrativos (20,94%). Este resultado indica que os extrativos presentes, cuja concentração é elevada na espécie (16,38% bs), contribuíram para a formação de

estruturas carbonosas resistentes, favorecendo o aumento do rendimento de carvão vegetal. Comprovando os resultados encontrados por Lima *et al.*, (2020b), onde os valores de extrativos superaram o efeito da lignina no balanço de massa da carbonização, nos rendimentos e na qualidade do carvão vegetal proveniente de resíduos da exploração madeireira. Para *P. altissimum*, os valores de perda de massa total foram próximos entre os tratamentos *in natura* e livre de extrativos, porém, a taxa de degradação da biomassa livre de extrativos foi ligeiramente mais rápida, refletida pela redução de temperatura do pico de degradação máximo de aproximadamente 360,9°C para 369,1°C, esse comportamento sugere que a remoção dos extrativos expôs a matriz lignocelulósica, tornando-a mais susceptível à degradação térmica.

No caso da espécie *P. pendula*, as massas residuais ao final da pirólise foram bastante semelhantes entre o material *in natura* (15,47%) e livre de extrativos (16,68%). Esses resultados indicam que os extrativos, de teor relativamente baixo nessa espécie (4,17% bs), tiveram influência limitada sobre a estabilidade térmica da biomassa. Para *Inga spp.*, a diferença entre os resíduos finais foi maior, com o material *in natura* apresentando resíduo de 20,85% e o livre de extrativos 16,68%. A taxa de degradação também variou pouco, o que demonstra que embora a espécie tenha baixo teor de extrativos (2,78% bs), sua remoção exerceu influência moderada sobre o processo térmico.

Para a espécie *Manilkara spp.*, a biomassa *in natura* e livre de extrativos apresentaram resíduos finais semelhantes (19,46% e 18,91%, respectivamente) e curvas TGA quase sobrepostas, indicando que a remoção dos extrativos (7,54%) não impactou significativamente o comportamento térmico. Esse resultado reforça a predominância da matriz lignocelulósica na estabilidade térmica desta espécie.

Para as curvas DTG da espécie *D. excelsa* houve diferença significativa no pico de degradação, indicando que os extrativos aceleram a decomposição térmica. Para *P. altissimum* houve uma pequena variação no pico, mas com um comportamento geral semelhante entre os tratamentos. A espécie *P. pendula* também apresentou diferença mínima entre os tratamentos, sugerindo que os extrativos não afetam significativamente a pirólise da espécie. Na espécie *Inga spp* houve pequena diferença entre os tratamentos, mas a curva do material livre de extrativos apresentou um pico um pouco mais acentuado.

As espécies diferem na quantidade de resíduo deixado no final do processo de pirólise, o que pode impactar seu potencial para produção de biocarvão. As espécies *D.*

excelsa e *P. altissimum* foram as mais afetadas pela remoção dos extrativos, enquanto *P. pendula* e *Manilkara* spp. foram as menos influenciadas.

Estudos indicam que a remoção dos extrativos não altera a estrutura básica da biomassa e resulta apenas em pequenas mudanças no comportamento de perda de massa, sugerindo que a estabilidade térmica não é significativamente afetada pela remoção de extrativos na biomassa (Hu, 2014). Embora os extrativos desempenhem um papel crucial na melhoria da qualidade e do rendimento do bio-óleo, sua remoção pode levar a um processo de pirólise mais simples.

Na Tabela 11 estão demonstrados os dados de perda de massa por faixas de temperatura da análise dos gráficos de TGA e DTG para a biomassa in natura e livre de extrativos.

Tabela 11 – Perda de massa por faixas de temperatura para o material in natura e livre de extrativos para biomassa lenhosa de resíduos amazônicos.

Espécie	Tratamento	Perda de massa (%) para faixas fixas de temperatura					Massa residual (%)	Tonset (°C)	T _{máx} (°C)	dm/dt máx (% min ⁻¹)
		200 - 300°C	300 - 400°C	400 - 500°C	500 - 600°C	600- 750°C				
<i>Dinizia excelsa</i>	in natura	13,82	49,14	6,06	3,01	3,25	24,87	258,8	362,4	9,47
	Livre de extrativos	11,26	56,42	6,12	2,81	2,61	20,94	267,4	369,9	11,29
<i>Protium cf. altissimum</i>	in natura	15,57	50,12	5,44	3,54	2,94	22,61	258,8	360,9	9,46
	Livre de extrativos	12,61	57,99	5,00	2,37	1,86	20,39	274,1	369,1	11,27
<i>Parkia pendula</i>	in natura	15,60	58,02	4,78	2,72	3,51	15,47	271,4	353,0	10,75
	Livre de extrativos	11,04	62,12	4,81	2,74	2,72	16,68	274,4	371,6	11,89
<i>Inga</i> spp.	in natura	13,73	56,8	4,77	2,29	1,95	20,85	268,2	355,3	10,62
	Livre de extrativos	10,98	62,2	4,78	2,75	2,72	16,68	276,8	370,9	11,81
<i>Manilkara</i> spp.	in natura	14,80	56,25	4,87	2,44	2,4	19,46	268,1	360,3	10,13
	Livre de extrativos	11,01	61,18	4,57	2,82	1,51	18,91	278,6	369,4	12,34

Fonte: Do Autor, (2025)

Os resultados de perda de massa durante a pirólise apresentaram padrões distintos de perda de massa, diretamente correlacionado com sua composição química estrutural e extrativos (ver tópico 5.1). Na faixa de 200-300°C as espécies *D. excelsa* e *P. altissimum* tiveram as maiores perdas, condizente com seus altos teores de extrativos (16,38% e 11,30% respectivamente), que se degradam precocemente. Já *Manilkara* spp. (11,01% de extrativos totais) mostrou menor perda, refletindo sua maior estabilidade térmica (75,10% bs de holocelulose).

Na faixa de 300-400°C, *P. pendula* e *Inga* spp. tiveram maiores perdas (58,02% e 56,80% *in natura*) compatíveis com seus elevados teores de hemiceluloses, 27,91% e 27,48% respectivamente. A remoção de extrativos aumentou essas perdas, pois a exposição da matriz celulósica acelerou a decomposição. Na faixa de 400-500°C, espécies com mais lignina como *Inga* spp, tiveram menores perdas (4,77% *in natura*), enquanto *Manilkara* spp. apresentou degradação mais acentuada (4,87%). A remoção de extrativos reduziu ainda mais essas perdas, pois a lignina residual dominou o processo.

As amostras sem extrativos geralmente perdem mais massa na faixa de 300-400°C, pois os extrativos são removidos, deixando mais material estrutural para degradação. A Tonset (temperatura inicial de degradação) é maior nas amostras livre de extrativos, indicando maior estabilidade térmica. A T_{máx} também é maior nas amostras sem extrativos, sugerindo que os extrativos reduzem a temperatura de degradação da biomassa. O material livre de extrativos apresentou menor massa residual, o que pode indicar que os extrativos influenciam a formação de carvão vegetal (fração sólida).

Partindo para as espécies, a *P. pendula* tem uma das maiores perdas de massa na faixa de 300-400°C, indicando a alta degradação da celulose. A *D. excelsa*, tem uma das maiores massas residuais, sugerindo maior formação de carvão. Por outro lado, a *Manilkara* spp apresenta um comportamento térmico mais estável, com uma taxa de decomposição máxima mais alta (10,13% e 12,34% para o material *in natura* e livre de extrativos, respectivamente). A partir de temperaturas próximas de 400 °C, a degradação térmica se tornou menor, devido a degradação da maior parte dos componentes químicos da madeira, celulose e hemiceluloses já terem ocorrido.

A perda de massa da biomassa lignocelulósica ocorre em três estágios principais, com a hemicelulose se decompondo entre 200-300 °C, a lignina entre 170-835 °C e a celulose entre 290-395 °C, indicando comportamentos térmicos distintos desses componentes (Varol, 2023). De acordo com Luengo *et al.*, (1997), entre 290°C e 370°C predomina a degradação da celulose, com quebra das ligações glicosídicas seguidas por uma grande emissão de voláteis, tais como ácido acético, metanol, acetona, CO, H₂, CH₄ e CO₂.

A estabilidade térmica e as taxas de perda de massa variam significativamente entre os diferentes tipos de biomassa, influenciadas por sua composição e estrutura (Kumar, 2020; Nath *et al.*, 2023). Por outro lado, embora o foco esteja frequentemente na perda de massa durante a pirólise, alguns estudos sugerem que a reatividade da biomassa

lignocelulósica durante a combustão pode ser menor, indicando uma interação complexa durante degradação térmica (Chen, 2022).

Os extrativos influenciaram significativamente a reatividade térmica das biomassas, mas seu impacto varia entre as espécies. A espécie *D. excelsa* destacou-se pela caracterização química e energética, com altos teores de extrativos, baixo teor de cinzas e boas propriedades para a pirólise. Os extrativos diminuíram a estabilidade térmica de *P. altissimum* e tiveram pouco efeito nas espécies *P. pendula* e *Manilkara* spp., e retardaram levemente a degradação em *Inga* spp., sem grande impacto na pirólise.

6. Conclusão

A composição química das biomassas estudadas apresentou expressiva variação. Isso demonstra que a escolha da matéria-prima deve considerar aspectos como teor de holocelulose, lignina, extrativos e cinzas. Espécies como *Manilkara* spp., com elevado teor de holocelulose, podem apresentar vantagens para processos que demandam maior rendimento em carbono fixo, enquanto *D. excelsa*, com menor teor de holocelulose e maior presença de extrativos, revelou-se uma biomassa de alto desempenho energético, especialmente pelo seu maior poder calorífico.

A análise do teor de lignina destacou a influência desse componente na estabilidade térmica, sendo mais representativo em *Inga* spp. e *P. pendula*. Os extrativos por sua vez, mostraram-se fatores determinantes no comportamento térmico, sendo mais abundante em *D. excelsa*, o que contribui diretamente para o aumento do poder calorífico e do carbono fixo. Essa relação evidencia que a alta concentração de extrativos pode ser estrategicamente aproveitada em contextos energéticos, desde que bem caracterizada.

A variabilidade nos teores de material volátil e carbono fixo evidenciou a influência da remoção de extrativos nas propriedades de combustão da biomassa. As menores concentrações de voláteis observadas em *D. excelsa* corroboram seu maior teor de carbono fixo e seu desempenho superior nos processos de combustão e pirólise. Os extrativos influenciam significativamente a reatividade térmica das biomassas, mas seu impacto varia entre as espécies. Eles aumentaram a taxa da combustão nas fases iniciais, tornando a biomassa mais reativa.

A *D. excelsa* destacou-se pela caracterização química e energética, com altos teores de extrativos, baixo teor de cinzas e boas propriedades para pirólise.

Os extrativos diminuíram a estabilidade térmica em *D. excelsa* e *P. altissimum*, tiveram pouco efeito em *P. pendula* e *Manilkara* spp., e retardaram levemente a degradação em *Inga* spp., sem grande impacto na pirólise.

REFERÊNCIAS

ABOYTES-OJEDA, M.; CASTILLO-VILLAR, K. K.; EKSIUGLU, S. D. Modeling and optimization of biomass quality variability for decision support systems in biomass supply chains. *Annals of Operations Research*, v. 314, n. 2, p. 319–346, 4 jul. 2022.

ADAM, R. *et al.* Systematic homogenization of heterogenous biomass batches – Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. **Biomass and Bioenergy**, v. 173, p. 106808, jun. 2023.

ALAEJOS, J. *et al.* Biomass Production and Quality of Twelve Fast-Growing Tree Taxa in Short Rotation under Mediterranean Climate. **Forests**, v. 14, n. 6, p. 1156, 4 jun. 2023.

ALVES, E. P. R. *et al.* Renewable Energy Potential and CO2 Performance of Main Biomasses Used in Brazil. **Energies**, v. 16, n. 9, 2023a.

ALVES, I. R. F. S. *et al.* Waste characterization in Brazil. In: Waste Management and Resource Recycling in the Developing World. **Elsevier**, p. 85–98. 2023b.

ALVES, J. L. F. *et al.* Insights into the bioenergy potential of jackfruit wastes considering their physicochemical properties, bioenergy indicators, combustion behaviors, and emission characteristics. **Renew Energy** 155:1328–1338, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.025>

ARAÚJO, A. C. C.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; DE CARVALHO BRAGA, P. P.; DE LIMA, R. V.; PROTÁSIO, T. D. P. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.

ARAÚJO, P. V. A. *et al.* Optimization of polyphenol extraction with potential application as natural food preservatives from brazilian amazonian species *Dalbergia monetaria* and *Croton cajucara*. **Processes**, v. 11, n. 3, p. 669, 22 fev. 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.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14577**: Pasta celulósica e madeira - Determinação do material solúvel em água. Rio de Janeiro: 2017.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: 2010.

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

ASTM D1762 – 84. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania. 2021.

ASTM E711 – 87. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania. 2004.

B. KLASNJA.; S, KOPITOVIC.; S, ORLOVIC. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood **Biomass Bioenergy**, 23, pp. 427-432, 2002. [10.1016/S0961-9534\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00069-7)

BILGEN, S.; SARIKAYA, İ. Utilization of forestry and agricultural wastes. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 38, n. 23, p. 3484–3490, 24 dez. 2016.

BORÉL, L. D. M. S. **Estudo de aplicação da pirólise rápida em leito de jorro para valorização de resíduos agroindustriais**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 14 dez. 2018.

BRAGHIROLI, F. L.; PASSARINI, L. Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. **Current Forestry Reports**, v. 6, n. 2, p. 172–183, 20 jun. 2020.

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

BRANDÃO, P. C.; DE SOUZA, A. L.; ROUSSET, P.; SIMAS, F. N. B.; DE MENDONÇA, B. A. F. Forest biomass as a viable pathway for sustainable energy supply in isolated villages of Amazonia. **Environmental development**, v. 37, p. 100609, 2021. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221146452030141X>

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Instrução Normativa nº 8, de 25 de março de 2022**. Estabelece os procedimentos para a autorização de exportação de produtos e subprodutos madeireiros de espécies nativas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 58, p. 80, 28 mar. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-8-de-25-de-marco-de-2022-390451037>.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 146, n. 250, p. 3, 30 dez. 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm.

BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 154, n. 248, p. 1, 27 dez. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm

BRASIL; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2006, 18 de dezembro). **Instrução normativa MMA nº 5, de 11 de novembro de 2006**. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de

Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília.

BRITO, E. O. Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. **Revista da Madeira** 4, 34–39, 1995.

BROWNING, B. L. **The Chemistry of Wood**. Interscience Publishers. New York, 1963.

BRUN, E. J.; BERSCH, A. P.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D.A.; BARBA, Y. R.; DORINI JUNIOR J.R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Floresta**, v. 48, p, 87-92, 2018. 10.5380/rf.v48 i1.51673

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A.M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 32, n. 70. P. 129-137, abr/jun. 2012.

BUSTAMANTE-GARCÍA, V. *et al.* Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, v. 42, n. 1, p. 169–174, mar. 2013.

C. SHENG.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data *Biomass Bioenergy*, 28 (2005), pp. 499-507, [10.1016/j.biombioe.2004.11.008](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008)

C. ZHOU.; G. LIU.; X. WANG.; C. QI.; Y. HU. Combustion characteristics and arsenic retention during co-combustion of agricultural biomass and bituminous coal. **Bioresour. Technol.**, 214 (2016), pp. 218-224, [10.1016/j.biortech.2016.04.104](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.104)

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Brazilian Journal of Wood Science**, Pelotas, v. 8, n. 3, p. 127-135, 2017.

CHEN, K. Thermolysis and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG/DTA). Proceedings of the 16th International Conference on Environmental Science and Technology. 2022. <https://doi.org/10.30955/gnc2019.00718>

CHEN, X.; ZOU, Z.; LIU, Q.; LIU, Z.; LUO, W.; XIE, G.; YAN, Y. Two-stage pyrolysis for effective tobacco stem utilization and tar reduction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106468>

COSTA, J. S. *et al.* Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 1, p. 321–341, 2023.

DEMIN, A.; PAVLOV, G.; KHASIYATULLOV, M. **Thermo-chemical analysis and modeling of combustion of waste pyrolysis gaseous products**. E3S Web of Conferences, v. 247, p. 01056, 5 abr. 2021.

DUAN, X.; LU, S.; FU, Y.; *et al.* Ash removal from inferior coal via ammonium fluoride roasting and simultaneous yield of white carbon black. **International Journal**

of **Mining Science and Technology**, v. 34, n. 2, p 261-279, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2024.01.005>

DULYS-NUSBAUM, E.; KLAMMER, S. S. H.; SWITON, S. M. How willing are different types of landowner to supply hardwood timber residues for bioenergy? **Biomass Bioenergy**, 122 (3), 45–52. 2019.

DURAK, H. Comprehensive Assessment of Thermochemical Processes for Sustainable Waste Management and Resource Recovery. **Processes**, v. 11, n. 7, p. 2092, 13 jul. 2023.

FADEYIBI, A. *et al.* Development and evaluation of biomass-based alternative charcoal. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 51, n. 3, p. 161–168, 29 set. 2020.

FERREIRA, G.; BRITO, T. M.; DA SILVA, J. G. M. *et al.* Wood Waste Pellets as an Alternative for Energy Generation in the Amazon Region. **Bioenerg. Res.** 16, 472–483 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10446-w>

FERREIRA-LEITAO, V. *et al.* Biomass residues in Brazil: Availability and potential uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 65–76, mar. 2010.

FERREIRA-LEITAO, V.; GOTTSCHALK, L. M. F.; FERRARA, M. A.; NEPOMUCENO, A. L.; MOLINARI, H. B. C.; BON, E. P. S. Biomass residues in Brazil: Availability and potential uses. **Waste and Biomass Valorization**, 1(1), 65–76. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9008-8>. 2010.

FORTALEZA, A. P. *et al.* Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436–1451, 30 set. 2019.

GAO, C.; CUI, X.; MATSUMURA, J. Multidimensional Exploration of Wood Extractives: A Review of Compositional Analysis, Decay Resistance, Light Stability, and Staining Applications. **Forests**, v. 15, n. 10, p. 1782, 10 out. 2024.

GARCIA-MARAVÉ, A.; SALVACHÚA, D.; MARTÍNEZ, M. J.; DIAZ, L. F.; ZAMORANO, M. Analysis of the relation between the cellulose, hemicellulose and lignin content and the thermal behavior of residual biomass from olive trees. **Waste Manag** 33:2245–2249. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.010>

GARCIA-NUNEZ, J. A.; GARCIA-PEREZ, M.; DAS, K. C. Determination of kinetic parameters of thermal degradation of palm oil mill by-products using thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry. **Transactions of the ASABE**, 51(2), 547–557. 2008. <https://doi.org/10.13031/2013.24354>

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

GOMES, J. *et al.* Clean Forest—Project Concept and Early Results. **Energies**, v. 15, n. 24, p. 9294, 7 dez. 2022.

GUIMARÃES, H. R.; TANNOUS, K. Influence of torrefaction on the pyrolysis of energy cane. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 139(3), 2221–2233. 2020. <https://doi.org/10.1007/S10973-019-08584-Z>

GUO, X.-J.; WANG, S. R.; WANG, K. G.; QIAN, L.; ZHONG-YANG, L. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. In **J Fuel Chem Technol.** Vol. 38, Issue 1. 2010. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(10\)60019-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(10)60019-9)

HEIM, L. *et al.* Variation analyses of extractive contents by NIR-spectroscopy bring out the differences between agroforestry and forestry walnut (*Juglans regia* × *nigra*) trees. **Holzforschung**, v. 76, n. 9, p. 781–790, 27 set. 2022.

HU, Y. Effect of the extractives removal on biomass pyrolysis. **Renewable Energy Resources.** 2014.

HYTONEN, J.; NURMI, J. Heating value and ash content of intensively managed stands. **Wood Res.**, 60, pp. 71-82, 2015.

IBAMA. **Instrução Normativa 15, de 06 de dezembro de 2011.** Estabelece os procedimentos para a exportação de produtos e subprodutos madeireiros de espécies nativas oriundos de florestas naturais ou plantadas.

IBGE: **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura.** Instituto Brasileiro de Geologia e Estatística, Rio de Janeiro, 2009.

INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 5, 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 nativas exploradas ou não e suas formas de sucessão no Estado do Pará, e dá outras providências. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Governo do Estado do Pará.

ISMAIL, T. M.; RAMZY, K. Experimental study on char production from the pyrolysis of biomass. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1–17, 2021. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01641-4>

JANKOVIĆ, B.; DODEVSKI, V. Os desempenhos de combustão e a cinética de degradação termo-oxidativa de sementes de plátano (PTS) (*Platanus orientalis* L.). **Energia** 154:308–318. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.149>

KANG, Y. *et al.* Analysis of Rational Proportion of Raw Materials Based on Biomass. **Crystals**, v. 11, n. 11, p. 1410, 18 nov. 2021.

KARASEVA, V.; BERGERET, A.; LACOSTE, C.; FERRY, L.; FULCRAND, H. Influence of extraction conditions on chemical composition and thermal properties of chestnut wood extracts as tannin feedstock, **Acs Sustain. Chem. Eng.** 7, 17047–17054, 2019.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, Ellis Horwood. Chichester: E. Horwood, 1987. 1130 p.

KUMAR, V. Thermogravimetric Studies on Non-isothermal Oxidative Pyrolysis of Lignocellulosic Materials. **Oriental journal of chemistry**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 747–755, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.13005/OJC/360421>

LAOUGÉ, Z. B.; MERDUN, H. Pyrolysis and combustion kinetics of *Sida cordifolia* L. using thermogravimetric analysis. *Bioresour Technol* 299:122602. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122602>

LEE, K. *et al.* Composition-Preserving Extraction and Characterization of Biomass Extrinsic and Intrinsic Inorganic Compounds. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1599–1610, 27 jan. 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06429>.

Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo código florestal brasileiro. [2] BRASIL. Lei nº 20.922, de 16 de outubro de 2013.

LEITE, A. S. *et al.* Impact of thermal treatment on the properties of assacú (*Hura crepitans* L.) and murici (*Byrsonima crispera* A.Juss.) Amazon woods. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 54, 5 ago. 2024.

LIMA, M. D. R. *et al.* Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, nov. 2020b.

LIMA, M. D. R. *et al.* Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, set. 2020a.

LIMA, M. D. R. *et al.* Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. **Renewable Energy**, v. 211, p. 772–788, jul. 2023.

LIU, X.; CHEN, M.; YU, D (2013) Oxygen enriched co-combustion characteristics of herbaceous biomass and bituminous coal. **Thermochim Acta** 569:17–24, 2013.

LUENGO, C. A.; FELFFI, F. E. F.; BEZZON, G. Pirólise e Torrefação de Biomassa. In: Cortez, L. A. B.; Lora, E. S. (Coord.). **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA, EFEI, cap. 10, 1997.

LUNNAN, A. *et al.* Policy And Economic Aspects Of Forest Energy Utilisation. In: [s.l: s.n.]. p. 197–234.

MAKSYMOW, M. V. *et al.* Automatic Control for the Slow Pyrolysis of Organic Materials with Variable Composition. In: **Advanced Control Systems**. New York: River Publishers, 2022. p. 397–434.

MANI, D.; SHUKLA, S. R. Rapid estimation of wood density and total extractives of two important *Dalbergia* species using near-infrared (NIR) spectroscopy and multivariate analysis. **Wood Material Science and Engineering**, p. 1–16, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2394609>

MARCIN, BIELECKI.; VALENTINA, Z. Analysis of Interactions Occurring during the Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. **Molecules**, 28(2):506-506. doi: 10.3390/molecules28020506. 2022.

MARSELLE, S. R. R. *et al.* Qualidade do carvão vegetal produzido em forno caieira no município de Oeiras do Pará. Democratização do conhecimento e valorização profissional: caminhos para o desenvolvimento tecnológico e social. Anais...Instituto Internacional Desenvolvendo Vocações, 2019.

MEDEIROS, D. T. *et al.* Caracterização da madeira de espécies da Amazônia. **Madera y bosques**, v. 27, n. 2, p. e2722209, 2021.

MENUCELLI, J. R.; AMORIM, E. P.; FREITAS, M. L. M. *et al.* Potential of *Hevea brasiliensis* Clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* Wood as Raw Materials for Bioenergy Based on Higher Heating Value. **Bioenerg. Res.** **12**, 992–999 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10041-6>

MESQUITA, J. G. *et al.* Wood waste pellets from sustainable forest management in the Amazon as an energy source. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e4769, 6 jun. 2024.

MESQUITA, J. G.; ANDRADE, J. K. B. de; MUSTEFAGA, E. C.; RIBASKI, N. G.; PEREIRA, A. K. S.; LIMA, M. D. R.; PROTÁSIO, T. de P.; HILLIG, E. Wood waste pellets from sustainable forest management in the Amazon as an energy source. **Caderno Pedagógico** v. 21, n. 6, p. e4769, 2024. doi: 10.54033/cadpedv21n6-049.

MIAN, I.; LI, X.; DACRES, O. D.; WANG, J.; WEI, B.; JIAN, Y.; ZHONG, M.; LIU, J.; MA, F.; RAHMAN, N. Combustion kinetics and mechanism of biomass pellet. *Energy* 205:117909. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117909>

MILOVANOVIĆ, Zdravko; JANIČIĆ MILOVANOVIĆ, Valentina. Methods of energy production from biomass. [*S. l.*], 2023. doi: 10.7251/eoru2306459m.

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G. KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Exp Thermal Fluid Sci** 47:232–240, 2013.

MORAIS, F. R. *et al.* Sustainable logging management in the brazilian amazon forest: local responses to global challenges. **Journal on Innovation and Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 98–108, 16 ago. 2019. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/risus/article/download/44478/29555>.

MOULIN, J. C. *et al.* Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in amazon rainforest. **CERNE**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 209-218, 2017. DOI: 10.1590/01047760201723022216

N'GUESSAN, J. L. L. *et al.* Wood Extractives: Main Families, Functional Properties, Fields of Application and Interest of Wood Waste. **Forest Products Journal**, v. 73, n. 3, p. 194–208, maio 2023.

NASCIMENTO, C. S. **Propriedades tecnológicas de espécies florestais de pequeno diâmetro manejadas na Amazônia**. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais – INPA. Manaus, 2022.

NATH, B. *et al.* Thermal Decomposition of Wheat Straw Pellets in a Nitrogen Environment: Characterization Using Thermogravimetric Analyzer. 1 jan. 2024.

- NAVARRETE, C. G.; GALIONE, P.; CURTO-RISSO, P. Two-Stage Global Biomass Pyrolysis Model for Combustion Applications: Predicting Product Composition with a Focus on Kinetics, Energy, and Mass Balances Consistency. **Energies**, [s. l.], v. 17, n. 19, p. 4982, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17194982>
- NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2003. 199 p.
- NUMAZAWA C. T. D.; NUMAZAWA S.; PACCA S.; JOHN V. M. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resour Conserv Recycl** 2017; 122:280-5. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>.
- NUMAZAWA, C. T. D.; KRASOVSKIY, A.; KRAXNER, F.; PIETSCH, S. A. Logging residues for charcoal production through forest management in the Brazilian Amazon: economic gains and forest regrowth effects. **Environmental Research Letters**, 15(11), 114029, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb495>
- NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass in the generation of electricity in Portugal: a review. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 71, pp. 373-378, 2017. [10.1016/j.rser.2016.12.067](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.067)
- ONG, H. C.; CHEN, W. H.; FAROOQ, A.; GAN, Y. Y.; LEE, K. T.; ASHOKKUMAR, V. Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, p. 109266, 2019.
- ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. **Fuel**, London, v.78, p.349-358, 1999.
- ÖZSIN, G. An Investigation on the Thermal Degradation Kinetics of Wood-Polymer Composites Used in Interior Automobile Panels via Non-Isothermal Thermogravimetry. **International Journal of Automotive Science and Technology**. 2024. <https://doi.org/10.30939/ijastech.1445222>
- PANG, Y. X. *et al.* The influence of lignocellulose on biomass pyrolysis product distribution and economics via steady state process simulation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 158, set., 2021.
- PEDRAZZI, C.; DICK, G.; COLDOBELA, R.; GENTIL, M.; GIESBRECHT, B. M.; ROSA, R. C. **Química da madeira**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, 2019.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal Properties. **BioResources**, Raleigh v. 8, n. 3, 2013.
- PÉREZ ARÉVALO, J. J.; VELÁZQUEZ MARTÍ, B. Characterization of teak pruning waste as an energy resource. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 94, n. 1, p. 241–250, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-019-00387-3>.

POLETTI, M. Effect of extractive content on the thermal stability of two wood species from Brazil. *Maderas Cienc. Tecnol.*, 18 pp. 435-442, 2016, [10.4067/S0718-221X2016005000039](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000039)

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M. DE C.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, 109, 148–153. 2012. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.11.122>

PRABIR, B.; PRIYANKA, K. **Pyrolysis**. 171-205. doi: 10.1016/b978-0-443-13784-6.00010-x. 2023.

PROTÁSIO, T.P. *et al.* Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, n. 5, p. 4491–4508, 31 maio 2021.

PUTZ, F. E.; ZUIDEMA, P. A.; PINARD, M. A.; BOOT, R. G. A.; SAYER, J. A.; SHEIL, D.; SIST, P. E.; VANCLAY, J. K. Improved tropical forest management for carbon retention. *PLoS Biol.* 6 e166, 2008

PYSTIN, V.; SHERSTOBITOV, D.; MINNIGULLOVA, A. Management of Heterogeneous Waste Treatment Processes. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Anais...IEEE, set. 2019.

QIAN, W.; XIE, Q.; HUANG, Y.; DANG, J. S. K.; YANG, Q.; WANG, J. Combustion characteristics of semicokes derived from pyrolysis of low rank bituminous coal. *Int J Min Sci Technol* 22:645–650, 2012.

REIS, L. A. M. A. **Valorização energética de resíduos caso de estudo: pneus usados e resíduos têxteis industriais**. Dissertação - Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2016.

RODIONOVA, M. V.; BOZIEVA, A. M.; ZHARMUKHAMEDOV, S. K.; LEONG, Y. K.; LAN, J. C. W.; VEZIROGLU, A.; VEZIROGLU, T. N.; TOMO, T.; CHANG, A. S. I. A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 3, p. 1481-1498, 2022.

ROSS, K.; LEUNG, A.; GODFREY, D.; MAZZA, G. Evaluation of Thermal Decomposition and Antioxidant Activity of Crop Residues and Ionic Liquid Extracted Lignin. *World Applied Sciences Journal*, 16(2), 160–178, 2012. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123059067>

S. WAN.; N, ZHENG.; ZHANG, J.; WANG, J. Role of neutral extractives and inherent active minerals in pyrolysis of agricultural crop residues and bio-oil formations, *Biomass and Bioenergy* 122,53–62, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.010>.

SÁ, I. A. *et al.* Evaluating the quality of wood waste pellets and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon. *Renewable Energy*, v. 231, p. 120929, set. 2024.

SAHU S. G.; SARKAR. P.; CHAKRABORTY, N.; ADAK, A. K. Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars. **Fuel Process Technol** 91:369–378, 2010.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species, **Holzforchung** 61 (2007) 469–477, <https://doi.org/10.1515/HF.2007.084>.

SANTOS, P. L.; LIMA, M. D. R.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; SILVEIRA. E. A.; CANDELIER, K.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Exploring the effects of slow pyrolysis temperature and species on the quality of charcoal from Amazonian woody wastes. **Renewable Energy**, p. 122257–122257. 2025.

SANTOS, R. C. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

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

SANTOS, R. C. DOS; CARNEIRO, A. DE C. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C. N.; CASTRO, A. F. N. M. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no Estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, 23(2), 491–502. 2013. <https://doi.org/10.5902/198050989293>

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SARTO, C.; SANSIGOLO, C. A. Cinética da remoção dos extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante polpação Kraft. **Acta Scientiarum**. Technology, 32(3), 227-235. 2010. doi: 10.4025/actascitechnol.v32i3.4237

SASAKI, N.; ASNER, G. P.; PAN, Y.; KNORR, W.; DURST, P. B.; MA, H. O.; ABE I.; LOWE, A. J.; KOH, L. P.; PUTZ, F. E. O manejo sustentável de florestas tropicais pode reduzir as emissões de carbono e estabilizar a produção de madeira **Front. Environ. Sci.** 4 50, 2016.

SFB – Serviço Florestal Brasileiro. **Concessão Florestal**. 23 de setembro d 2019. Brasília – DF.

SFB e Imazon. A Atividade Madeireira na Amazônia Brasileira: Produção, Receita e Mercados. SFB – Serviço Florestal Brasileiro, Imazon - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, Belém, 2010.

SHEBANI, A. N.; VAN REENEN, A. J.; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochimica Acta**, 471(1), 43–50, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.TCA.2008.02.020>

- SHER, F.; IQBAL, S. Z.; LIU, H.; IMRAN, M.; SNAPE, C. E. Thermal and kinetic analysis of diverse biomass fuels under different reaction environment: a way forward to renewable energy sources. **Energy Convers Manag** 203:112266. 2020 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112266>
- SHESHMANI, S.; ASHORI, A.; FARHANI, F. Effect of extractives on the performance properties of wood flour-polypropylene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 123, n. 3, p. 1563–1567, 5 fev. 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.34745>.
- SIMÕES, C. L. *et al.* Environmental Analysis of the Valorization of Woody Biomass Residues: A Comparative Study with Vine Pruning Leftovers in Portugal. **Sustainability**, v. 15, n. 20, p. 14950, 17 out. 2023.
- SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the Eastern Amazon. **For. Ecol. Manag.** 243 199–209. 2007.
- 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.
- SOSA F. E. I. *et al.* Progress and potentialities in wood extractives-based materials for active food packaging applications. **Food Bioscience**, v. 60, p. 104489, ago. 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212429224009192>.
- STOLARSKI, M. J. *et al.* Changes in Commercial Dendromass Properties Depending on Type and Acquisition Time. **Energies**, v. 16, n. 24, p. 7973, 8 dez. 2023.
- STREZOV, V.; MOGHTADERI, B.; LUCAS, J. Thermal study of decomposition of selected biomass samples. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 72(3), 1041–1048. 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1025003306775>
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI. Acetone extractives of wood and pulp. (T 280 pm-99). 1999a.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI. Water solubility of wood and pulp (T 207 cm-99). 1999b.
- TENORIO, C.; MOYA, R. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 563, p. 12- 21, 2013.
- THAMMASOUK, K.; TANDJO, D.; PENNER, M. H. Influence of extractives on the analysis of herbaceous biomass, **J. Agric. Food Chem.** 45, 437–443, 1997.
- THIFFAULT, E.; BÉCHARD, A.; PARÉ, D.; ALLEN, D. Recovery rate of harvest residues for bioenergy in boreal and temperate forests: A review. **Wires Energy and Environment**. 4, 429–451. 2015.
- TISI, Y. S. A. B.; MATOS, F. A.; CARNEIRO, M. L. N. M. Development of waste-to-energy through integrated sustainable waste management: the case of ABREN WtERT Brazil towards changing status quo in Brazil. **Waste Disposal & Sustainable Energy**, v. 5, n. 3, p. 295–308, 9 set. 2023.

TRUGILHO, P. F.; AKIRA, F. M.; TARCÍSIO, J. L.; PEREIRA, D. C. Determinação do teor de taninos na casca de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, 9(2), 246-254, 2003.

TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P.; ARANTES, M. D. C.; MELO, I. C. N. A.; ASSIS, C. O. **Combustão e carbonização da biomassa lignocelulósica**. In: Engenharia madeireira: pesquisa e produção. GONÇALVES, F. G., CARLOS, R.; LELIS, C.; ANDRADE, W. S. P. A. Seropédica, RJ: ED. da UFRRJ, 2017.

VAROL, E. A. TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin. **Energies**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 3674, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16093674>

VERISSIMO, A.: Pólos Madeireiros do Estado do Pará. Imazon, Belém. 2002.

VERKASALO, E. *et al.* Extractives of Tree Biomass of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) for Biorefining in Four Climatic Regions in Finland—Lipophilic Compounds, Stilbenes, and Lignans. **Forests**, v. 13, n. 5, p. 779, 18 maio 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/5/779>.

VILAS BOAS, M. *et al.* Solid Biofuel from the Amazon: A Circular Economy Approach to Briquette Production from Wood Waste. **Forests**, v. 15, n. 8, p. 1328, 31 jul. 2024.

WANG, C.; LIU, Y.; ZHANG, X.; CHE, D. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in northwestern China. **Energy Fuel** 25:3634–3645, 2011.

WANG, C.; ZHANG, X.; LIU, Y.; CHE, D. Pyrolysis and combustion characteristics of coals in oxyfuel combustion. **Appl Energy** 97:264–273, 2012.

WANG, Q. *et al.* Effect of heating rate on the secondary reaction in low-rank coals pyrolysis with the real-time evolution analysis of in-situ tar. **Energy**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131183>

WANG, S.; DAI, G.; YANG, H.; LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: a state-of-the-art review. **Prog Energy Combust Sci** 62:33–86. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.05.004>

WEST, T. A. P.; VIDAL, E.; PUTZ, F. E. Recuperação de biomassa florestal após exploração madeireira convencional e de impacto reduzido na Amazônia brasileira. **For. Ecol. Manag.** 314 59–63, 2014

XIANG-GUO, L.; BAO-GUO, M.; LI, X.; ZHEN-WU, H.; XIN-GANG, W. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. **Thermochim Acta** 441:79–83, 2006.

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.

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

YUSUF, A. A.; INAMBAO, F. L. Characterization of Ugandan biomass wastes as the potential candidates towards bioenergy production, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, vol. 117(C), 2020.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Extractives and energetic properties of wood and charcoal. **Revista Arvore**, v. 38, n. 2, p. 369–374, 1 abr. 2014.

ZHANG, C. *et al.* Pyrolysis of herb waste: Effects of extraction pretreatment on characteristics of bio-oil and biochar. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105801, dez. 2020.

ZHANG, K. A Review of Biomass Energy: Comparison of Utilization Methods and Future Prospects. **E3S web of conferences**, v. 606, p. 05007, 2025. EDP Sciences.

ZOLOTOVSKA, O. *et al.* The role of volatile components in the process of thermal destruction and ignition of the sunflower husk biomass. Inmatch **Agricultural Engineering**, p. 331–339, 30 abr. 2022.

ZOU, H.; EVRENDILEK, F.; LIU, J.; BUYUKADA, M. Combustion behaviors of pileus and stipe parts of *Lentinus edodes* using thermogravimetric-mass spectrometry and Fourier transform infrared spectroscopy analyses: thermal conversion, kinetic, thermodynamic, gas emission and optimization analyses. **Bioresour Technol** 288:121481. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121481>