



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

MICHAEL DOUGLAS ROQUE LIMA

**A SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL
PARA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO BIOENERGÉTICA NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

**BELÉM
2020**

MICHAEL DOUGLAS ROQUE LIMA

**A SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL
PARA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO BIOENERGÉTICA NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, área de concentração Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio.

Coorientador 1: Prof. Dr. Sueo Numazawa.

Coorientador 2: Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

**BELÉM
2020**

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

L732s Lima, Michael Douglas Roque
A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na
Amazônia Brasileira / Michael Douglas Roque Lima. - 2020.
205 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio.

Coorientador: Prof. Dr. Suelo Numazawa.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho.

1. Manejo Florestal. 2. Madeiras residuais. 3. Combustão. 4. Carbonização. 5. Extrativos totais. I.
Protásio, Thiago de Paula, *orient.* II. Título

CDD - 634.92

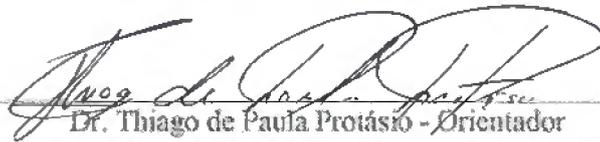
MICHAEL DOUGLAS ROQUE LIMA

**A SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL
PARA OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO BIOENERGÉTICA NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, área de concentração Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em 07 de Janeiro de 2020

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Thiago de Paula Protásio - Orientador
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



Dra. Lina Bufalino - 1º Examinadora
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



Dr. João Rodrigo Coimbra Nobre - 2º Examinador
Universidade do Estado do Pará - UEPA



Dr. Manoel Sebastião Pereira de Carvalho - 3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

AGRADECIMENTOS

“A Deus pela vida e por ter proporcionado condições para a continuidade da minha carreira acadêmica.”

“À Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade de realizar esse curso e ampliar os horizontes com todo conhecimento até aqui adquirido.”

“À CAPES pelos anos de bolsa concedidos.”

“Ao Banco da Amazônia pelo financiamento da pesquisa (Contrato 2018/193).”

“À empresa Cikel pelo suporte operacional na carvoaria.”

“À Embrapa Amazônia Oriental pelas identificações das espécies estudadas.”

“Ao professor Paulo Fernando Trugilho, também coorientador dessa dissertação, que disponibilizou a infraestrutura do laboratório de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras para a realização de análises”.

“Ao meu orientador, professor Dr. Thiago de Paula Protásio pelas ricas orientações durante o período do mestrado, por ter acreditado no meu potencial e apoiar em todas as atividades dessa pesquisa.”

“Ao meu coorientador Suelo Numazawa pelas orientações importantes ao delineamento do experimento na carvoaria”.

“Aos alunos da graduação de Engenharia Florestal em Parauapebas, Evelyn Patrício, Lanna Santos, Rita Silva, Mirian Medeiros, Eidy da Silva, Eliana Martins, Romel Dias e Elvis Santos, que ajudaram bastante com as análises laboratoriais e carbonizações.”

“Aos meus pais, Marly Roque Lopes e Carlito Costa Lima, pelo apoio que prestaram durante toda minha vida.”

“Aos meus irmãos, Pedro Henrique Roque Lima e Mayara Cristina Roque Barros, que me incentivaram bastante a continuar me dedicando em minhas atividades.”

“À minha esposa, Rebeca Roque, pelo carinho e motivação que sempre me direcionou no decorrer do curso e durante nosso relacionamento. Você tem sido fundamental na minha vida, te agradeço de coração por tudo.”

“Aos amigos que fiz no mestrado, Richard Rodrigues, Walmer Martins, Luis Dionísio, Raphael Prado, Mario Lima, Talita Godinho, Elizane Arraes e Henrique Saraiva, pois me ajudaram bastante em Belém.”

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

RESUMO GERAL

Os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia ainda que promissores para finalidade bioenergética, são altamente heterogêneos (dimensões e propriedades tecnológicas). Dessa forma, utilizados sem segregação resultam em baixa eficiência energética nos processos termoquímicos locais. Assim, esse trabalho teve como objetivo contribuir para a otimização energética dos resíduos madeireiros provenientes do manejo florestal sustentável visando atender os sistemas energéticos na Amazônia brasileira. A amostragem dos resíduos foi realizada aos três dias após a exploração na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim em Paragominas, Pará. Foram amostrados os galhos de maior diâmetro de três árvores de vinte espécies de ocorrência na Amazônia brasileira. Foram coletados três discos de madeira da base dos galhos para subsidiar a identificação na Xiloteca, as análises da madeira e carbonizações em escala de laboratório. Além disso, foi coletado material botânico para auxiliar à identificação das espécies. Para facilitar a compreensão, essa dissertação foi dividida em quatro capítulos. O primeiro mostra as relações existentes entre os parâmetros colorimétricos e as densidades básica e energética das madeiras residuais. O segundo reporta as características físicas, químicas e energéticas dos resíduos, e as propriedades que influenciam o desempenho energético da lenha. O terceiro trata da produção e qualidade do carvão vegetal produzido em escala de laboratório. O último capítulo relata as principais contribuições da segregação dos resíduos madeireiros sob a produtividade dos fornos de alvenaria e rendimentos da carbonização. Foram evidenciadas correlações envolvendo os parâmetros colorimétricos (L^* , b^* , C^* e h^*) e as densidades básica e energética. Assim, madeiras com maior pigmentação vermelha (a^*) (*Manilkara elata* e *Dinizia excelsa*) são mais densas e apresentam mais energia estocada (Capítulo 1). Os extrativos totais apresentaram ampla variação entre as madeiras residuais (1,85% – 17,88%) e foi a propriedade química que mais influenciou o desempenho energético da lenha. As madeiras residuais foram segregadas em 4 grupos de propriedades tecnológicas similares para geração de energia na Amazônia com base na análise de componentes principais (Capítulo 2). Os extrativos da madeira influenciaram positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, balanço de massa da carbonização, o poder calorífico e o índice de desempenho energético do carvão vegetal (Capítulo 3). A segregação dos resíduos madeireiros em grupos com propriedades similares com base na análise multivariada promoveu efeitos positivos no conteúdo de matéria prima enfiada, produtividade dos fornos de alvenaria e rendimentos da carbonização (Capítulo 4). O presente estudo tem impacto positivo na ciência e no setor produtivo local. Quanto à ciência, foi evidenciado que a qualidade energética dos resíduos de madeiras nativas da Amazônia foi mais influenciada pelos extrativos totais, e portanto, devem ser considerados na qualificação da biomassa residual. A segregação dos resíduos madeireiros em grupos com propriedades similares culminou em ganhos reais quanto a eficiência de conversão energética, mostrando menor consumo de lenha para uma mesma quantidade de carvão vegetal produzido da forma convencional. Dessa forma, a melhora dos índices promovidos pela segregação contribui para a sustentabilidade dos sistemas energéticos na Amazônia, especialmente as carvoarias, emitindo menos gases e produzindo mais carvão vegetal.

Palavras-chave: Madeiras residuais. Manejo florestal. Combustão. Carbonização. Extrativos totais.

GENERAL ABSTRACT

Logging wastes from sustainable forest management in the Amazon are promising for energy purposes, however, they are highly heterogeneous (dimensions and technological properties). When used without segregation, it results in low energy efficiency in local thermochemical processes. Thus, this work aimed to contribute to the energy optimization of logging wastes from sustainable forest management, aiming to serve the energy systems in the Brazilian Amazon. The wastes were sampled three days after logging at the Forest Management Unit from Rio Capim Farm in Paragominas, Pará. The largest diameter branches of three trees of twenty species of occurrence in the Brazilian Amazon were sampled. Three wooden discs from the base of the branches were collected to support identification in the xyloteque, wood analysis and carbonization in laboratory scale. In addition, botanical material was collected to support species identification. The study was divided into four chapters to facilitate compression. The first one shows the relationships between the colorimetric parameters and the basic and energy densities of the logging wastes. The second reports the physical, chemical and energy characteristics of the wastes, and the properties that influence the energy performance of the firewood. The third treats of the production and quality of charcoal in a laboratory scale. The last chapter reports the main contributions of logging wastes segregation on brick kiln productivity and carbonization yields. Correlations involving the colorimetric parameters (L^* , b^* , C^* and h^*), basic density, and energy density were evidenced. Thus, woods with higher red pigmentation (a^*) (*Manilkara elata* and *Dinizia excelsa*) are denser and have more stored energy (Chapter 1). The total extractives presented a wide variation among logging wastes (1.85% - 17.88%) and it was the chemical property that most influenced the energy performance of the firewood. The logging wastes were segregated into 4 groups of similar technological properties for power generation in the Amazon based on Principal component analysis (Chapter 2). Wood extractives positively influenced charcoal yield, mass balance of carbonization, heating value and fuel index value of charcoal (Chapter 3). The segregation of logging wastes into groups with similar properties based on multivariate analysis promoted positive effects on carbonized raw material content, kiln productivity and carbonization yields (Chapter 4). This study has a positive impact on science and the local productive sector. As for science, it was evidenced that the energy quality of the native wood wastes of the Amazon was more influenced by the total extractives, and therefore, should be considered in the residual biomass qualification. The segregation of logging wastes into groups with similar properties resulted in real gains in energy conversion efficiency, showing lower consumption of firewood for the same amount of conventionally produced charcoal. Thus, the improvement of the rates promoted by segregation contributes to the sustainability of energy systems in the Amazon, especially charcoal plants, emitting fewer gases and producing more charcoal.

Key words: Logging wastes. Forest management. Combustion. Carbonization. Total extractives.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Emissão de CO ₂ em megatoneladas de CO ₂ equivalente no mundo entre os anos de 1990 e 2016.....	23
Figura 2 -	Suprimento energético de combustíveis renováveis em quilotoneladas de óleo equivalente (ktep) entre os anos de 1990 e 2016.....	24
Figura 3 -	Fontes mundiais de energia primária utilizadas em 2016.....	25
Figura 4 -	Simulação do consumo específico em função da densidade básica da madeira de doze espécies florestais (8 nativas da Amazônia e 4 exóticas).....	29
Figura 5 -	Estrutura geral da pesquisa.....	51

Capítulo 1

Figura 1 -	Localização da Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, em Paragominas, Brasil.....	55
Figura 2 -	Esquema de amostragem dos resíduos na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	56
Figura 3 -	Etapas da coleta botânica: (i) escolha do melhor ramo a ser coletado (A); (ii) organização do ramo no jornal (B e C); (iii) prensagem do material botânico (D); (iv) acondicionamento do material em sacos plásticos com tratamento de álcool 90% (E); e (v) montagem das excicatas no herbário (F).....	57
Figura 4 -	Excicatas das espécies florestais identificadas e depositadas nos Herbários IAN e Felisberto Camargo em Belém, Pará, Brasil.....	59
Figura 5 -	Grupos de espécies formados pelo teste de Scott-Knott para densidade básica, em que as barras se referem aos valores máximo e mínimo. Em que: CVe – Coeficiente de variação experimental.....	62
Figura 6 -	Classificação da densidade básica da madeira dos resíduos madeireiros de vinte espécies tropicais baseada na metodologia de Csanády et al. (2015).....	63
Figura 7 -	Densidade energética dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira. Em que: CVe – Coeficiente de variação experimental.....	64

Figura 8 -	Diagrama colorimétrico dos resíduos madeireiros de vinte espécies tropicais da Amazônia Brasileira.....	68
Figura 9 -	Classificação colorimétrica dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira.....	69
Figura 10 -	Modelos lineares da densidade básica em função dos parâmetros colorimétricos L^* , b^* , C e h^*	71
Figura 11 -	Modelos lineares da densidade energética em função dos parâmetros colorimétricos L^* , b^* , C e h^*	72
Figura 12 -	Análises dos escores das duas primeiras componentes principais com discriminação dos grupos de espécies.....	75

Capítulo 2

Figura 1 -	Localização da Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Pará, Brasil.....	90
Figura 2 -	Densidade básica dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Letras minúsculas iguais representam os grupos de medias formados pelo teste Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e as barras de erros, os desvios padrões.....	98
Figura 3 -	Máximo teor de umidade dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Diferentes cores representam os grupos de medias formados pelo teste Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e as barras de erros, os valores de máximo e mínimo.....	99
Figura 4 -	Diagrama de Van Krevelen dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	103
Figura 5 -	Composição química molecular dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Diferentes cores representam os grupos e medias formados pelo teste de Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e a barra de erros, os desvios padrões.....	104

Figura 6 -	Análise química imediata dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Diferentes cores representam os grupos e medias formados pelo teste de Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e a barra de erros, os desvios padrões.....	106
Figura 7 -	Relação entre o índice de desempenho energético da lenha (IDEL), extrativos totais e carbono elementar (C) verificada para os resíduos madeireiros explorados em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Em que: $IDEL = -68849,27 + 1388,97 * C + 144,23 * Extrativos$, $R^2 = 0,84$ ($F_c = 45,05$; p -valor $< 0,0001$). Os circulos representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) baseado no IDEL.....	111
Figura 8 -	Simulação do poder calorífico líquido ($MJ\ kg^{-1}$) de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável em diferentes umidades na base úmida (10%, 15%, 20%, 25% e 30%).....	112
Figura 9 -	Agrupamento multivariado dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	114

Capítulo 3

Figura 1 -	Localização da Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	132
Figura 2 -	Taxa de aquecimento usada nos ensaios de carbonização dos resíduos madeireiros de um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	136
Figura 3 -	Densidade básica dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Barras referem-se aos valores máximo e mínimo. Cores diferentes representam os grupos de médias formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).....	142
Figura 4 -	Consumo específico de lenha (CE) dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável e relação dessa variável com a densidade básica (DB) e rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC). Os círculos representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) para o consumo específico de lenha..	143

Figura 5 -	Relação entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) e extrativos totais de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	145
Figura 6 -	Balanço de massa da carbonização em escala laboratorial de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	147
Figura 7 -	Relação dos extrativos totais com carbono retido (CR), oxigênio retido (OR) e hidrogênio retido (HR) dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	148
Figura 8 -	Densidade relativa aparente do carvão vegetal de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Cores diferentes representam os grupos de médias formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão...	149
Figura 9 -	Relação entre a densidade aparente do carvão vegetal (DRA) e a densidade básica (DB) dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	150
Figura 10 -	Carvão vegetal de resíduos madeireiros de um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	151
Figura 11 -	Teor de carbono fixo (TCF), materiais voláteis (TMV) e cinzas (TCz) do carvão vegetal proveniente de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Cores diferentes representam os grupos de médias formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.....	152
Figura 12 -	Relação entre índice de desempenho energético do carvão vegetal (IDE), extrativos totais (ET) e teor de carbono fixo (TCF) verificado para resíduos de exploração do manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Em que, $IDE = -12333,61 + 170,66*TCF + 132,38*ET$, $R^2 = 0,61$ ($F_c = 15,77$; p -valor $< 0,0001$).....	158

Figura 13 -	Agrupamento multivariado de espécies com base nas propriedades do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável no Pará, Brasil.....	161
--------------------	---	-----

Capítulo 4

Figura 1 -	Localização das Unidades de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	172
Figura 2 -	Agrupamento de espécies florestais baseado na análise de componentes principais para carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	173
Figura 3 -	Metodologia de campo: identificação e sinalização das espécies nas pilhas de resíduos (A), segregação dos resíduos por grupos em novas pilhas (b), traçamento das peças de resíduos em toretes de menores dimensões (C) e carregamento dos toretes para pesagem da massa úmida real em balança comercial (D).....	174
Figura 4 -	Cubagem rigorosa dos toretes (A), enchimento dos fornos (B), fechamento dos fornos (C) e junção dos toretes e restos de cascas e serragens para pesagem (D).....	177
Figura 5 -	Grupos de espécies para carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.	178
Figura 6 -	Esquema de carbonização dos grupos de resíduos nas unidades de produção de carvão vegetal 1 e 2 (UPC 1 e 2) da fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	182
Figura 7 -	Abertura dos fornos após o ciclo de carbonização de 12 dias (A); enchimento das caixas metálicas com carvão vegetal (B); tábuas de madeira pregadas na região frontal das caixas metálicas (C), carregamento das caixas metálicas com carvão vegetal para pesagem (D), pesagem dos finos (E), tiços (F) e tábuas (G) em balança mecânica.....	184
Figura 8 -	Densidade aparente (DA) e umidade na base úmida (Ubu) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.....	186
Figura 9 -	Densidade básica (DB) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.....	187

Figura 10 -	Densidade básica (DB) e umidade na base úmida (Ubu) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.....	188
Figura 11 -	Umidade na base úmida (Ubu) e máximo teor de umidade na base úmida (MTUbu) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.....	189
Figura 12 -	Massa úmida real de madeira enfiada (MURME) e Massa úmida estimada de madeira enfiada (MUEME) dos resíduos nos fornos de alvenaria.....	191
Figura 13 -	Massa seca estimada de madeira enfiada (MSEME) e volume de madeira enfiada (VME) dos grupos de resíduos segregados e convencional.....	192
Figura 14 -	Massa seca estimada de madeira enfiada (MSME) e densidade básica ponderada da madeira (DBp) dos grupos de resíduos segregados e convencional nos fornos de alvenaria.....	193
Figura 15 -	Massa de carvão vegetal (MC) por forno de alvenaria em função da massa seca estimada de madeira enfiada (MSEME), densidade básica ponderada (DBp) e umidade ponderada na base úmida (Ubu).....	195
Figura 16 -	Produção de tiços nos fornos 2 (A) e 4 (B) do grupo 3 na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	196
Figura 17 -	Densidade a granel do carvão vegetal (DGC) por forno de carbonização em função da densidade básica ponderada (DBp).....	197
Figura 18 -	Consumo específico real (CE) (A) e Coeficiente de conversão volumétrico (CCV) (B) dos grupos de resíduos segregados.....	198

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Espécies comuns em planos de manejo sustentável na Amazônia Central, Brasil.....	28
-------------------	--	----

Capítulo 1

Tabela 1 -	Espécies amazônicas amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	58
Tabela 2 -	Valores médios da umidade da madeira e parâmetros colorimétricos dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira.....	65
Tabela 3 -	Matriz de correlação das variáveis colorimétricas, físicas e energéticas.....	70
Tabela 4 -	Classificação dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal baseado em faixas de densidade básica.....	73
Tabela 5 -	Autovetores das 2 primeiras componentes principais.....	74
Tabela 6 -	Médias dos parâmetros colorimétricos e físicos por grupo de espécies formados pela análise de componentes principais.....	75

Capítulo 2

Tabela 1 -	Espécies tropicais da Amazônia amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	92
Tabela 2 -	Análise química elementar dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	101
Tabela 3 -	Ranqueamento energético dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	109
Tabela 4 -	Autovetores das três primeiras componentes principais.....	113
Tabela 5 -	Médias das variáveis estudadas para cada grupo formado pela análise de componentes principais.....	114
Tabela 6 -	Equivalência energética dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável com combustível fóssil.....	116

Capítulo 3

Tabela 1 -	Espécies amazônicas amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	135
-------------------	--	-----

Tabela 2 -	Rendimentos da carbonização dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável em escala de laboratório.....	144
Tabela 3 -	Análise química elementar do carvão vegetal proveniente de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	154
Tabela 4 -	Classificação energética do carvão vegetal dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.....	156
Tabela 5 -	Equivalência energética do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável com combustíveis fósseis.....	159
Tabela 6 -	Autovetores das duas primeiras componentes principais.....	160
Tabela 7 -	Médias das variáveis estudadas para cada grupo formado pela análise de componentes principais.....	163

Capítulo 4

Tabela 1 -	Espécies amostradas para carbonização nos fornos de alvenaria da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	175
Tabela 2 -	Composição dos fornos de alvenaria por grupos de resíduos segregados para carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	179
Tabela 3 -	Ciclo de carbonização dos fornos de alvenaria por grupo de resíduo segregado nas Unidades de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	183
Tabela 4 -	Métricas de volume e massa de madeira enforada, umidade e densidade ponderadas por forno de alvenaria.....	190
Tabela 5 -	Produtividade dos fornos de alvenaria com grupos de resíduos segregados na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	194

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
2	OBJETIVO GERAL	21
3	QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS	21
3.1	Capítulo 1	21
3.2	Capítulo 2	21
3.3	Capítulo 3	22
3.4	Capítulo 4	23
4	REVISÃO DE LITERATURA	23
4.1	Suprimento energético mundial	23
4.2	Potencial energético da biomassa residual do manejo florestal sustentável	26
4.3	Importância da produção de carvão vegetal no Pará	30
4.4	Qualidade da madeira para combustão completa	31
4.5	Propriedades energéticas da madeira para produção de carvão vegetal	34
4.6	A colorimetria como critério de agrupamento de resíduos para bioenergia	37
	REFERÊNCIAS	40
5	ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA	50
6	CAPÍTULO 1 – A COLORIMETRIA COMO CRITÉRIO DE SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA PARA BIOENERGIA	52
6.1	Introdução	52
6.2	Material e métodos	55
6.2.1	Origem do material biológico.....	55
6.2.2	Coleta dos discos de madeira.....	56
6.2.3	Identificação botânica das espécies.....	56
6.2.4	Propriedades físicas e energéticas da madeira.....	59
6.2.5	Mensuração dos parâmetros colorimétricos.....	60
6.2.6	Análises estatísticas dos dados.....	61
6.3	Resultados e discussão	62
6.3.1	Densidades básica e energética dos resíduos.....	62

6.3.2	Propriedades colorimétricas dos resíduos.....	64
6.3.3	Relação entre densidade básica, densidade energética e as variáveis colorimétricas.....	70
6.3.4	Agrupamento multivariado dos resíduos.....	73
6.4	Conclusões	77
	Referências.....	77
7	CAPÍTULO 2 – RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO PARA SISTEMAS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	86
7.1	Introdução	86
7.2	Material e métodos	89
7.2.1	Fonte e amostragem dos resíduos madeireiros.....	89
7.2.2	Identificação das espécies.....	90
7.2.3	Propriedades físicas dos resíduos madeireiros.....	93
7.2.4	Análises químicas dos resíduos madeireiros.....	93
7.2.5	Características energéticas dos resíduos madeireiros.....	95
7.2.6	Análises estatísticas.....	97
7.3	Resultados e discussão	97
7.3.1	Propriedades físicas e químicas dos resíduos madeireiros para carbonização e combustão.....	97
7.3.2	Propriedades energéticas, ranqueamento e agrupamento dos resíduos madeireiros.....	108
7.3.3	Equivalência energética dos resíduos madeireiros com combustível fóssil.....	115
7.4	Conclusões	117
	Referências.....	118
8	CAPÍTULO 3 – CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL PARA USOS DOMÉSTICO E INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	129
8.1	Introdução	129
8.2	Material e métodos	132
8.2.1	Origem do material biológico.....	132
8.2.2	Identificação das espécies.....	133

8.2.3	Densidade básica e teor de extrativos dos resíduos madeireiros.....	135
8.2.4	Carbonização em escala de laboratório.....	135
8.2.5	Qualidade do carvão vegetal.....	137
8.2.6	Balanço de massa da carbonização.....	138
8.2.7	Rendimento em carbono fixo e rendimento energético das espécies.....	139
8.2.8	Ranqueamento do carvão vegetal e equivalências energéticas com combustíveis fósseis.....	139
8.2.9	Análises estatísticas.....	141
8.3	Resultados e discussão.....	141
8.3.1	Densidade básica dos resíduos madeireiros.....	141
8.3.2	Consumo específico de lenha.....	142
8.3.3	Rendimentos e balanço de massa da carbonização dos resíduos.....	143
8.3.4	Densidade relativa aparente do carvão vegetal dos resíduos madeireiros..	149
8.3.5	Propriedades químicas do carvão vegetal dos resíduos.....	151
8.3.6	Propriedades energéticas do carvão vegetal dos resíduos.....	155
8.3.7	Equivalências energéticas do carvão vegetal dos resíduos madeireiros com combustíveis fósseis.....	158
8.3.8	Agrupamento multivariado das espécies.....	160
8.4	Conclusões.....	164
	Referências.....	164
9	CAPÍTULO 4 – A SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL MELHORA AS MÉTRICAS DA CARBONIZAÇÃO EM FORNOS DE ALVENARIA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA.....	169
9.1	Introdução.....	170
9.2	Material e métodos.....	172
9.2.1	Área de estudo.....	172
9.2.2	Segregação dos resíduos do manejo.....	173
9.2.3	Amostragem e identificação das espécies.....	174
9.2.4	Propriedades físicas da madeira.....	175
9.2.5	Cubagem rigorosa dos resíduos.....	176
9.2.6	Métricas de resíduos por fornos de alvenaria.....	177
9.2.7	Esquema de carbonização.....	178
9.2.8	Abertura dos fornos de carbonização.....	183
9.2.9	Densidade a granel e rendimentos da carbonização.....	184

9.2.10	Consumo específico e coeficiente de rendimento volumétrico.....	185
9.2.11	Análises estatísticas.....	185
9.3	Resultados e discussão.....	186
9.3.1	Caracterização física dos resíduos madeireiros.....	186
9.3.2	Volumen, massa, densidade e umidade dos resíduos madeireiros por fornos de carbonização.....	189
9.3.3	Produtividade dos fornos de carbonização.....	193
9.3.4	Coefficientes de conversão de resíduos madeireiros em carvão vegetal.....	198
9.4	Conclusões.....	199
	Referências.....	200
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	203

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento do uso de fontes limpas e seguras de energia contribui para a diversificação da matriz energética do Brasil e redução da dependência de combustíveis fósseis, que são os principais responsáveis pelas altas emissões de gases de efeito estufa (UDDIN et al., 2019). As Nações Unidas (ONU) entendem que a garantia da energia limpa e acessível a todos (objetivo 7) e a mitigação das mudanças climáticas globais (objetivo 13) são dois passos importantes para o desenvolvimento sustentável mundial. Essas preocupações, ligadas ao alto custo de fornecimento e à crescente demanda por energia, estimularam o interesse no uso de energia renovável em todo o mundo (JANOWIAK; WEBSTER, 2010).

Diversos países utilizam a biomassa florestal, especialmente lenha, como fonte energética, dentre eles o Brasil (TEIXEIRA et al., 2018), Turquia (KAYGUSUZ; SEKERCI, 2016), Moçambique (CUVILAS et al., 2014), Nigéria (ADAMU et al., 2018), Índia (TARAN et al., 2016), Espanha (PEREA-MORENO et al., 2019), Finlândia, Suécia (KOPONEN et al., 2015), Austrália (ROTHER et al., 2015), China (AHMED et al., 2016) e Irlanda (VAN DEN BROEK et al., 2001). A literatura mostra que o Brasil possui recursos de biomassa que são potencialmente suficientes para equilibrar a demanda total de energia primária brasileira até 2030 (WELFLE, 2017), especialmente os resíduos agrícolas e florestais (SANTOS et al., 2017).

Nos planos de manejo florestal praticados na Amazônia Brasileira, são gerados quantitativos significativos de resíduos florestais, em especial os resíduos madeireiros na etapa de exploração. Estima-se que para cada 1 tonelada de madeira extraída sob regime de Exploração de Impacto Reduzido, sejam gerados 2,13 toneladas de resíduos (sapopemas, restos de troncos e galhos) (NUMAZAWA et al., 2017). Sob essa ótica, os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável é uma fonte promissora de bioenergia nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, especialmente para produção de energia elétrica em comunidades remotas na Amazônia e suprimento de carvão vegetal para finalidades domésticas e industriais. Além disso, a utilização dessa biomassa para produção bioenergética na Amazônia é prevista no Artigo 2, Inciso XIV, da Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006).

A Empresa de Pesquisa Energética, empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem buscado nos últimos anos dar maior visibilidade aos resíduos do manejo florestal, pois apresentam potencial para substituição do óleo diesel, que é uma fonte onerosa e altamente poluidora no abastecimento dos sistemas energéticos isolados

nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará (EPE, 2018). Flores et al. (2018) mapearam 17 comunidades isoladas em reservas extrativistas na Amazônia Legal. Os autores estudaram as formas de acesso e fontes de energias utilizadas nas reservas e concluíram que 15 comunidades fazem uso de combustíveis fósseis para geração de energia, 1 dispõe de energia pública e 1, não dispõe de fornecimento de energia. Essas comunidades podem ser alvo de sistemas de conversão energética baseado na queima de lenha, especialmente oriunda dos resíduos do manejo florestal sustentável.

Com relação a produção de carvão vegetal, os Estados do Maranhão e Pará (região do Carajás) comportam o segundo maior polo siderúrgico do Brasil (UHLIG et al., 2008). Na região o fornecimento de carvão vegetal é oriundo de reflorestamentos com espécies do gênero *Eucalyptus* e resíduos do manejo florestal. Contudo, os plantios comerciais no Estado do Pará ainda são incipientes, cerca de 137.866 hectares ou 2,4% da área total plantada dessas espécies no Brasil (IBÁ, 2019). Dada a insuficiência de madeira oriunda de reflorestamento, destaca-se que a utilização dos resíduos do manejo florestal certificado para produção de carvão vegetal é promissora, contudo tem sido utilizados sem segregação. Informações das propriedades colorimétricas, físicas, químicas e energéticas dessas biomassas são importantes para dar suporte a segregação dessas madeiras, aumentar a eficiência de conversão energética e reduzir a heterogeneidade das madeiras utilizadas nos processos termoquímicos.

A presente dissertação está dividida em 4 capítulos. O primeiro aborda a técnica colorimétrica como critério de segregação dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável. O segundo capítulo apresenta a caracterização dos resíduos madeireiros quanto as suas propriedades físicas, químicas e energéticas. Nesse capítulo, as madeiras residuais foram agrupadas pela técnica multivariada para produção energética na Amazônia e comparadas com combustíveis fósseis. O terceiro capítulo trata da caracterização física, química e energética do carvão vegetal dos resíduos do manejo produzido em laboratório. Além disso, o carvão vegetal dos resíduos foram comparados com combustíveis fósseis nesse capítulo. Finalmente, no capítulo 4 é relatada a carbonização dos resíduos madeireiros segregados e não segregados em carvoaria considerando o agrupamento multivariado empregado no capítulo II.

Esse trabalho faz parte do projeto “Valorização de biomassas residuais provenientes de manejo florestal sustentável para geração de bioenergia na Amazônia Legal”, que é financiado pelo Banco da Amazônia sob Contrato de Apoio Financeiro N° 2018/193 (2019 – 2021).

2 OBJETIVO GERAL

Contribuir para a otimização energética dos resíduos madeireiros provenientes do manejo florestal sustentável visando atender os sistemas energéticos de conversão na Amazônia brasileira.

3 QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1 Capítulo 1

1. **Questão:** Quais as relações da colorimetria com as propriedades físicas e energéticas das madeiras residuais do manejo florestal sustentável?

Hipótese: Madeiras com tonalidades mais escuras apresentam densidades básica e energética elevadas.

Objetivo específico: Analisar as madeiras residuais quanto as propriedades colorimétricas, físicas e energéticas.

2. **Questão:** A colorimetria apresenta potencial de segregação dos resíduos do manejo florestal?

Hipótese: A colorimetria tem potencial de discriminar resíduos com maior potencial de geração de energia.

Objetivo específico: Testar a colorimetria como ferramenta de segregação dos resíduos madeireiros.

3.2 Capítulo 2

1. **Questão:** Há diferença de energia térmica gerada entre os resíduos do manejo florestal?

Hipótese: Os resíduos apresentam efeito de espécie na energia gerada pela queima.

Objetivo específico: Comparar o potencial energético dos resíduos com base no poder calorífico e índice de desempenho energético da lenha.

2. **Questão:** Quais propriedades dos resíduos mais influenciam o desempenho energético da lenha?

Hipótese: As propriedades químicas da madeira apresentam ampla contribuição na geração de energia.

Objetivo específico: Analisar as variações interespecíficas das propriedades físicas e químicas e as relações dessas propriedades com o desempenho energético da lenha.

3. **Questão:** Quais características da madeira tem maior influência para o agrupamento multivariado de resíduos do manejo florestal sustentável para bioenergia?

Hipótese: As propriedades químicas e físicas da madeira apresentarão maior influencia na formação dos grupos.

Objetivo específico: Analisar a contribuição das variáveis da madeira no agrupamento multivariado por meio dos autovetores da análise de componentes principais.

4. **Questão:** Qual característica da madeira deve ser considerada para escolha de resíduos com maior equivalência energética com combustível fóssil?

Hipótese: A escolha de resíduo baseado no poder calorífico implica em maior equivalência energética.

Objetivo específico: Comparar as equivalências energéticas por espécie e relacioná-las as propriedades dos resíduos.

3.3 Capítulo 3

1. **Questão:** Quais características da madeira residual apresentam maior influência na produção de carvão vegetal?

Hipótese: O teor de lignina da madeira apresenta maior influência na produção de carvão vegetal.

Objetivo específico: Verificar as relações existentes entre as propriedades da madeira e carvão vegetal.

3.4 Capítulo 4

1. **Questão:** Quais as implicações da segregação dos resíduos do manejo florestal sob a massa de resíduos madeireiros enfiados, produtividade de fornos de alvenaria e rendimentos da carbonização?

Hipótese: A segregação dos resíduos do manejo florestal influenciam positivamente a massa de madeira enfiada, produtividade dos fornos e rendimentos da carbonização.

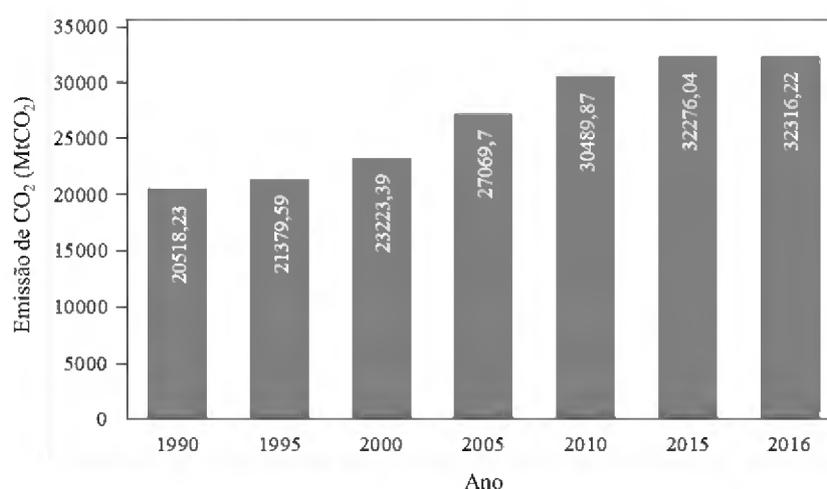
Objetivo específico: Analisar comparativamente os processos de carbonização de resíduos segregados e não segregados em fornos de alvenaria do tipo rabo quente.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Suprimento energético mundial

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2017) mostram que as emissões de CO₂ oriundos da queima de combustíveis, até o ano de 2016, cresceram substancialmente (Figura 1). Essa tendência é aderida majoritariamente à queima dos combustíveis fósseis, em especial ao carvão mineral e óleo, na China e Estados Unidos que, por sua vez, são os maiores emissores de gases de efeito estufa em nível global.

Figura 1 - Emissão de CO₂ em megatoneladas de CO₂ equivalente no mundo entre os anos de 1990 e 2016.



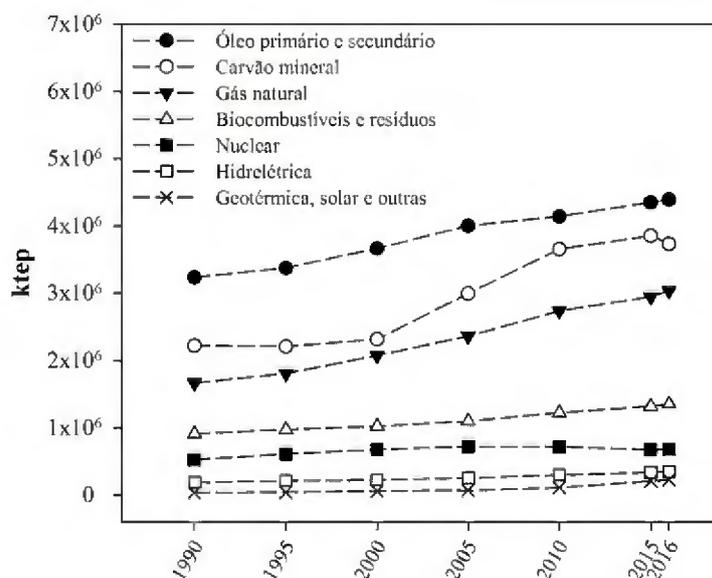
Fonte: IEA (2018a).

O relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2018a) evidencia que a partir do ano de 2010 (Figura 1) houve um decréscimo na amplitude das emissões de CO₂,

devido a adoção de fontes energéticas renováveis na matriz energética mundial e pela redução das emissões da China na ordem de 50 MtCO₂. Outro ponto importante que o relatório discorre é que o continente asiático, em especial os países Índia, Coreia e Indonésia, continuaram a aumentar em 2% anualmente suas emissões. Já na América e Europa, foi verificada redução nas emissões na ordem de 120 MtCO₂ e 30 MtCO₂, respectivamente, no ano de 2017.

A Figura 2 mostra o suprimento energético mundial entre os anos de 1990 e 2016. As fontes energéticas não renováveis, óleo primário e secundário, carvão mineral e o gás natural foram as que apresentaram os maiores valores em termos de suprimento energético no mundo ao longo dos anos analisados. Entretanto, foi observado uma tendência de aumento no uso de fontes energéticas renováveis no âmbito global, especialmente os biocombustíveis e resíduos.

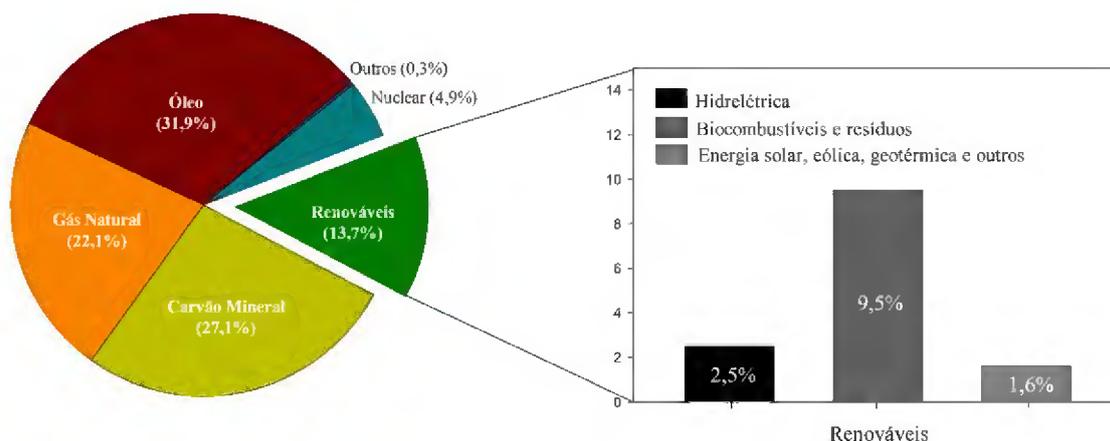
Figura 2 - Suprimento energético de combustíveis renováveis em quilotoneladas de óleo equivalente (ktep) entre os anos de 1990 e 2016.



Fonte: IEA (2017).

O aumento da demanda energética e os problemas causados pelo uso intensivo dos combustíveis fósseis nos dias atuais, forçaram os países a procurar e usar fontes energéticas limpas e confiáveis (BRUNEROVÁ et al., 2017; VOĆA et al., 2016). Com isso, do total de energia primária mundial fornecida no ano de 2016 (13.761 Mtep), 13,7% foi produzido a partir de fontes de energia renováveis (IEA, 2018b), sendo os biocombustíveis e resíduos os que mais se destacaram em relação às outras fontes de energia renováveis, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Fontes mundiais de energia primária utilizadas em 2016.



Fonte: IEA (2018b).

A categoria dos biocombustíveis e resíduos, em 2016, representou 69,5% do quantitativo de fornecimento das fontes de energia renováveis. Essa categoria abrange os biocombustíveis líquidos, sólidos/carvão vegetal e biogases, sendo que estes contribuíram com 4,6%, 62,4% e 1,7% do valor total fornecido pelos biocombustíveis e resíduos.

No Brasil, a demanda energética vem aumentando em quase 2,2% ao ano. Os setores responsáveis pela maior parcela do consumo final de energia são o industrial, o de transportes e o energético. No ano de 2017, do total de energia fornecida internamente no Brasil, 57% diz respeito a fontes de energia não renovável (petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e urânio) e 43% a fontes de energia renováveis (hidráulica e eletricidade, lenha, carvão vegetal e derivados da cana-de-açúcar). Até 2027, o cenário é de crescimento para o fornecimento interno de energia renovável (5%), se comparada ao de energia não renovável (-4%) (BRASIL, 2018).

Segundo o Balanço Energético Nacional, no ano de 2017, a bioenergia representou 29,6% da oferta interna de energia; sendo produtos da cana 17%, lenha e carvão vegetal 8% e a lixívia 2,3%. Destacam-se cinco vantagens que faz com que o Brasil se torne promissor na produção bioenergética, são eles: (i) localização geográfica do país e as condições climáticas favoráveis; (ii) estágio de desenvolvimento do seu mercado; (iii) capacidade de pesquisa e desenvolvimento de melhorias e adequação da produção e aumento de produtividade da biomassa no país; (iv) existência de indústria de serviços para projetos de bioenergia estruturada; e (v) estabelecimento de políticas nacionais que obrigam o tratamento e destinação adequada dos resíduos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (EPE, 2018a).

Isso evidencia a importância da presente pesquisa, a fim de diversificar as fontes de energia, reduzir o consumo de combustíveis fósseis, contribuir para a geração sustentável

de energia na Amazônia Legal e consolidar uma matriz energética mais segura e menos poluente.

4.2 Potencial energético da biomassa residual do manejo florestal sustentável

A biomassa é um recurso renovável, amplamente disponível, com emissões e absorção equilibradas de CO₂e com potencial de geração energética sem promover danos ao ambiente (AGBRO; OGIE, 2012; NHUCHHEN; AFZAL, 2017). Para a finalidade energética, o termo biomassa engloba substâncias biodegradáveis de origem animal e vegetal gerada a partir de plantios de espécies agrícolas e florestais e também de resíduos da agricultura, floresta e indústrias similares. Após o carvão mineral e o petróleo, a biomassa é a terceira maior fonte de energia em escala global (HASHEM et al., 2013). Se comparada ao carvão mineral, a biomassa florestal apresenta menores conteúdos de enxofre e cinzas (VOĆA et al., 2016).

Nesse contexto, a biomassa residual do manejo florestal surge como alternativa para fins energéticos, uma vez que não sendo usada e irresponsavelmente armazenada pode causar produção espontânea de lixiviados e metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes (NUMAZAWA et al., 2017; SUZUKI et al., 2016).

Nos atuais planos de manejo florestal sustentável são gerados quantitativos significativos de resíduos na etapa da exploração. Cruz Filho e Silva (2009) quantificaram 137,18 m³ ha⁻¹ de resíduos lenhosos gerados em uma área que sofreu exploração de impacto reduzido (EIR) no município de Moju, no Pará. Baker et al. (2007) em uma floresta na Amazônia peruana, verificaram a geração de 62,3 m³ ha⁻¹ de resíduos da exploração. Palace et al. (2007), após seis meses da exploração de impacto reduzido, verificaram 121,1 m³ ha⁻¹ de resíduos gerados pela atividade. Devido maior parte dos resíduos da exploração florestal serem provenientes de espécies madeireiras de densidade variando de média a alta, podem ser recomendados para geração de calor, eletricidade, combustíveis líquidos e sólidos (AGBRO; OGIE, 2012; BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013). Contudo, destaca-se a necessidade de estudos voltados à qualificação da madeira para uso energético, especialmente, para otimizar o uso do material e evitar perdas energéticas.

O aproveitamento dos resíduos lenhosos para produção de lenha e carvão, além de ser previsto na Instrução Normativa N° 5, de 11 de dezembro de 2006, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2006), promove a diversificação da produção florestal, geração de empregos locais e receitas. Francez et al. (2007) reportaram que a

retirada de resíduos em uma área de floresta na Amazônia sob Manejo Florestal Sustentável não apresentou efeitos na composição florística da área remanescente, ou seja, sem danos significativos.

Braz et al. (2014) reforçam a necessidade de disseminação de ideias para as empresas florestais sobre a classificação e quantificação de resíduos gerados, o que possibilitará o planejamento do armazenamento, transporte e transformação em subprodutos com valor agregado, nesse caso a lenha e o carvão vegetal.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem buscado nos últimos anos maior visibilidade ao potencial de aproveitamento energético de resíduos, seus benefícios e as principais barreiras que restringem seu desenvolvimento no país (EPE, 2018b). No mesmo relatório, consta que o aproveitamento dos resíduos do manejo, além de ser considerado uma boa prática do ponto de vista ambiental, apresentam potencial para substituição do óleo diesel, que é uma fonte onerosa e altamente poluidora no abastecimento dos sistemas energéticos isolados nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará. Adicionalmente, uma usina termelétrica abastecida por lenha residual do manejo florestal, segundo a EPE, teria capacidade de geração de energia seis vezes maior que a geração a óleo diesel planejada.

Visando à demonstração do potencial energético dos resíduos lenhosos (sapopemas, restos de tronco não aproveitados durante o traçamento e a galhada) do manejo florestal praticado na Amazônia, levou-se em consideração os dados publicados por Darrigo et al. (2016) de algumas espécies comuns em planos de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira (Tabela 1). Vale ressaltar que se trata de uma avaliação de potencialidade energética, visto que, resíduos lenhosos serão certamente gerados pela exploração florestal das espécies madeireiras e, de forma alguma está sendo considerada a hipótese de uso das toras extraídas no manejo para produção de energia.

Tabela 1 – Espécies comuns em planos de manejo sustentável na Amazônia Central, Brasil.

Família	Espécie	Nome vulgar	DB (g cm ⁻³)
Celastraceae	<i>Goupia glabra</i>	Cupiúba	0,710
Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i>	Maçaranduba	1,040
Sapotaceae	<i>Manilkara bidentada</i>	Maparajuba	0,830
Sapotaceae	<i>Pouteria anomala</i>	Abiu-rosadinho	0,730
Olacaceae	<i>Minquartia guianensis</i>	Acariquara	1,040
Mimosoideae	<i>Zygia racemosa</i>	Angelim-rajado	1,000
Burseraceae	<i>Protium hebetatum</i>	Breu-vermelho	0,650

DB = Densidade básica.

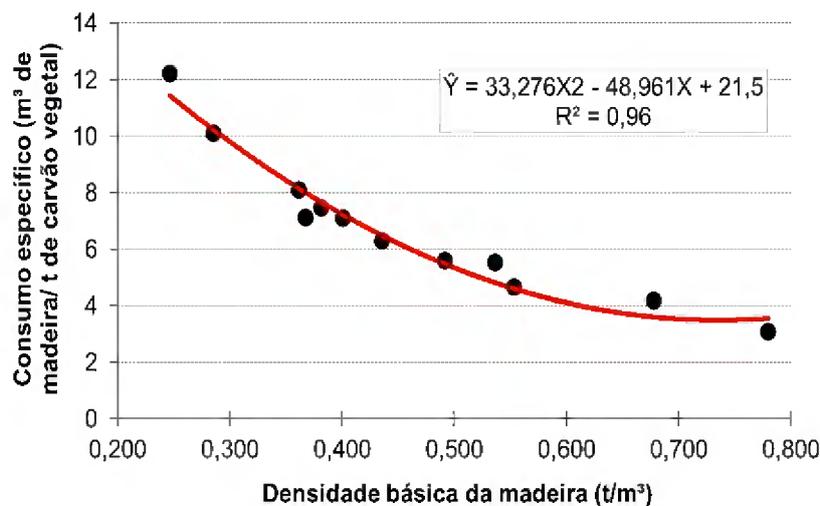
Fonte: Darrigo et al. (2016).

Com base nos valores de densidade básica descritos na Tabela 1, as espécies apresentam madeira com densidade média (*Goupia glabra*, *Pouteria anomala* e *Protium hebetatum*), alta (*Manilkara bidentada* e *Zygia racemosa*) e muito alta (*Manilkara elata* e *Minquartia guianensis*), se considerado a classificação de Csanády et al. (2015). Espécies com densidade básica elevada são desejáveis para a bioenergia (SANTOS et al., 2011), entretanto, torna-se necessário a caracterização química da madeira para comprovação.

Trugilho et al. (1991) analisando o potencial energético de doze espécies florestais (8 nativas da Amazônia e 4 exóticas) para produção de carvão vegetal, verificaram que em especial a madeira da espécie nativa *Brosimum rubescens* (vulgo pau-rainha) apresentou maiores valores para densidade básica (0,780 g cm⁻³), teor de carbono fixo (21,61%) e teor de lignina (33,28%), bem como menor teor de cinzas (0,15%), se comparada as demais espécies. O carvão vegetal proveniente da madeira da espécie citada, apresentou melhores características energéticas, dentre elas: maior rendimento em carvão vegetal (41,95%) e em carbono fixo (30,94%), elevada densidade relativa aparente (0,608 g cm⁻³) e verdadeira (1,52 g cm⁻³), baixo teor de cinzas (1,03%) e de porosidade (59,94%), alto teor de carbono fixo (73,74%) e poder calorífico superior (6.733,8 kcal kg⁻¹).

Foi possível simular o consumo específico em função dos valores de densidade básica das espécies estudadas por Trugilho et al. (1991) (Figura 4). As variáveis mencionadas apresentam relação inversa, indicando que espécies de densidade mais elevada produzirão uma tonelada de carvão vegetal com menor volume de madeira.

Figura 4 - Simulação do consumo específico em função da densidade básica da madeira de doze espécies florestais (8 nativas da Amazônia e 4 exóticas).



Fonte: Adaptado de Trugilho et al. (1991).

A conversão integral de uma floresta tropical densa exclusivamente em carvão vegetal ou abastecimento de usinas termoelétricas não seria admissível, contudo, os resíduos florestais são alternativas sustentáveis (SILVA et al., 2007). Diversos estudos corroboram a viabilidade energética dos resíduos do beneficiamento mecânico de espécies florestais amazônicas para bioenergia (MOULIN et al., 2017; MOUTINHO et al., 2011; MOUTINHO et al., 2016; REIS et al., 2015; SCHONINGER; SILVA et al., 2014; ZINELLI, 2012). Em contrapartida, são escassas pesquisas que abordam a potencialidade dos resíduos especificamente da exploração florestal em planos de manejo florestal sustentável certificados para produção de lenha e carvão vegetal, especialmente de várias espécies tropicais. Apenas Mota Junior et al. (2019) evidenciaram a viabilidade e sustentabilidade do uso de resíduo da copa para produção de carvão vegetal na Amazônia visando abastecer o setor siderúrgico. Nesse estudo, os autores avaliaram o efeito de três temperaturas finais de carbonização (300 °C, 400 °C e 500°C) sob as propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos galhos de uma espécie florestal (*Tachigali chrysophylla*) amostrados em área sob segundo ciclo de manejo florestal na Amazônia Oriental.

Portanto, os estudos referentes ao suprimento energético das residências e indústrias na região amazônica são de fundamental importância, especialmente no que tange ao desenvolvimento de produtos (lenha e carvão vegetal como matérias-primas industrial e doméstica) e estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da Amazônia Legal (destinação ambientalmente adequada de resíduos, geração

descentralizada de energia para a região Norte do Brasil, minimização das emissões de GEE e maximização do rendimento do processo de carbonização).

Além disso, faz-se necessária a valoração dos produtos energéticos, obtidos a partir dos resíduos das espécies arbóreas da Amazônia sob manejo florestal legalizado e, conseqüentemente, contribuir para o uso sustentável da maior floresta tropical do mundo.

4.3 Importância da produção de carvão vegetal no Pará

No estado do Pará, a importância da produção de carvão vegetal está atrelada a demanda do Polo Siderúrgico de Carajás, que está localizado entre os estados do Pará e Maranhão (UHLIG et al., 2008). A região do Carajás concentra o segundo maior polo siderúrgico do país e, sua instalação se deu em função da criação do Programa Grande Carajás (PGC), incentivado pelo Governo Federal em 1980. O PGC foi considerado um dos maiores programas de desenvolvimento integrado numa área de floresta tropical úmida (ROCHA et al., 2015). Atualmente, os municípios de Marabá e Breu Branco (Pará) e Açailândia (Maranhão) concentram os principais investimentos siderúrgicos concernentes ao referido polo (MACHADO, 1991).

A redução do minério de ferro em altos-fornos é a rota tecnológica amplamente utilizada para a produção do ferro-gusa no setor siderúrgico em todo o mundo. Nesse processo, há altos-fornos que utilizam o coque mineral como redutor e outros que utilizam o carvão vegetal. Por não apresentar enxofre, o carvão vegetal melhora a qualidade do ferro-gusa e do aço produzido, além disso, no processo siderúrgico, cumpre duas funções: agente térmico, fornecendo calor necessário ao processo; e químico, retirando oxigênio dos óxidos de ferro (BELCHIOR et al., 2017; MONTEIRO, 2004; UHLIG et al., 2008).

Quase que a totalidade (99%) de carvão vegetal produzido no Brasil é destinado ao consumo interno, principalmente pelo setor industrial (EPE, 2017). Como os plantios de *Eucalyptus* no estado do Pará são incipientes, cerca de 137.866 hectares plantados (IBÁ, 2019), destaca-se a necessidade de utilização de novas fontes alternativas e sustentáveis para produção desse insumo. Nesse cenário, a utilização de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável no estado do Pará se encaixa como importante fonte para produção energética. Além disso, o uso de fontes sustentáveis e legalizadas na produção de carvão vegetal na Amazônia é uma estratégia para melhorar a visibilidade do setor siderúrgico de Carajás visto os históricos de uso de biorredutor de fonte não legalizada.

4.4 Qualidade da madeira para combustão completa

A constituição química da madeira (composição química molecular, elementar e imediata) representa os principais índices estudados para geração de calor, pois além de influenciar o poder calorífico, essas propriedades variam consideravelmente entre espécies (QUIRINO et al., 2005; VALE et al., 2000). Contudo, outros índices podem ser utilizados, como a densidade básica, umidade e poder calorífico (ARAÚJO et al., 2018).

A umidade da madeira influencia negativamente o poder calorífico, sendo recomendável para queima direta madeiras com umidade abaixo de 25% (FARIANHAQUE, 1981), pois valores elevados de água presente na madeira reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape (VALE et al., 2000), assim reduzido será a capacidade de combustão (SOUZA et al., 2012).

Com relação à densidade básica da madeira, verifica-se na literatura (PROTÁSIO et al., 2015; SANTOS et al., 2012) que quanto maior o valor reportado para esse índice, maior será a sua densidade energética, portanto, mais propício o combustível será na geração direta de energia. Com isso, prioriza-se madeiras com densidade básica elevada para essa finalidade.

A química molecular também representa um importante índice de combustibilidade da madeira, visto quantificar os teores de extrativos, lignina, celulose e hemiceluloses da madeira. Em especial, destaca-se o teor de lignina e extrativos de natureza fenólica na madeira, pois contribuem para o aumento do poder calorífico superior (ZANUNCIO et al., 2014). Conteúdos elevados de lignina na madeira são desejáveis, pois este componente apresenta maior conteúdo de carbono em sua estrutura se comparado a celulose e hemiceluloses (YANG et al., 2007). Sabe-se que maior teor de carbono, implica no aumento do poder calorífico do combustível, assim, maior quantidade de energia gerada pela queima direta. Além disso, a maior complexidade da molécula de lignina promovida pela presença de anéis aromáticos desencadeia maior estabilidade térmica frente às demais moléculas estruturantes (holoceluloses) no processo de combustão (BABU, 2008; LIU et al., 2008).

A química elementar permite estudar com base na massa seca de madeira os teores de carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H), enxofre (S) e oxigênio (O), bem como as relações existentes entre esses elementos (N/C, H/C e O/C) (DIAS JÚNIOR et al., 2018). O poder calorífico da madeira está intimamente relacionado com os elementos químicos supracitados (BRUNEROVÁ et al., 2017). Elevadas proporções de oxigênio na madeira,

se comparado ao de carbono, reduzem o valor calórico da biomassa (LEITE et al., 2015). Brand et al. (2010) relata que a partir das porcentagens dos elementos C, N, H, S e O é possível calcular o potencial energético ou a entalpia de combustão do combustível e o volume de ar teórico para que ocorra a combustão completa da madeira. Outros trabalhos relacionaram por meio de modelos de regressão o poder calorífico superior e os constituintes químicos elementares (SHENG; AZEVEDO, 2005; YIN, 2011).

Para a queima direta, é recomendável maiores teores de C e H, por apresentarem relação positiva com o poder calorífico (PROTÁSIO et al., 2013), e menores de N e S, pois esses elementos são responsáveis pela formação de gases intensificadores do efeito estufa (NO_x e SO_x) e chuva ácida (LEITE et al., 2015). A quantificação dos teores de C e H no combustível é muito relevante, pois a energia gerada no processo de combustão é oriunda da queima desses elementos (CARNEIRO et al., 2014).

Altas relações C/N implicam em uma menor quantidade de nitrogênio a ser liberado após a combustão da biomassa, reduzindo a poluição do ar (LEITE et al., 2015). Soares et al. (2014) verificaram que a menor relação H/C está correlacionada com a presença de maior quantidade de grupos guaiacil, pois os grupos siringil (C_{62,9%}H_{6,7%}O_{30,5%}) apresentam maior relação H/C do que os grupos guaiacil (C_{66,7%}H_{6,7%}O_{26,7%}). Maior relação O/C é prejudicial ao uso energético, indicando que as superfícies do combustível apresentam alta afinidade em obter umidade por haver ligações químicas entre o oxigênio e o hidrogênio (ligações de hidrogênio) (CHUN et al., 2004). Além disso, o oxigênio não é um elemento combustível.

A composição química imediata refere-se aos materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas presentes na massa da madeira (IMAM; CAPAREDA, 2012). Estudos anteriores comprovam a influencia da composição química imediata sob o poder calorífico da madeira (JARDIM et al., 2016; SILVA et al., 2015).

Os materiais voláteis (hidrocarbonetos leves, CO, CO₂, H₂, H₂O e alcatrões) são a fração evaporada como vapor ou gás durante a decomposição térmica do combustível, enquanto que a outra quantidade de carbono não evaporada permanece relativamente intacta, no estado sólido, denominada de carbono fixo (NASSER et al., 2016; VASSILEV et al., 2010). Elevado teor de materiais voláteis facilita a ignição do combustível (WERTHER et al., 2000). O teor de carbono fixo e os materiais voláteis apresentam relação inversa, uma vez que o primeiro é determinado por diferença (PROTÁSIO et al., 2011b).

As cinzas são resíduos compostos de óxidos minerais obtidos após a combustão completa da madeira (SOUZA et al., 2016). De acordo com Brand et al. (2015), o teor de

cinzas da madeira adequado para produção bioenergética deve ser inferior a 5%, principalmente, pela relação inversa existente entre o teor de cinzas e o poder calorífico. Elevado teor de cinzas sugere elevados níveis de minerais. Sob altas temperaturas, as cinzas, por apresentarem baixa temperatura de fusão, promovem prejuízos aos equipamentos de queima, como incrustações, corrosões e entupimentos, caracterizando-a como material abrasivo (MELISSARI, 2014).

O poder calorífico representa a quantidade de energia produzida pela combustão de uma unidade de massa. Para o uso energético, o recomendado é o uso de madeira com alto poder calorífico. Pode ser expresso pelo poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico líquido (CHAVES et al., 2013; NONES et al., 2015).

O poder calorífico superior quantifica a energia térmica liberada por 1 kg de combustível quando este sofre combustão completa em uma bomba calorimétrica sob condições específicas. Adicionalmente, a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é contabilizado (NHUCHHEN; AFZAL, 2017).

O poder calorífico inferior é calculado na base seca, é o poder calorífico obtido, após a queima da madeira em base seca, sem levar em consideração o calor latente do vapor d'água presente nos produtos da combustão. A água gerada na combustão completa do hidrogênio elementar evapora e, conseqüentemente, leva consigo uma parte da energia do sistema (RODRIGUES; ROUSSET, 2009).

Finalmente, o poder calorífico líquido ou útil é a real quantidade de energia disponível após a combustão completa da madeira. Nesse caso, além da água formada durante a combustão do hidrogênio, é considerada a umidade do combustível (FERREIRA et al., 2016). No cálculo do poder calorífico líquido é desconsiderada a energia necessária para evaporar a água formada pela combustão completa do hidrogênio da constituição elementar, bem como a energia para evaporar toda a umidade do material. Para cogeração de energia, o poder calorífico líquido mínimo desejado para biomassa é de 1.900 kcal kg⁻¹ (BRAND et al., 2014).

Estudos mostram correlações positivas do poder calorífico da madeira com teor de lignina (SOARES et al., 2014), extrativos (TELMO; LOUSADA, 2011b), carbono fixo, materiais voláteis (SILVA et al., 2015), hidrogênio elementar, carbono elementar (DEMIRBAS; DERMIRBAS, 2004) e densidade energética (LIMA et al., 2011). Correlações negativas foram reportadas relacionando a umidade (FERREIRA et al., 2016), holocelulose (MEDEIROS NETO et al., 2014) e teor de cinzas (PROTÁSIO et al., 2011a).

Relacionando o poder calorífico superior e densidade básica da madeira, se calcula a densidade energética, que possibilita mensurar o potencial que um determinado volume de biomassa tem para geração de energia em calorias ou joules (RODRIGUES; ROUSSET, 2009). Essa variável é um importante indicador do potencial energético de um biocombustível, sendo desejável madeira com maior densidade energética (AMAYA et al., 2015).

4.5 Propriedades energéticas da madeira para produção de carvão vegetal

A qualidade da madeira é um fator de extrema importância quando se visa à produção de carvão vegetal. Normalmente são estudadas as características anatômicas (OLIVEIRA et al., 2006), físicas (FRIEDERICHS et al., 2015) e químicas (SANTOS et al., 2016) da madeira para qualificação e seleção de espécies para produção de carvão vegetal, pois influenciam diretamente o rendimento do processo de carbonização e a qualidade de biorredutor produzido (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Para produção de carvão vegetal, Pereira et al. (2016a) destacam a necessidade de se estudar os constituintes anatômicos da madeira, principalmente no que se refere a mensuração das dimensões, frequências, forma, arranjo e organização dos poros, raios e fibras. A descrição anatômica das madeiras é de fundamental importância pois exerce influência sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira (OLIVEIRA et al., 2006).

Oliveira e Silva (2003) atribuem dependência da densidade a proporção de vasos e da espessura da parede celular das fibras. Segundo os autores, o aumento da densidade pode estar atribuído ao aumento da espessura da parede celular das fibras ou da proporção das fibras em relação a proporção de vasos. Madeiras com elevada densidade básica tendem a produzir maior massa de carvão vegetal por forno de carbonização (SANTOS et al., 2011).

A relação entre a espessura da parede celular e largura das fibras permite calcular a fração parede das fibras, que é uma relação matemática de grande relevância na produção de carvão vegetal (DAMÁSIO et al., 2013). Madeira com elevada fração parede tende a produzir carvão com menor conteúdo de espaços vazios, conseqüentemente, maior densidade aparente do carvão vegetal. Portanto, recomenda-se madeira com alta porcentagem de fibras com fração parede superior a 60% para produção energética (PAULA, 2005).

As características físicas mais importantes para qualificação de madeira para o uso bioenergético são a densidade básica e umidade. Para essa finalidade, são desejáveis

madeiras com densidade básica elevada (SANTOS et al., 2011), pois produzem maior massa de carvão para um determinado volume. Além disso, maiores serão a densidade relativa aparente, resistência mecânica e densidade energética do carvão vegetal (CARNEIRO et al., 2014).

A umidade está relacionada ao conteúdo de água presente na biomassa. Brand e Muñiz (2010) destacaram que para uma melhor eficiência na carbonização da biomassa, o teor de umidade do material combustível deve ser $\leq 30\%$ (Base úmida). Elevado teor de água na madeira promove a elevação do tempo total de carbonização, aumenta o teor de gases não condensáveis, diminui a taxa de aquecimento do forno, diminui o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e intensifica a emissão de gases poluentes (ARRUDA et al.; 2011; CANAL et al., 2016b).

Zanuncio et al. (2013) avaliando a secagem da madeira de distintos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*, evidenciaram relação inversa da densidade básica com a umidade da madeira ($r = -0,944$) e taxa de secagem ($r = -0,761$), em que madeiras com elevada densidade apresentaram menores umidades inicial e final, bem como menor taxa de secagem. Relações inversas existentes entre a densidade básica e a umidade inicial e taxa de secagem também foram reportados por Zanuncio et al. (2015) e Soares et al. (2016) estudando a secagem de materiais genéticos de *Eucalyptus*. Os estudos confirmaram a necessidade de uso de madeira com umidade adequada para a produção de carvão vegetal ($< 30\%$), o que garantirá redução nos custos de transporte, menor tempo de carbonização e melhores propriedades energéticas do biorredutor produzido.

A química molecular constitui os elementos de maior importância para produção de carvão vegetal. Esta composição química está relacionada aos teores dos componentes estruturais (celulose, hemiceluloses e lignina) e não estruturais (extrativos) da madeira (CANAL et al., 2016a; LARA et al., 2017). Conforme Rowell et al. (2005), a combinação de celulose (40%-45% da massa seca da madeira) e hemiceluloses (15% - 25% da massa seca da madeira) é chamada de holocelulose (65% - 70% da massa seca da madeira).

A celulose é tida como o principal constituinte químico da madeira (PEREIRA et al., 2013) formado exclusivamente por unidades de β -D-anidroglicopiranosose, unidas por ligações glicosídicas do tipo $\beta(1-4)$ (ROWELL et al., 2005). Esse polímero se decompõe em temperaturas compreendidas entre 315°C e 400°C (FREITAS et al., 2017). As hemiceluloses são polímeros geralmente amorfos e de baixa massa molecular, normalmente degradadas entre as temperaturas de 190°C e 360°C (ROWELL et al., 2005). A degradação de hemiceluloses acima de 300°C é responsável pela maior produção do líquido pirolenhoso, que é um gás condensável (ALMEIDA et al., 2015).

Santos et al. (2016) destacam que não são desejáveis altas porcentagens de celuloses e hemiceluloses quando se pretende utilizar madeira para produção de carvão vegetal, pois o comportamento desses compostos diante da degradação térmica apresenta um perfil instável e pouco resistente, colaborando para maior degradação e maior geração de gases não condensáveis e condensáveis.

A lignina é uma macromolécula formada por unidades aromáticas que apresentam alta estabilidade térmica devido maiores concentrações de carbono em sua estrutura (HAYKIRI-ACMA et al., 2010). Apresenta como unidade básica o fenilpropano, unidos por ligações do tipo éter (C-O-C) e carbono-carbono (C-C) (ROWELL et al., 2005). A lignina é principalmente um polímero amorfo tridimensional composto de três grupos básicos conhecidos como p-hidroxifenil (H), guaiacil (G) e siringil (S). Em folhosas, é comum as ligninas serem compostas por unidades siringil (50-75%) e guaiacil (25-50%) (WANG et al., 2017). A decomposição térmica da lignina ocorre a partir de 100°C até 900°C, podendo ser considerada um conjunto de várias reações paralelas (YANG et al., 2007). Estudo conduzido por Gouvêa et al. (2015), verificaram o teor de lignina de 8 clones de *Eucalyptus* sp. variando de 28,08% a 31,70%. No geral, madeiras com teor elevado de lignina são priorizadas para produção de carvão vegetal (COSTA et al., 2017; PEREIRA et al., 2016b).

A qualidade da molécula da lignina deve ser melhor estudada, priorizando a molécula com maior teor de carbono. Para produção de carvão vegetal, recomendam-se madeiras com menor relação siringil/guaiacil. O grupo guaiacil é o mais preservado no processo de pirólise devido maior teor de carbono, enquanto que o siringil possui um grupo metoxílico a mais que o guaiacil, tornando-o mais reativo, ou seja, mais facilmente oxidado durante a pirólise. Assim, madeiras com maior relação siringil/guaiacil tendem a apresentar menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal (SOARES et al., 2014; WANG et al., 2017).

O teor de extrativos da madeira é um termo coletivo que abrange um espectro de compostos. As principais funções fisiológicas desses constituintes químicos em uma árvore viva são armazenamento de nutrientes, preservação da madeira, formação de cor e odor (ZHANG et al., 2007). Usualmente, a fração de extrativos é composto por lipídeos, componentes fenólicos, terpenóides, resinas, ésteres, esterol e ceras (SEBIO-PUÑAL et al., 2012). O conteúdo de extrativos na madeira normalmente varia entre 4% e 10% da massa total da madeira seca (MORAIS et al., 2005). Podem ser extraídos em água ou solventes orgânicos (ISHIDA et al., 2007).

Juntamente a lignina, os extrativos de natureza fenólica apresentam menos oxigênio em sua composição e estruturas complexas com mais carbono, quando comparados com os polissacarídeos (ARAÚJO et al., 2018). A presença de substâncias de natureza fenólica na madeira, gera carvão vegetal com maior densidade e mais resistente, em termos de propriedades físico-mecânicas (TRUGILHO; SILVA, 2001; VIDAURRE et al., 2012). Várhegyi et al. (2004) demonstraram reduções no conteúdo de carbono fixo e no rendimento em carvão vegetal após remoção de extrativos da madeira. Portanto, para a produção de biorredutor, recomenda-se madeiras com elevado teor de extrativos de natureza fenólica.

4.6 A colorimetria como critério de agrupamento de resíduos para bioenergia

A primeira característica da madeira perceptível à visão humana é a cor (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018). A cor é um atributo da percepção visual que é determinada pela composição espectral da luz refletida das superfícies (SANDOVAL-TORRES et al., 2010). A cor é considerada uma propriedade sensorial que pode ser utilizada na qualificação de madeiras para finalidades diversas (JANIN et al., 2001; MARTINS et al., 2015). A cor da madeira fresca pode variar entre espécies, árvores da mesma espécie e até na mesma árvore (SALCA et al., 2015). O padrão de coloração de uma madeira pode variar em tonalidades que vão desde o bege claro até o marrom escuro, quase preto (MORI et al., 2004). Essas distintas tonalidades são derivadas da composição química das substâncias presentes no xilema: polifenóis, flavonoides, estilbenos, quinonas, dentre outros (MADY, 2000). Além disso, as características anatômicas também podem influenciar na cor da madeira (MORI et al., 2004).

Para a determinação da cor de madeiras, o método mais usual é o comparativo, que se baseia na subjetividade do observador. Na prática, a madeira é comparada visualmente com os atlas de cores da escala Munsell (AUTRAN; GONÇALEZ, 2006), o que pode sofrer variações de acordo com observador e a fonte de luminosidade utilizada (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018). Visando contornar o caráter subjetivo no processo de determinação da cor, destaca-se a necessidade de técnicas mais refinadas para essa finalidade. Nessa perspectiva, a técnica da colorimetria visa avaliar a cor de forma quantitativa e precisa com auxílio de equipamentos específicos, tais como colorímetros e espectrofotômetros (MARTINS et al., 2015).

O sistema CIEL*a*b*, ou também conhecido como CIELAB, é atualmente um dos espaços de cores mais populares e amplamente utilizados para a determinação da cor

(JIANG; FU, 2017). Trata-se de um método criado pela *Commission International d'Eclairage* (CIE) ou Comissão Internacional de Iluminantes, que define a sensação de cor, baseado em três elementos: luminosidade (L^*) ou brilho, tonalidade ou matiz (coordenadas cromáticas a^* e b^*) e saturação ou cromaticidade (C) (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

A luminosidade, expressa pela variável L^* , é uma variável cromática que define a escala de cinza entre o branco e o preto, assume o valor 0 para o preto absoluto e 100 para o branco total. Em termos práticos, quanto mais próximo de zero mais escura é a superfície da madeira (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001). González et al. (2001) destacam que a presença de anéis de crescimento na face transversal da madeira, aumenta o nível de cinza, fazendo com que haja redução da luminosidade e dos matizes responsáveis pelas coordenadas a^* e b^* , tornando a madeira mais escura.

A tonalidade é expressa pelas cores primárias vermelho, verde, amarelo e azul, sendo representada em forma de um círculo cortado por duas retas perpendiculares (horizontal e vertical) passando pelo centro (MORI et al., 2004). Os pigmentos vermelho, verde, amarelo e azul são determinados pelas coordenadas $+a^*$, $-a^*$, $+b^*$ e $-b^*$, respectivamente. Essas coordenadas, variam de -60 a +60. A saturação ou cromaticidade, representada pela variável C, é a distância radial entre a localização e o centro do espaço, e está diretamente ligada à concentração do pigmento (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018). O ângulo de tinta (h^*) é o ângulo do círculo, derivado dos valores de a^* e b^* , varia de 0 a 90° para madeiras amazônicas (MORI et al., 2004).

Com base no sistema CIELAB, os sinais positivos e negativos significam: $+a^*$ aumento na coloração vermelha; $-a^*$ aumento na coloração verde; $+b^*$ aumento na coloração amarela; e $-b^*$, aumento na coloração azul, representando a tonalidade (CIE, 2004).

Estudos mostram a viabilidade da colorimetria na avaliação da qualidade de pellets (PEGORETTI et al., 2019; SGARBOSSA et al., 2014). Na área da ciência e tecnologia da madeira, normalmente tem sido empregada para avaliar o ataque de agentes biodeterioradores (STANGERLIN et al., 2013), ação do intemperismo (MATTOS et al., 2014), efeitos de processos termorretrificadores (GRIEBELER et al., 2018; MOURA; BRITO, 2011; SCHNABEL et al., 2007) ou produtos de acabamento (PEREIRA et al., 2017), além de simples caracterização colorimétrica para identificação e classificação de madeiras (AUTRAN; GONÇALEZ, 2006).

Griebeler et al. (2018) corroboram que a colorimetria pode viabilizar um meio útil para classificar e combinar madeiras para utilidades diversas. Estudos de agrupamento de

espécies com base na similaridade cromática da madeira já foram realizados (MARTINS et al., 2015; MOYA; MARÍN, 2011; SILVA et al., 2017). Contudo, destaca-se a necessidade de se avaliar o potencial dessa técnica em formar grupos de madeiras tropicais com cores similares para uso bioenergético na Amazônia Legal, onde se produz carvão vegetal de resíduos madeireiros heterogêneos do manejo florestal sem critérios técnicos de agrupamento de espécies.

Para produção bioenergética, destaca-se madeiras de densidade básica média e alta, o que influenciará positivamente na densidade relativa do carvão vegetal produzido. Nota-se na literatura que os parâmetros colorimétricos apresentam correlação com outras propriedades da madeira (GARCIA et al., 2004; NISHINO et al., 2000). Correlações negativas entre a densidade básica e luminosidade ($r = - 0,70$), Coordenada cromática azul-amarelo ($r = - 0,77$), saturação ($r = - 0,75$) e ângulo de tinta ($r = - 0,76$) em espécies de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*, foram verificadas por Amorim et al. (2013).

A correlação negativa entre a densidade básica da madeira e luminosidade, evidencia que madeiras mais escuras apresentam densidade elevada. Estudo de Garcia e Marinonio (2016) mostrou correlação positiva entre a densidade básica e a^* para árvores de *Tectona grandis*, mostrando que madeiras mais densas são mais escuras e apresentam mais pigmentação vermelha. Os autores verificaram ainda que a cor vermelha (a^*) e a luminosidade (L^*) da madeira estão correlacionadas com o teor de extrativos.

Além das propriedades físicas e mecânicas da madeira, as propriedades químicas (extrativos e lignina) apresentam correlação significativa com os parâmetros colorimétricos, fato esse reportado em trabalho conduzido por Mori et al. (2005), avaliando clones do gênero *Eucalyptus*. Rowell et al. (2005) apontam que os extrativos fenólicos e terpenos condicionam as características cromáticas da madeira, uma vez que com o desenvolvimento diametral das árvores, sucessivas camadas de células vão morrendo próximo a medula e, em seu interior, são depositadas as substâncias químicas supracitadas. Além dos extrativos, a deterioração dos elementos constitutivos da madeira, dentre eles a lignina, também podem alterar a coloração da madeira (ROWELL, 1990).

Estudo conduzido por Mori et al. (2004) verificou correlação negativa ($p \leq 0,05$) entre Lignina solúvel e b^* (-0,2998) e positiva entre Lignina solúvel e L^* (0,5339) e h^* (0,4150) para clones de *Eucalyptus*, o que significa que a lignina solúvel pode afetar a cor da madeira tornando-a avermelhada, à medida que seu teor diminui, podendo diminuir a claridade e a tonalidade, à medida que seu teor aumenta ou diminui numa espécie. No mesmo estudo, foi verificada influência dos polifenóis na coloração da madeira dos clones de *Eucalyptus*, sendo reportada relação inversamente proporcional com L^* . O

estudos das relações das propriedades colorimétricas com as propriedades químicas e físicas da madeira são importantes para discriminar madeiras residuais para bioenergia. Estas propriedades contemplam as principais características que são utilizadas para qualificar madeira para bioenergia.

REFERÊNCIAS

ADAMU, H. et al. Exploration of influence of chemical composition on combustion and fuel characteristics of wood-charcoals commonly used in Bauchi State, Nigeria. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 8, n. 3, p. 1508-1518, 2018.

AGBRO, E. B.; OGIE, N. A. A comprehensive review of biomass resources and biofuel production potential in Nigeria. **Research Journal in Engineering and Applied Sciences**, v. 1, n. 3, p. 149-155, 2012.

AHMED, S. et al. A comparative review of China, India and Pakistan renewable energy sectors and sharing opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 216-225, 2016.

ALMEIDA, A. M. C. et al. Avaliação físico-química e energética da madeira das espécies *Piptadenia stipulaceae* (Benth.) Ducke e *Amburana cearenses* (Allemão) A. C. Smith de ocorrência no semiárido nordestino brasileiro. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 165-173, 2015.

AMAYA, A. et al. Preparation of charcoal pellets from *Eucalyptus* wood with different binders. **Journal of Energy and Natural Resources**, v. 4, n. 2, p. 34-39, 2015.

AMORIM, P. G. R. et al. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 461-466, 2013.

ARAÚJO, A. C. C. et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-9, 2018.

ARRUDA, T. P. M. et al. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011.

AUTRAN, C. S.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Mull Arg.) visando à utilização em interiores. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 4, p. 445-451, 2006.

BABU, B.V. Biomass pyrolysis: a state-of-the-art review. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 2, p. 393-414, 2008.

BELCHIOR, I. B. et al. Custos e viabilidade econômica na produção de carvão vegetal no estado de Mato Grosso do Sul. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 3, p. 168-176, 2017.

- BONFATTI JÚNIOR, E. A.; LENGOWSKI, E. C. Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, n. E201601394, p. 1-13, 2018.
- BRAND, M. A. et al. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 88, p. 619-628, 2010.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia 2027**. Brasília: MME/EPE, 2018.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa MMA nº 5 de 11/12/2006. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas**, 2006.
- BRAZ, R. L. et al. A. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia – uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 5, n. 2, p. 168-181, 2014.
- BRUNEROVÁ, A. et al. Tropical waste biomass potential for solid biofuels production. **Agronomy Research**, v. 15, n. 2, p. 359-368, 2017.
- BUSTAMANTE-GARCÍA, V. et al. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 169-174, 2013.
- CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n. 71, 2001.
- CANAL, W. D. et al. Comportamento térmico e emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 261-267, 2016a.
- CANAL, W. D. et al. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases do efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 112, p. 831-840, 2016b.
- CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.
- CHAVES, A. M. B. et al. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.
- CHUN, Y. et al. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 17, p. 4649-4655, 2004.

CIE - Commission Internationale de L'Eclairage. **Colorimetry**. Viena: International Commission on Illumination, 2004.

COSTA, A. C. S. et al. Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017.

CRUZ FILHO, F.; SILVA, J. N. M. Avaliação da quantidade de resíduos lenhosos em floresta não explorada e explorada com técnicas de redução de impactos, utilizando amostragem por linha interceptadora, no Médio Mojú, Amazônia Oriental, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 3, p. 527-532, 2009.

CUVILAS, C. et al. The characterization of wood species from Mozambique as a Fuel. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 36, p. 851-857, 2014.

DAMÁSIO, R. A. P. et al. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 75, p. 261-267, 2013.

DARRIGO, M. R. et al. Effects of reduced impact logging on the forest regeneration in the central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 360, p. 52-59, 2016.

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, A, H. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 22, n. 2, p. 135-143, 2004.

DIAS JÚNIOR, A. F. et al. Pyrolysis and wood by-products of species from the Brazilian semi-arid region. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, p. 65-75, 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2017. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano Base 2016**. Rio de Janeiro: EPE; 2017.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018a.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018b.

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (Mimosa scrabella, Benth) e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. 14p. (Série Técnica).

FERREIRA, J. C. et al. Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 269-276, 2016.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p.157-174, 2009.

FLORES, J. A. et al. Inventory data on Brazilian Amazon's non-wood native biomass sources for bioenergy production. **Data in Brief**, v. 20, p. 1935-1941, out. 2018.

- FRANCEZ, L. M. B. et al. Mudanças ocorridas na composição florística em decorrência da exploração florestal em uma área de floresta de Terra Firme na região de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 219-228, 2007.
- FREITAS, F. P. et al. Decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos visando seu aproveitamento para fins energéticos. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 29-35, 2017.
- FRIEDERICHS, G. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.). **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 79-87, 2015.
- GARCIA, R. A. et al. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014.
- GARCIA, R. A.; MARINONIO, G. B. Variação da cor da madeira de teca em função da densidade e do teor de extrativos. **Florestal e Ambiente**, vol. 23, n. 1, p. 124-134, 2016.
- GONÇALEZ, J. C. et al. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, n.72, p.47-58, 2001.
- GOUVÊA, A. F. G. et al. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 71-78, 2015.
- GRIEBELER, C. G. O. et al. Colour responses of *Eucalyptus grandis* wood to the Brazilian process of thermal modification. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 20, n. 4, p. 661-670, 2018.
- HASHEM, M. et al. Recycling rice straw into biofuel "ethanol" by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia guilliermondii*. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 15, p. 709-721, 2013.
- HAYKIRI-ACMA, H. et al. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v.91, p.759-764, 2010.
- IBÁ - Industria Brasileira de Árvores. **Report 2019**. São Paulo: IBÁ, 2019.
- IEA – International Energy Agency. **CO₂ emissions from fuel combustion: overview**. 14p. 2018a.
- IEA – International Energy Agency. **CO₂ emissions statistics**. 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>>. Acesso em: 15 fev 2018.
- IEA – International Energy Agency. **Renewables information: overview**. 12p. 2018b.
- IMAM, T.; CAPAREDA, S. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 170-177, 2012.
- ISHIDA, Y. et al. Direct analysis of phenolic extractives in wood by thermochemolysis-gas chromatography in the presence of tetrabutylammonium hydroxide. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 78, n. 1, p. 200-206, 2007.

JANIN, G. et al. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELAB System. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 3, n. 1-2, p.03-13, 2001.

JANOWIAK, M. K.; WEBSTER, C. R. Promoting ecological sustainability in woody biomass harvesting. *Journal of Forestry*, v. 108, n. 1, p. 16-23, 2010.

JARDIM, J. M. et al. Equações para estimar a composição química e o poder calorífico de biomassas tratadas termicamente a partir da análise colorimétrica. *Enciclopédia Biosfera*, v. 13, n. 23, p. 1628-1636, 2016.

JIANG, H.; FU, F. Colorimetric and thermochromic properties of reversible thermochromic wood. *Wood Research*, v. 62, n. 1, p. 57-66, 2017.

KAYGUSUZ, K.; SEKERCI, T. Biomass for efficiency and sustainability energy utilization in Turkey. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, v. 5, n. 1, p. 332–341, 2016.

KOPONEN, K. et al. Sustainability of forest energy in Northern Europe Sustainability of forest energy in Northern Europe. VTT Technology, 2015.

LARA, D. M. et al. Avaliação de fragmentos de lenhos carbonizados de Araucariaceae por meio de termogravimetria e infravermelho associadas à análise multivariada. *Química Nova*, v. 40, n. 8, p. 895-901, 2017.

LEITE, E. R. S. et al. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. *Coffee Science*, v. 10, n. 2, p. 251-261, 2015.

LIMA, E. A. et al. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 31, n. 65, p. 9-17, 2011.

LIU, Q. et al. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 82, p. 170-177, 2008.

MACHADO, P. F. O pólo sidero-metalúrgico de Carajás: gênese de uma nova região industrial. *Ensaios FEE*, v. 12, n. 1, p. 158-175, 1991.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira**: informações sobre 90 espécies comerciais. Manaus: SEBRAE-AM, 2000. 212 p.

MARTINS, M. F. et al. Colorimetria como ferramenta de agrupamento de madeira de clones de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 35, n. 84, p. 443-449, 2015.

MATTOS, B. D. et al. Colour changes of brazilian eucalyptus wood by natural weathering. *International Wood Products Journal*, v. 5, n. 1, p. 33-38, 2014.

MEDEIROS NETO, P. N. et al. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas espécies da caatinga. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 4, p. 484-493, 2014.

MELISSARI, B. Ash related with high alkali and its mitigation – experimental evaluation. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, n. 12, p. 31-44, 2014.

- MONTEIRO, M. A. A produção de carvão vegetal na Amazônia: realidades e alternativas. **Papers do NAEA**, n. 173, p. 1-30, 2004.
- MORAIS, S. A. L. et al. Análise da Madeira do *Pinus oocarpa* Parte II: caracterização estrutural da lignina de madeira moída. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 471-478, 2005.
- MORI, C. L. S. O. et al. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.
- MORI, C. L. S. O. et al. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 123-132, 2004.
- MOTA JUNIOR, S. M. O. et al. Physical, mechanical and energetic properties of *Tachigali chrysophylla* under different final carbonization temperatures. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 3, p. 566-573, 2019.
- MOULIN, J. C. et al. Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in amazon rainforest. **Cerne**, v. 23, n. 2, p. 209-218, 2017.
- MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Efeito da termorreificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 069-076, 2011.
- MOUTINHO, V. H. P. et al. Energetic characterization of Matá-Matá wood from the brazilian rainforest (*Eschweilera* Mart Ex Dc). **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 457-461, 2011.
- MOUTINHO, V. H. P. et al. Propriedades químicas e energéticas de madeiras amazônicas do segundo ciclo de corte. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 443-449, 2016.
- MOYA, R.; MARÍN, J. D. Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness. **New Forests**, v. 42, n. 3, p. 329-345, 2011.
- NASSER, R. A. et al. Chemical analysis of different parts of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) using ultimate, proximate and thermo-gravimetric techniques for energy production. **Energies**, v. 9, n. 5, p. 374, 2016.
- NHUCHHEN, D. R.; AFZAL, M. T. HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses. **Bioengineering**, v. 4, n. 1, p. 7, 2017.
- NISHINO, Y. et al. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v. 46, p. 267-272, 2000.
- NONES, D. L. et al. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2015.
- NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280-285, 2017.
- OLIVEIRA, E. et al. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v.27, n.3, 381-385, 2003.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, v. 11, n.1, p. 90-100, 2005.

PEGORETTI, H. J. et al. Colorimetria de pellets de eucalipto y residuos de la cafeicultura y sus relaciones con los parámetros de calidad. **Scientia Forestalis**, v. 47, p. 114-124, 2019.

PEREA-MORENO, M. A. et al. Biomass as renewable energy: worldwide research trends. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 863, 2019.

PEREIRA, B. L. C. et al. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 545-557, 2016a.

PEREIRA, K. N. et al. Surface quality of the *Ficus* sp. wood veneers submitted to finishing treatments. **Madera y Bosques**, v. 23, n. 2, p. 181-191, 2017.

PEREIRA, M. P. C. F. et al. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295-307, out/dez, 2011b.

PROTÁSIO, T. P. et al. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 801-816, 2015.

PROTÁSIO, T. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013.

PROTÁSIO, T. P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011a.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, 2005.

REIS, A. R. S. et al. Comparação entre carvão de coco babaçu e carvão de resíduos madeireiros comercializados em Altamira - PA. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 100-106, 2015.

ROCHA, M. R. V. S. et al. Amazônia oriental: impactos socioambientais em Pequiá de Baixo no Município de Açailândia-Ma. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 12, n. 1/2, p. 1-14, 2015.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. L. A. Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* wood. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 446-452, 2009.

ROTHER, A. et al. Current and potential use of forest biomass for energy in Tasmania. **Biomass and Bioenergy**, v. 80, p. 162-172, 2015.

ROWELL, R. M. Chemical modification of wood: it's application to composite products. **FRI Bulletin**, Bogor, n. 153, p. 57-67, 1990.

ROWELL, R. M. et al. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p.121-138.

SALCA, E.-A. et al. Progress of discoloration in green, freshly cut veneer sheets of black alder (*Alnus glutinosa* L.) wood. **Wood Material Science & Engineering**, v. 10, n. 2, 178-184, 2015.

SANDOVAL-TORRES, S. et al. Causes of colour changes in wood during drying. **Forestry Studies in China**, v. 12, 167–175, 2010.

SANTOS, G. H. F. et al. Biomass as sustainable energy in Brazil. **Revista UNINGÁ**, v. 29, n. 2, p. 6-13, 2017.

SANTOS, L. C. et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.

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

SCHNABEL, T. et al. An approach to classify thermally modified hardwoods by color. **Forest Products Journal**, v. 57, n. 9, p. 105-110, 2007.

SCHONINGER, E. C.; ZINELLI, M. R. Análise qualitativa dos carvões de *Apuleia leiocarpa* e *Hymenaea courbaril* produzidos numa carvoaria de Matupá, no estado de Mato Grosso. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 10, n. 2, p. 135-140, 2012.

SEBIO-PUÑAL, T. et al. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. **Journal of Thermal Analysis and Colorimetry**, v. 109, p. 1163-1167, 2012.

SGARBOSSA, A. et al. Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters. **Fuel**, v. 137, p. 70-76, 2014.

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

SILVA, D. A. et al. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

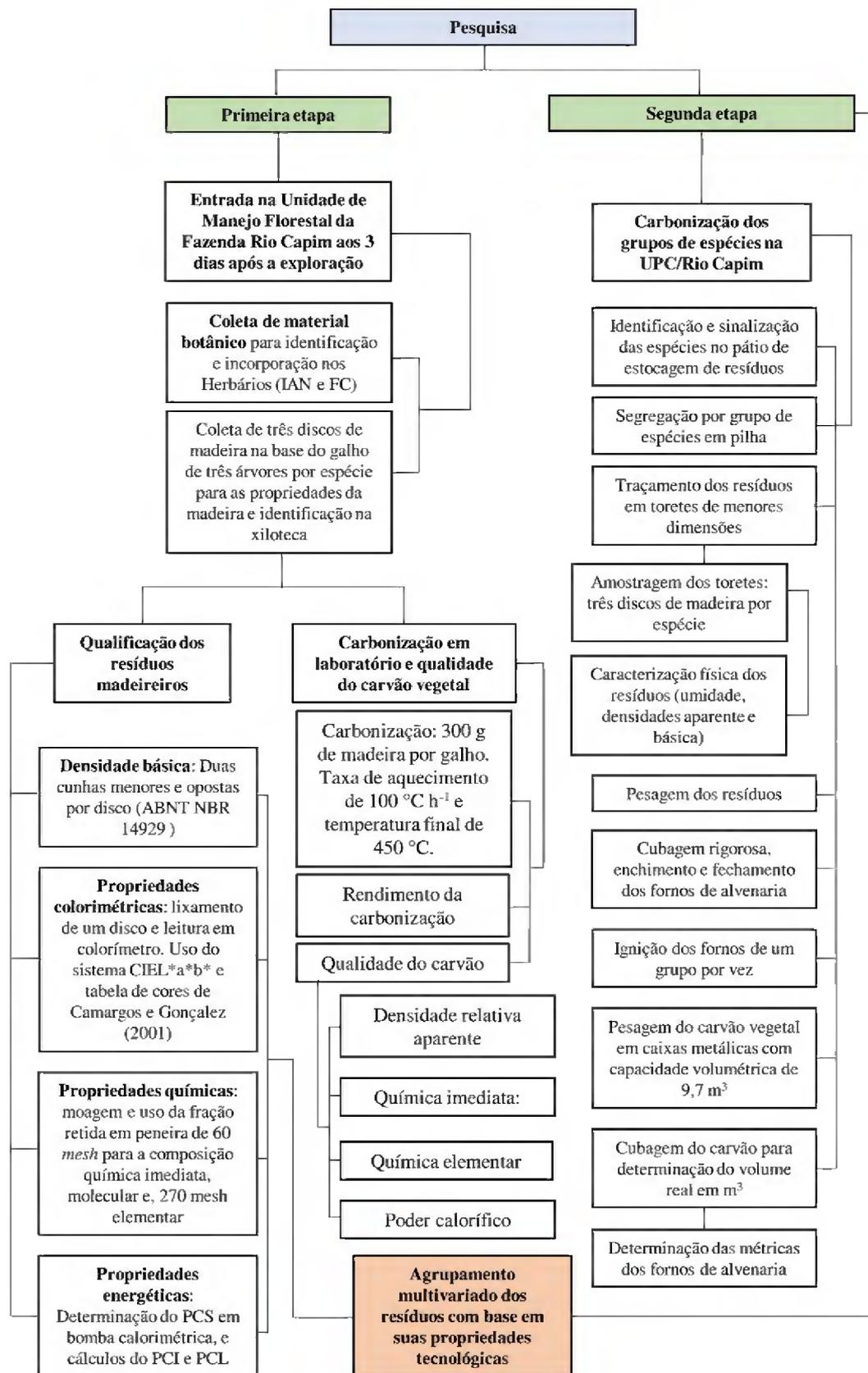
- SILVA, D. A. et al. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthami* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.
- SILVA, M. G. et al. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.
- SOARES, B. C. D. et al. Analyzing the drying behavior of juvenile and mature *Eucalyptus saligna* wood in drastic drying test for optimal drying schedule. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 18, n. 4, p. 543-554, 2016.
- SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.
- SOUZA, M. M. et al. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325-334, 2012.
- SOUZA, N. D. et al. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.
- STANGERLIN, D. M. et al. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4, 2013.
- SUZUKI, K. et al. Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 149-154, 2016.
- TARAN, M. et al. Utilization pattern of fuelwood plants by the Halam community of Tripura, Northeast India. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 38, n. 17, p. 2545-2552, 2016.
- TEIXEIRA, T. R. et al. Forest biomass power plant installation scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 35-47, 2018.
- TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011b.
- TRUGILHO, P. F. et al. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 15, n. 2, p. 144-151, 1991.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). **Scientia Agrária**, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.
- UDDIN, M. N. et al. Sustainable biomass as an alternative energy source: Bangladesh perspective. **Energy Procedia**, v. 160, p. 648-654, fev. 2019.
- UHLIG, A. et al. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 67-85, 2008.

- VALE, A. T. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.
- VAN DEN BROEK, R. et al. Potentials for electricity production from wood in Ireland. **Energy**, v. 26, p. 991-1013, 2001.
- VÁRHEGYI, G. et al. Effects of sample origin, extraction, and hot-water washing on the devolatilization kinetics of chestnut wood. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 10, p. 2356–2367, 2004.
- VASSILEV, S. V. et al. An Overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, p. 913-933, 2010.
- VIDAURRE, G. B. et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.
- VOĆA, N. et al. Proximate, ultimate, and energy values analysis of plum biomass by-products case study: Croatia's potential. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 18, p. 1655-1666, 2016.
- WANG, S. et al. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: a state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 62, p. 33-86, 2017.
- WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83-95, 2017.
- WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 26, p. 1-27, 2000.
- YANG, H. et al. Characteristics of hemicelulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, p. 1781- 1788, 2007.
- YIN, C-Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, v. 90, p. 1128-1132, 2011.
- ZANUNCIO, A. J. V. et al. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 369-374, 2014.
- ZANUNCIO, A. J. V. et al. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of *Eucalyptus* and *Corymbia* logs. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 17, n. 2, p. 543-554, 2015.
- ZANUNCIO, A. J. V. et al. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 353-360, 2013.
- ZHANG, X. et al. Degradation of wood extractives in thermo-mechanical pulp by soybean lipoxygenase. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, p. 866-873, 2007.

5 ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA

Esse estudo dividiu-se em duas etapas principais (Figura 5). A primeira foi a caracterização dos resíduos do manejo florestal sustentável, carbonização em escala de laboratório e agrupamento multivariado dos resíduos em grupos com propriedades tecnológicas similares. Finalmente, a segunda etapa tratou da carbonização em fornos de alvenaria do tipo rabo quente dos grupos de resíduos madeireiros segregados pela análise de componentes principais.

Figura 5 - Organograma geral da pesquisa.



Fonte: O autor.

6 CAPÍTULO 1 – A COLORIMETRIA COMO CRITÉRIO DE SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA PARA BIOENERGIA

Revista alvo: Renewable energy (JCR 5,439/Qualis Capes A2)

RESUMO

A biomassa residual do manejo florestal sustentável na Amazônia mesmo sendo promissora para finalidade bioenergética é altamente heterogênea em termos de dimensões e propriedades tecnológicas da madeira. Portanto, destaca-se a necessidade de segregar estes resíduos levando em consideração algum critério. Nosso estudo buscou estudar o potencial da colorimetria em segregar resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável para a finalidade bioenergética na Amazônia brasileira. Foram amostrados galhos de 20 espécies florestais exploradas na Unidade de Manejo Florestal Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil. As propriedades físicas, energéticas e colorimétricas (sistema CIEL*a*b*) da madeira foram determinadas. A densidade básica do resíduo madeireiro variou de 0,525 g cm⁻³ a 0,895 g cm⁻³. A maior densidade energética foi verificada para os resíduos de *Dinizia excelsa* (18,2 GJ m⁻³). Foram observadas oscilações significativas para L* (40 - 63), a* (5 - 11), b* (9 - 23), C (13 - 25) e h* (45 - 74). Relações negativas entre a densidade básica e L*, b*, C e h* foram verificadas. O modelo linear ajustado para densidade básica em função da luminosidade mostrou que madeiras com L* > 50 apresenta densidade menor que 0,740 g cm⁻³. Os resíduos madeireiros foram separados em grupos, contudo, o mais promissor reuniu as madeiras (*Manilkara elata* e *Dinizia excelsa*) mais escuras (marrom-arroxeadado), mais densas (0,895 g cm⁻³ e 0,891 g cm⁻³) e com maior energia estocada (17,8 GJ m⁻³ e 18,2 GJ m⁻³). Este estudo evidenciou que a colorimetria apresenta potencial de segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para finalidade energética.

Palavras-chave: Sistema CIEL*a*b*, biomassa residual, fonte sustentável, carvão vegetal, lenha

6.1 Introdução

O manejo florestal sustentável (MFS) é a atividade econômica mais viável na utilização dos recursos florestais na Amazônia [1], pois exige que as funções florestais sejam mantidas e o estoque crescente de espécies comerciais se recupere durante cada

ciclo de corte [2,3]. Esta atividade preconiza as diretrizes da Exploração de Impacto Reduzido (EIR), que consiste em um conjunto de práticas silviculturais realizadas por profissionais treinados durante as operações de pré-colheita, colheita e pós-colheita. A EIR baseia-se no planejamento de operações, treinamento de pessoal e investimentos no manejo florestal [4]. Dessa forma, mostra-se uma ferramenta importante para mitigar os impactos destrutivos da exploração florestal convencional e reduzir as taxas de desmatamento da Amazônia [5].

No Brasil, conforme a Lei 4.771, Artigo 5, 11 de dezembro de 2006 [6] e Instrução Normativa SEMA nº 05 de 10 de setembro de 2015, do estado do Pará [7], os planos de manejo florestal sustentável podem solicitar intensidade de corte de até 30 m³ por hectare do volume das árvores das espécies selecionadas dentro de cada unidade de trabalho, em um ciclo de no máximo 35 anos. Além disso, o diâmetro (DAP) mínimo de corte das árvores a serem exploradas deve ser de 50 cm.

Diferentes intensidades de corte resultam em diferentes quantidades de resíduos gerados durante a exploração de impacto reduzido. Os galhos, restos de troncos, sapopemas, árvores tombadas durante a derruba e partes de troncos não aproveitáveis durante o traçamento se enquadram como resíduos do manejo florestal [8,9]. Para cada tonelada de madeira comercial extraída de forma sustentável na Amazônia, pode-se gerar até 2.13 toneladas de resíduos [10]. Diversos estudos reportam a alta quantidade de resíduos madeireiros gerados pela técnica de EIR em planos de manejo neste bioma [11–13].

Devido a maior parte dos resíduos serem provenientes de espécies madeireiras de densidade básica variando de média a alta ($\geq 0,5 \text{ g cm}^{-3}$), estas biomassas são consideradas promissoras para geração de calor, eletricidade, combustíveis líquidos e sólidos para finalidades domésticas e industriais nos estados da Amazônia brasileira [14,15]. A densidade básica da madeira é um parâmetro qualitativo importante para a produção de carvão vegetal. Pesquisas reportam que quanto maior a densidade da madeira, maior a densidade relativa aparente e resistência mecânica do carvão vegetal [16,17]. Adicionalmente, estudos mostram relação positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade energética [18,19], portanto, priorizam-se madeiras com densidade básica elevada para geração direta de energia, cogeração e produção de carvão vegetal.

Nessa perspectiva, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa brasileira pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia do Brasil, tem buscado nos últimos anos dar maior visibilidade ao potencial de aproveitamento dos resíduos do manejo florestal para a finalidade energética [20], pois, além de ser considerada uma boa prática

do ponto de vista ambiental, é uma alternativa para o abastecimento dos sistemas energéticos isolados nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará, que compreendem territorialmente a maior parte da Amazônia Brasileira. A biomassa residual do manejo florestal é muito promissora para o abastecimento do polo siderúrgico de Carajás, segundo maior do Brasil, localizado entre os estados do Maranhão e Pará. Este polo siderúrgico foi responsável por 9,8% (403.431 tons) da produção de ferro-gusa no Brasil no ano de 2018 [21].

O problema da utilização desses resíduos madeireiros está atrelado à heterogeneidade (dimensões e propriedades tecnológicas da madeira) e condições de estoque, normalmente armazenados sem nenhum tipo de proteção contra as chuvas. Como consequência, os resíduos apresentam baixa densidade energética, o que dificulta o seu uso como matéria-prima para geração de energia [22,23]. Adicionalmente, constata-se que a produção de carvão vegetal de resíduos madeireiros no estado do Pará é majoritariamente realizada em fornos rudimentares de alvenaria [24], sem nenhum critério técnico de segregação de resíduos na etapa de enchimento dos fornos [25]. Por isso, ocorre baixo rendimento gravimétrico (entre 15% e 25%) e qualidade insatisfatória do carvão [26], alta quantidade de atíço produzido, maior tempo de resfriamento dos fornos e elevadas emissões de gases poluentes gerados durante a pirólise [25].

Destaca-se a necessidade de agrupar os resíduos madeireiros do manejo com propriedades similares visando ganhos na quantidade e qualidade energética do biocombustível. A literatura evidencia estudos de agrupamentos de madeiras de *Tectona grandis* [27] e *Eucalyptus* sp. [28] com base na similaridade cromática. Nesse sentido, evidencia-se a necessidade de pesquisas que avaliem a potencialidade do uso da colorimetria para segregação de madeira residual do manejo florestal para produção bioenergética na Amazônia. A colorimetria mostra-se uma técnica promissora para avaliar biomassas residuais. Esta técnica já foi empregada para avaliar os efeitos do ataque de agentes biodeterioradores [29], ação do intemperismo [30], processos termorretilificadores [31,32] e produtos de acabamento [33] na qualidade da madeira. Além disso, estudos evidenciam a aplicação da colorimetria na simples caracterização colorimétrica para identificação e classificação de madeiras [34] e na avaliação da qualidade de pellets [35,36].

Portanto, essa pesquisa foi conduzida com base nas seguintes questões científicas: (i) Quais as relações existentes entre as propriedades colorimétricas, físicas e energéticas da madeira residual do manejo florestal da Amazônia?; e (ii) A colorimetria apresenta potencial de segregação dos resíduos do manejo florestal? Nossas hipóteses são: (i)

madeiras com tonalidades mais escuras apresentam densidades básica e energética elevadas, o que as torna promissoras para a finalidade energética; e (ii) A colorimetria tem potencial de discriminar resíduos com maior potencial de geração de energia. Os objetivos do trabalho foram: (i) Analisar as madeiras residuais quanto as propriedades colorimétricas, físicas e energéticas; e (ii) Testar a colorimetria como ferramenta de segregação dos resíduos madeireiros.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Origem do material biológico

Foram coletados resíduos da copa de árvores de 20 espécies florestais exploradas na Unidade de Manejo Florestal Fazenda Rio Capim (UMF Rio Capim), localizada na cidade de Paragominas, Pará, Brasil. A Fazenda Rio Capim, propriedade da empresa CKBV Florestal Ltda., encontra-se entre as coordenadas geográficas $3^{\circ} 30'$ e $3^{\circ} 45'$ de latitude sul e $48^{\circ} 30'$ e $48^{\circ} 45'$ de longitude a oeste do meridiano de Greenwich (Fig. 1).

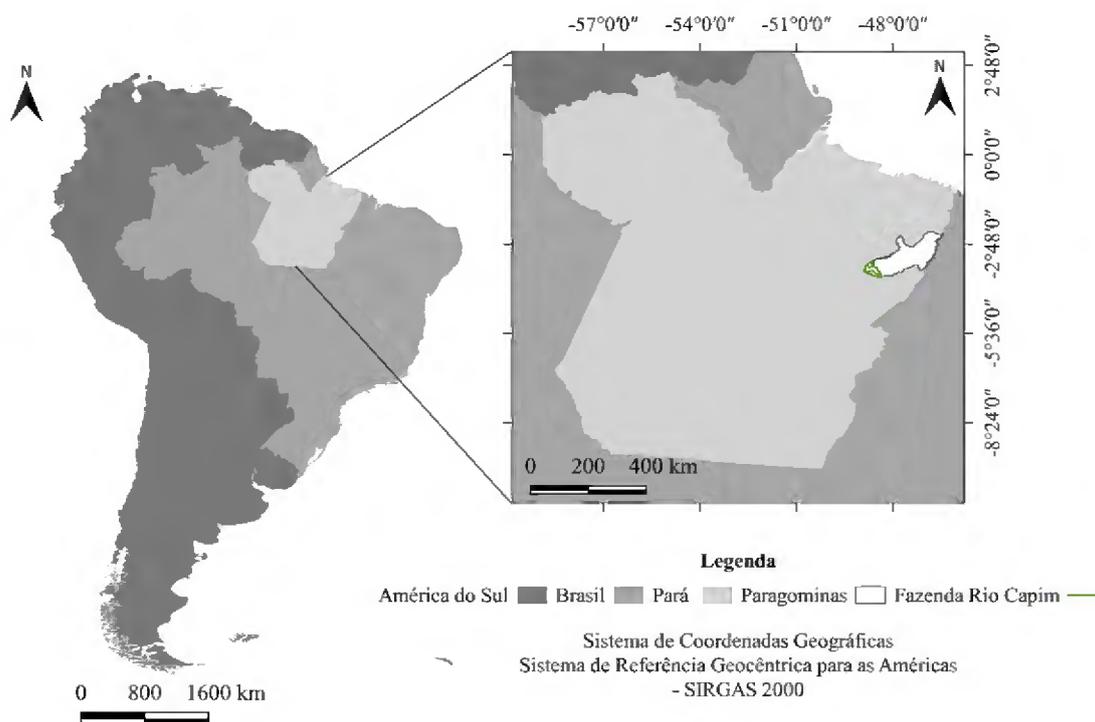


Fig. 1. Localização da Unidade de Manejo Floresta da Fazenda Rio Capim, em Paragominas, Pará, Brasil.

A região em que o município de Paragominas está inserido apresenta o clima do tipo Aw. A temperatura média é de $26,6^{\circ}\text{C}$ e o total pluviométrico médio anual de 1.805 mm [37]. Segundo Veloso et al. [38], a tipologia da vegetação na área de estudo é Floresta Ombrófila Densa Submontana.

6.2.2 Coleta dos discos de madeira

Foram realizadas coletas de discos de madeira aos três dias após a exploração florestal na UMF Rio Capim, devido aos riscos de queda de outras árvores. A amostragem foi feita em três árvores de 20 espécies florestais comerciais. Em cada árvore foram coletados três discos da base dos galhos de maior diâmetro da copa (Fig. 2) visando à identificação das espécies pela Xiloteca da Embrapa Amazônia Oriental e análises das propriedades físicas e colorimétricas da madeira. Os discos foram armazenados em laboratório, condições que proporcionaram a secagem à sombra.

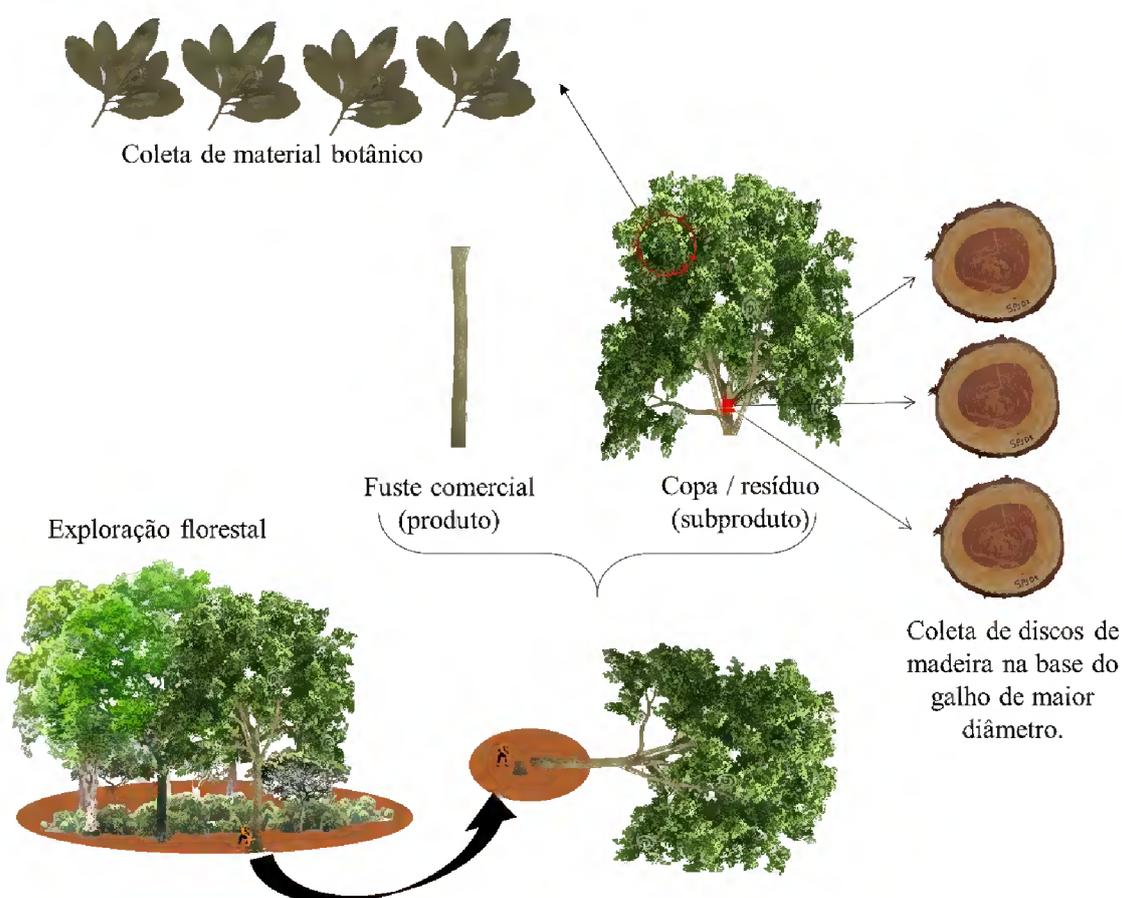


Fig. 2. Esquema de amostragem dos resíduos na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

6.2.3 Identificação botânica das espécies

Foram coletadas quatro amostras de ramos com folhas quando a árvore não apresentava material reprodutivo (fruto ou flor) (Fig. 2), e quando apresentava, foram coletadas cinco amostras de ramos com folhas e frutos ou flores. O material botânico foi encaminhado ao Herbário da Embrapa Amazônia Oriental (indexado pelo *Index*

Herbariorum como IAN) localizado em Belém, Pará, com vistas a identificação e incorporação do material ao acervo do Herbário. A metodologia seguida na amostragem do material botânico está descrita na Fig. 3. Além do material botânico, corpos de prova de madeira com dimensões de 7 cm x 7 cm x 7 cm auxiliaram à identificação na Xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental.



Fig. 3. Etapas da coleta botânica: (i) escolha do melhor ramo a ser coletado (A); (ii) organização do ramo no jornal (B e C); (iii) prensagem do material botânico (D); (iv) acondicionamento do material em sacos plásticos com tratamento de álcool 90% (E); e (v) montagem das exsicatas no herbário (F).

Foram identificadas 20 espécies de 8 famílias botânicas, das quais, 17 foram depositadas no acervo do Herbário IAN (<http://brahms.cpatu.embrapa.br/>) e 2 no Herbário Felisberto Camargo da Universidade Federal Rural da Amazônia (Tabela 1). Apenas uma espécie não foi depositada em herbário ou xiloteca, pois não tinha material botânico disponível na época da coleta, apenas madeira.

1 **Tabela 1**
 2 Espécies amazônicas amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

N	Familia	Nome científico	Nome comum	CRH	CRX
1	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu barrote	IAN198000*	X8712
2	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana	IAN198001*	X8725
3		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá	IAN197990*	X8717
4	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca	IAN197991*	X8713
5		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau	IAN197997*	-
6	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba	IAN197994*	X8715
7	Humiriaceae	<i>Vantanea parviflora</i> Lam.	Uxirana	FCUFRA7585**	-
8	Lecythidaceae	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	Tauari-liso	IAN197992*	X8724
9		<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco	IAN197996*	X8726
10		<i>Eschweilera pedicellata</i> (Rich.) S.A.Mori	Matamatá	FCUFRA7584**	-
11		<i>Eschweilera grandiflora</i> (Aubl.) Sandwith	Matamatá-preto	IAN197987*	X8721
12		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia	IAN197988*	X8723
13		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana	IAN197995*	X8714
14		<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	IAN197998*	X8718
15	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	Orelha-de-macaco	-	-
16		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana	IAN197989*	X8711
17	Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba	IAN197993*	X8720
18		<i>Pouteria oblanceolata</i> Pires	Abiu	IAN197999*	X8722
19		<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana	IAN197986*	X8716
20		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha	IAN197985*	X8719

3 *Espécies depositadas no Herbário IAN; **Espécies depositadas no Herbário Felisberto Camargo; CRH = Código de Registro no Herbário; CRX = Código de Registro na
 4 Xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará, Brasil.

5

6

As excisatas das 19 espécies depositadas em herbários estão dispostas na Fig. 4.

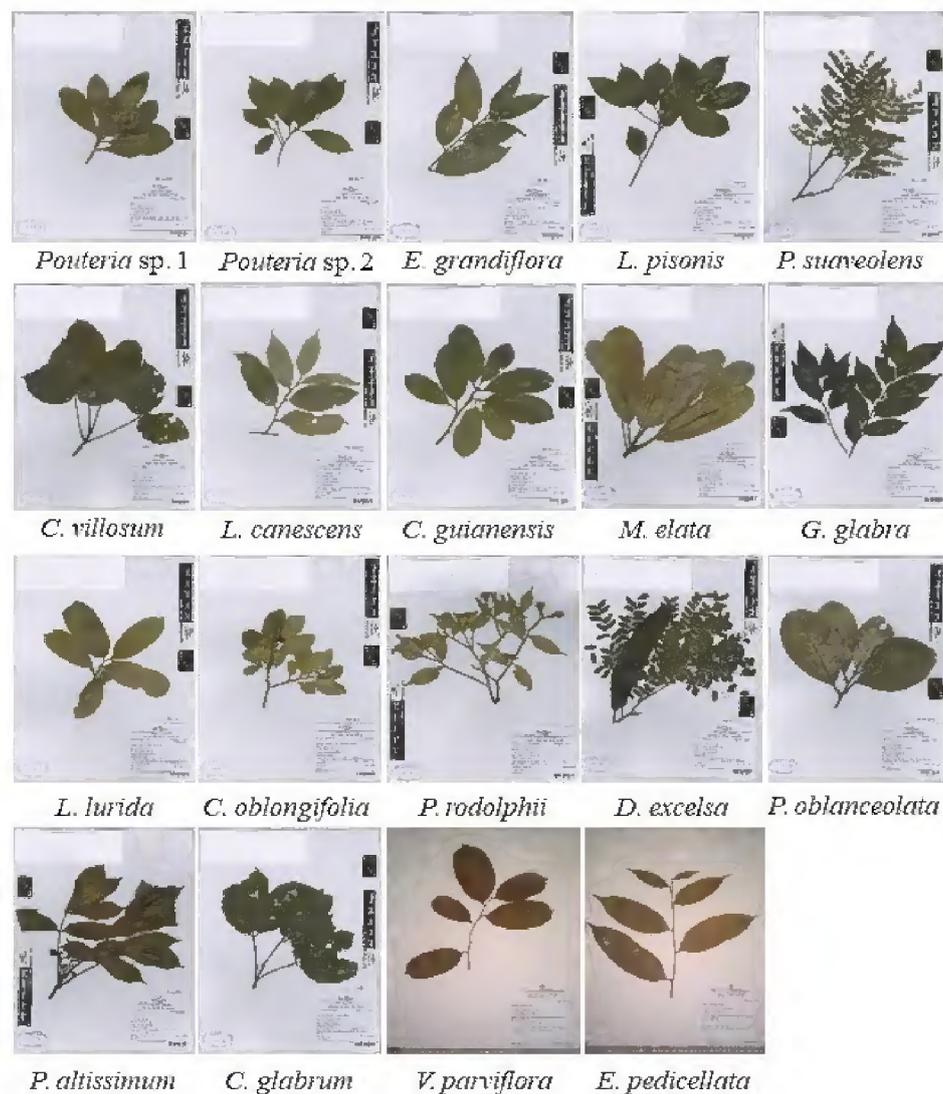


Fig. 4. Excisatas das espécies florestais identificadas e depositadas nos Herbários IAN e Felisberto Camargo em Belém, Pará, Brasil.

6.2.4 Propriedades físicas e energéticas da madeira

Para a determinação das propriedades físicas da madeira foi utilizado um disco de cada árvore. A umidade da madeira foi determinada mediante diretrizes da NBR 14929 [39]. Os discos foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula. As duas menores cunhas e opostas foram utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira, que foi realizada pelo método de imersão em água de acordo com a norma NBR 11941 [40]. A densidade básica foi calculada como sendo a média aritmética das densidades verificadas para as duas cunhas opostas retiradas por disco. As espécies foram

classificadas em classes de densidade (Muito baixa: 0,200 – 0,300 g cm⁻³; Baixa: 0,300 – 0,500 g cm⁻³; Média: 0,500 – 0,750 g cm⁻³; Alta: 0,750 – 1,000 g cm⁻³; e Muito alta > 1,000 g cm⁻³), conforme Csanády et al. [41].

A propriedade energética avaliada nesse estudo foi a densidade energética, calculada levando em consideração o poder calorífico superior e a densidade básica da madeira dos resíduos (Equação 1). A determinação do poder calorífico superior (PCS) considerou as frações das amostras de madeira previamente moídas que passaram pela peneira de 40 *mesh* e ficaram retidas na peneira de 60 *mesh*. O poder calorífico superior (PCS), base massa seca, foi determinado em uma bomba calorimétrica digital (modelo IKA C-200®), conforme descrito na norma E711-87 [42].

$$DE = PCS \times DB \quad (1)$$

Em que, DE: Densidade energética (MJ m⁻³); PCS: Poder calorífico superior (MJ kg⁻¹); e DB: Densidade básica (kg m⁻³).

6.2.5 Mensuração dos parâmetros colorimétricos

Foi utilizado o sistema CIEL*a*b* para a caracterização colorimétrica das madeiras, segundo os preceitos da Commission Internationale de L'Eclairage e é composto por três coordenadas: luminosidade ou claridade (L*) no eixo preto e branco (varia de 0 a 100), matiz do eixo verde-vermelho (a*) e azul-amarelo (b*), ambos variando entre -60 a +60 [43,44].

As leituras dos parâmetros cromáticos foram realizadas em um colorímetro portátil Konica Minolta (modelo CR-400) com abertura do sensor de 8 mm. O equipamento foi calibrado com auxílio de duas referências fornecidas pelo equipamento, uma com L*= 100 (branco total) e outra com L*= 0 (preto total). O aparelho foi configurado para o uso de fonte de luz (iluminante) D65, composto de uma lâmpada de xenônio, o qual simula a radiação solar diurna, com um ângulo de observação de 10° em temperatura ambiente e área de iluminação de 11 mm de diâmetro.

Antes da leitura dos parâmetros cromáticos, os discos de madeira foram devidamente lixados com lixas de granulometrias de 40, 80, 110 e 220, devido à oxidação da superfície da madeira que altera sua tonalidade natural. Foram realizadas 10 leituras aleatórias, em pontos equidistantes, na face transversal de um disco por árvore. Dessa maneira, foram obtidos os parâmetros colorimétricos: luminosidade (L*), coordenada cromática verde-vermelho (a*), coordenada cromática azul-amarelo (b*), saturação da

cor (C) e ângulo de tinta (h^*). As Equações 2 e 3 foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros C e h^* . A especificação das cores de cada espécie foi realizada com base na tabela de cores descrita por Camargos e Gonzalez [45].

$$C = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0,5} \quad (2)$$

Em que, C: Cromaticidade; a^* : Coordenada cromática verde-vermelho; b^* : Coordenada cromática azul-amarelo .

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3)$$

Em que, h^* : Ângulo de tinta; b^* : Coordenada cromática azul-amarelo ; a^* : Coordenada cromática verde-vermelho.

6.2.6 Análises estatísticas dos dados

Foram realizadas análises de variância univariadas adotando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) para todas as variáveis estudadas. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$) e de Bartlett ($p \leq 0,05$), para testar a normalidade dos resíduos e a homocedasticidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANAVA) visando avaliar o efeito de espécie nas propriedades das madeiras residuais. Finalmente, foi aplicado o teste de Scott-Knott para verificação da similaridade das espécies, em nível de significância de 5%. As relações existentes entre as características físicas, energéticas e colorimétricas da madeira foram verificadas por meio do coeficiente de correlação de Pearson. Além disso, foram ajustados modelos polinomiais lineares para a densidade básica e densidade energética em função dos parâmetros colorimétricos da madeira.

Para a análise de componentes principais, foram utilizadas as médias das propriedades físicas (densidade básica e umidade), colorimétricas (L^* , a^* , b^* , C e h^*) e energética (densidade energética) da madeira. A dispersão dos escores das componentes principais permitiu o agrupamento das espécies com características similares visando à produção bioenergética. As análises estatísticas foram feitas no software R® versão 3.4.3 [46].

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Densidades básica e energética dos resíduos

Com base no teste F, foi observada diferença significativa entre as espécies estudadas para a densidade básica (p -valor $< 0,001$). O teste Scott-Knott formou quatro grupos de espécies, em que a variação foi $0,525 \text{ g cm}^{-3}$ (*C. guianensis*) – $0,895 \text{ g cm}^{-3}$ (*M. elata*) (Fig. 5). A variação encontrada para a densidade básica está atrelada as distintas taxas de crescimento, em que espécies de maiores densidades apresentam o crescimento menos acelerado e, portanto, maior investimento de energia na rigidez do tronco [47]. Outros fatores interferem na densidade básica, como o teor de extrativos, fatores edáficos, topográficos, sazonalidade, disponibilidade hídrica e fenologia [48].

Em nosso estudo, o maior número de espécies (55%) está localizado no segundo grupo, cuja densidade oscila de $0,683 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,773 \text{ g cm}^{-3}$ (Fig. 5). Nogueira et al. [49] avaliando a densidade básica de 186 espécies florestais da Amazônia Central, evidenciaram que 0,5% das espécies se enquadravam como madeira de densidade muito baixa, 4,3% baixa, 72,6% média e 22,6% alta, se adotada a classificação de Csanády et al. [41]. A densidade básica média verificada no estudo supracitado foi de $0,675 \text{ g cm}^{-3}$, majoritariamente, espécies de densidade média. Outros estudos corroboraram o predomínio de espécies de densidade básica média na Amazônia [50–53].

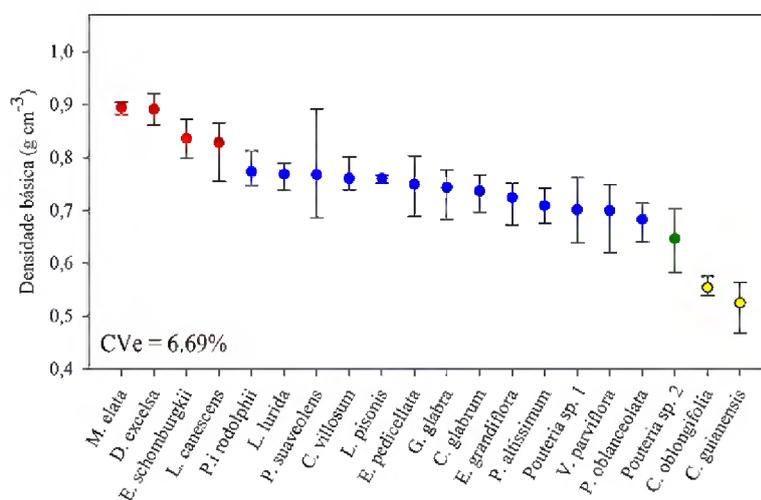


Fig. 5. Grupos de espécies formados pelo teste de Scott-Knott para densidade básica, em que as barras se referem aos valores máximo e mínimo. Em que: CVe – Coeficiente de variação experimental.

A Fig. 6 discrimina as espécies conforme a classificação da densidade básica proposta por Csanády et al. [41]. Foi verificado que 55% das espécies estudadas

apresentam densidade média (*E. pedicellata*, *G. glabra*, *C. glabrum*, *E. grandiflora*, *P. altissimum*, *Pouteria* sp. 1, *V. parviflora*, *P. oblanceolata*, *Pouteria* sp. 2, *C. oblongifolia* e *C. guianensis*) e 45% densidade alta (*M. elata*, *D. excelsa*, *E. schomburgkii*, *L. canescens*, *P. rodolphii*, *L. lurida*, *P. suaveolens*, *C. villosum* e *L. pisonis*).

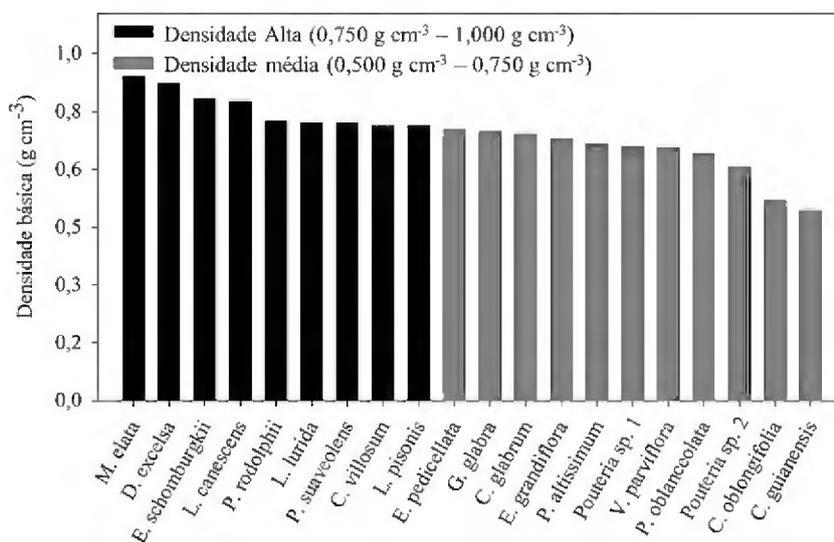


Fig. 5. Classificação da densidade básica da madeira dos resíduos madeireiros de vinte espécies tropicais baseada na metodologia de Csanády et al. [41].

Para a produção bioenergética são recomendáveis madeiras de densidade acima de $0,5 \text{ g cm}^{-3}$ [54], o que credencia todas as espécies estudadas para a conversão termoquímica. O uso de madeiras de maior densidade para produção de carvão vegetal tem reflexos positivos na massa de madeira enforada, produtividade dos fornos e na densidade relativa aparente desse produto energético [55]. Relação linear positiva entre a densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal já foi evidenciada em estudos anteriores [16,56]. Na combustão, madeira de elevada densidade implica na redução do consumo específico de lenha e aumento da eficiência de conversão energética do reator [57]. Ressalta-se a necessidade de segregar os resíduos do manejo em classes de densidade visando reduzir as perdas energéticas oriundas da utilização de biomassa residual heterogênea sem critério de segregação.

Madeiras de densidade básica média apresentam maior taxa de secagem [58], conseqüentemente, menor tempo de carbonização e combustão, se comparada às espécies de densidade mais elevada. A taxa de secagem é dependente da densidade básica, entretanto, essas duas variáveis são inversamente proporcionais [59]. Essa informação corrobora a necessidade de segregação dos resíduos do manejo florestal, pois madeiras

de menor densidade poderão apresentar maior conteúdo de umidade e, conseqüentemente, maior tempo na fase de secagem dos processos energéticos de conversão (fase endotérmica).

A densidade energética dos resíduos madeireiros variou de 10,2 MJ m⁻³ a 18,2 MJ m⁻³ (Fig. 7). As espécies *D. excelsa*, *M. elata* e *E. schomburgkii* formaram o grupo com as maiores médias de densidade energética, portanto, mais promissoras para serem utilizadas em sistemas de conversão energética na Amazônia.

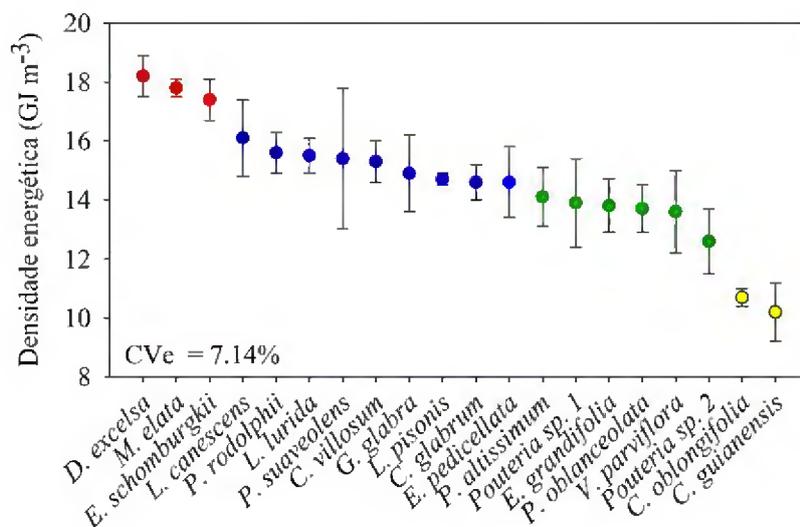


Fig. 7. Densidade energética dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira. Em que: CVe – Coeficiente de variação experimental.

Em nosso estudo foi evidenciada tendência similar entre a densidade básica e densidade energética, pois as espécies *D. excelsa*, *M. elata* e *E. schomburgkii* também apresentaram as maiores densidades básicas. A densidade energética da madeira é um parâmetro importante, pois revela o potencial energético de um determinado volume de biomassa tem para geração de energia [60]. Assim, madeiras com maior densidade energética, como *D. excelsa*, *M. elata* e *E. schomburgkii*, são mais indicadas para produção de energia em sistemas modernos de cogeração, pois produzirão mais energia por unidade de volume de madeira residual.

6.3.2 Propriedades colorimétricas dos resíduos

O teste F mostrou que não houve efeito de espécie na umidade (base massa seca) da madeira residual (Tabela 2). Em contrapartida, houve diferença significativa ($p \leq 0,05$)

para todos os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C e h^*), evidenciando efeito de espécie nestes parâmetros (Tabela 2).

Tabela 2

Valores médios da umidade da madeira e parâmetros colorimétricos dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira.

Espécie	Ubs	L^*	a^*	b^*	C	h^*
<i>C. oblongifolia</i>	15,9 ± 0,6 a	63 ± 2,7 a	8 ± 1,3 b	23 ± 1,7 a	24 ± 1,9 a	71 ± 2,3 a
<i>C. guianensis</i>	16,0 ± 0,8 a	61 ± 4,1 a	6 ± 1,8 c	20 ± 1,5 b	20 ± 1,9 b	74 ± 3,9 a
<i>C. glabrum</i>	16,4 ± 0,8 a	58 ± 3,1 a	7 ± 0,5 b	20 ± 2,8 b	21 ± 2,6 b	68 ± 3,6 a
<i>L. pisonis</i>	22,1 ± 9,5 a	54 ± 5,6 b	10 ± 2,0 a	22 ± 3,2 a	24 ± 2,9 a	65 ± 6,6 b
<i>G. glabra</i>	15,0 ± 0,3 a	53 ± 5,2 b	8 ± 1,0 b	16 ± 1,6 c	18 ± 1,3 c	64 ± 4,5 b
<i>E. pedicellata</i>	16,8 ± 0,5 a	53 ± 0,8 b	5 ± 0,3 c	16 ± 0,6 c	17 ± 0,6 c	71 ± 1,6 a
<i>P. suaveolens</i>	15,7 ± 0,6 a	53 ± 6,1 b	8 ± 1,9 b	16 ± 2,0 c	18 ± 1,7 c	65 ± 7,5 b
<i>C. villosum</i>	16,8 ± 0,9 a	52 ± 3,9 b	6 ± 1,3 c	16 ± 2,8 c	17 ± 3,0 c	71 ± 2,1 a
<i>P. altissimum</i>	15,4 ± 0,5 a	52 ± 0,5 b	11 ± 0,7 a	23 ± 2,3 a	25 ± 2,4 a	64 ± 1,0 b
<i>Pouteria</i> sp. 2	15,7 ± 0,5 a	49 ± 3,6 c	11 ± 0,8 a	17 ± 2,1 c	20 ± 1,9 b	58 ± 3,6 c
<i>E. schomburgkii</i>	15,8 ± 0,0 a	48 ± 2,1 c	7 ± 0,6 c	15 ± 1,7 c	16 ± 1,7 d	65 ± 1,1 b
<i>E. grandiflora</i>	16,6 ± 0,4 a	48 ± 2,3 c	9 ± 0,6 a	15 ± 1,2 c	18 ± 1,3 c	60 ± 2,1 b
<i>Pouteria</i> sp. 1	16,3 ± 0,6 a	48 ± 1,2 c	8 ± 2,2 a	16 ± 2,1 c	18 ± 2,8 c	62 ± 3,5 b
<i>P. rodolphii</i>	16,7 ± 0,2 a	47 ± 3,7 c	10 ± 1,1 a	17 ± 2,3 c	19 ± 2,3 c	60 ± 3,4 b
<i>P. oblanceolata</i>	17,0 ± 0,9 a	47 ± 3,0 c	9 ± 0,7 a	17 ± 1,1 c	20 ± 0,8 c	62 ± 2,9 b
<i>L. lurida</i>	16,7 ± 1,1 a	46 ± 2,6 c	8 ± 0,3 b	16 ± 1,6 c	18 ± 1,5 c	63 ± 2,0 b
<i>L. canescens</i>	16,5 ± 0,3 a	45 ± 3,0 c	8 ± 0,1 b	14 ± 1,0 d	16 ± 0,8 d	58 ± 2,5 c
<i>V. parviflora</i>	17,5 ± 0,3 a	45 ± 0,7 c	9 ± 1,0 a	13 ± 1,2 d	16 ± 1,6 d	55 ± 0,8 c
<i>M. elata</i>	16,7 ± 0,3 a	40 ± 1,0 d	9 ± 0,6 a	10 ± 1,4 e	14 ± 1,3 d	47 ± 2,3 d
<i>D. excelsa</i>	16,1 ± 0,2 a	39 ± 2,2 d	9 ± 0,7 a	9 ± 1,0 e	13 ± 1,1 d	45 ± 2,3 d
CVe (%)	5,48	6,55	13,75	11,38	10,16	5,48

CVe = Coeficiente de variação experimental; Ubs = Umidade (base massa seca); L^* = Luminosidade; a^* = Coordenada cromática verde-vermelho; b^* = Coordenada cromática azul-amarelo; C = Cromaticidade; e h^* = Ângulo de tinta. Valores dentro dos parênteses são as médias ± desvios padrões. Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Scott Knott test ao nível de 5% de significância.

As madeiras residuais estavam com a umidade abaixo do ponto de saturação das fibras e em equilíbrio higroscópico. Dessa forma, o teor de água não influenciou na variação das propriedades colorimétricas, pois todas as espécies estavam em condições semelhantes de umidade conforme evidenciou o teste estatístico de Scott-Knott. Madeiras secas são importantes não somente para os estudos colorimétricos, mas, também, para o uso energético. Mononen et al. [61] estudando a influência da secagem da madeira nos parâmetros colorimétricos, reportaram redução da luminosidade e pigmentação amarela da madeira em resposta a redução da umidade pela secagem convencional. Os autores atrelaram à redução dos pigmentos amarelos a perda ou decomposição dos compostos cromóforos, que são os principais responsáveis pela coloração amarela da madeira

associados à lignina. Essa afirmação corrobora que a umidade interfere na colorimetria e enfatiza a necessidade de secagem das madeiras residuais visando maximizar seu potencial energético.

Os parâmetros colorimétricos tiveram as seguintes variações: 40 - 63 (L*); 5 - 11 (a*); 9 - 23 (b*); 13 - 25 (C); e 45 - 74 (h*) (Tabela 5). Silva et al. [62] avaliando as propriedades colorimétricas de trinta espécies tropicais comercializadas no Brasil, verificaram variações semelhantes para os parâmetros L* (40,4 – 83,6), a* (3,0 – 18,9), b* (4,9 – 29,6), C (15,5 – 33,7) e h* (14,4 – 82,3). Estes autores destacaram que a cor da madeira pode ser influenciada especialmente pela idade, umidade, características anatômicas e químicas da madeira. Adicionalmente, Moya e Marín [27] evidenciaram a fertilidade do solo e as condições climáticas como fatores importantes na formação da cor da madeira.

As espécies do gênero *Couratari* formaram o grupo com os maiores valores para o parâmetro L*, evidenciando tonalidades mais claras nas madeiras [63]. Em contrapartida, as espécies *M. elata* e *D. excelsa* se destacaram com valores inferiores. Madeira com baixos valores para L* tendem a ter superfícies mais escuras [62,64]. Camargos e González [45] destacaram que a luminosidade define a escala cinza entre o branco e o preto, assume o valor 0 para o preto absoluto e 100 para o branco total, dessa forma, quanto mais próximo de zero mais escura é a superfície da madeira.

As madeiras de *P. altissimum*, *Pouteria* sp. 2, *L. pisonis*, *Pouteria* sp. 1, *E. grandiflora*, *P. rodolphii*, *P. oblanceolata*, *V. parviflora*, *M. elata* e *D. excelsa* compreenderam o grupo com maior pigmentação vermelha, pois apresentaram os maiores valores para a coordenada cromática a*. No contrário, as madeiras de *E. pedicellata*, *C. villosum* e *C. guianensis* tiveram menores tendências ao avermelhamento de suas madeiras (Tabela 5). Moya e Berrocal [65] verificaram relação negativa entre a* e taxa de crescimento em árvores de *T. grandis*, evidenciando que madeiras com maior taxa de crescimento, portanto de densidade básica menor, apresenta níveis de pigmentação vermelha menor.

As características colorimétricas da madeira dependem de componentes químicos específicos que interagem com a luz [66], são eles os extrativos e a lignina [65,67]. Garcia e Marinonio [68] mostraram que o nível de pigmentação vermelha na madeira está associado ao teor de extrativos da madeira. Yazaki et al. [69] verificaram que em madeira de *Eucalyptus pilularis*, a vermelhidão (a*) pode aumentar proporcionalmente ao conteúdo de substâncias químicas extraíveis em água quente. Dessa forma, sugere-se que

as madeiras com maior pigmentação vermelha apresentem valores elevados de extrativos, especialmente os fenólicos [70]. Para produção energética, são preferíveis madeiras com alto teor de extrativos, pois maior será a energia gerada pela queima direta da lenha [71]. Assim, priorizam-se madeiras com níveis elevados de pigmentação vermelha.

A coordenada b^* apresentou maior número de grupos formados pelo teste de Scott Knott, se consideradas as demais variáveis colorimétricas. O maior número de grupos indica que as madeiras estudadas apresentam uma variação considerável quanto à pigmentação amarela. Gierlinger et al. [72] evidenciaram que a coordenada b^* é fortemente influenciada pela fotoquímica dos componentes químicos da parede celular (celulose, hemiceluloses e lignina). Mori et al. [67] reportaram que a variação de b^* está atrelado ao comprimento de fibra das madeiras e aos níveis de lignina solúvel das espécies tropicais analisadas, em que madeiras com menores comprimentos de fibra e teores de lignina solúvel apresentam forte influência de pigmentação amarela na formação da cor. Adicionalmente, Moya e Calvo-Alvarado [73] mostraram que a variação encontrada no parâmetro b^* pode ser ligada as variações ambientais (variáveis edafoclimáticas).

As madeiras de *D. excelsa* e *M. elata* apresentaram as menores intensidades de amarelecimento, enquanto que as madeiras de *C. oblongifolia*, *P. altissimum* e *L. pisonis* destacaram-se pelas maiores intensidades desse parâmetro (Tabela 5). Em nosso estudo, as madeiras com maiores influências da pigmentação amarela na formação da cor, apresentaram as menores densidades básicas e densidade energéticas. Assim, madeiras com valores elevados para b^* são menos promissoras para bioenergia.

De modo geral, as espécies de maiores densidade básica e densidade energética (*D. excelsa* e *M. elata*) foram mais influenciadas pela pigmentação vermelha em suas madeiras. Isso pode ser explicado pela proporção de a^* e b^* na madeira, pois *M. elata* e *D. excelsa* tiveram resultados elevados para a^* e inferiores para b^* , mostrando-se mais avermelhada por ter menor pigmentação amarela.

A saturação de cor (C) apresentou comportamento similar ao amarelecimento. As espécies *C. oblongifolia*, *L. pisonis* e *P. altissimum* formaram o grupo com as maiores médias (24, 24 e 25), dessa forma, representam o grupo com as cores mais puras. Em contrapartida, *D. excelsa* e *M. elata*, fazem parte do grupo com os menores valores médios. A saturação de cor (C) é um parâmetro colorimétrico muito influenciado pelas coordenadas cromáticas a^* e b^* , em que valores elevados para essas duas coordenadas cromáticas resultarão na elevação dos valores para saturação [63,74].

Meints et al. [66] estudaram as propriedades colorimétricas de vinte e quatro espécies florestais da Europa Central. Eles verificaram que a intensificação da cor, expressada pela variável C, pode ser influenciada pela quantidade e composição dos extrativos da madeira. A saturação de cor é um parâmetro relacionado ao grau de pureza da cor, isto é, ao quanto à cor é diluída pela luz branca. Graficamente, a saturação (C) corresponde ao raio do círculo de tonalidade, partindo do cinza do eixo de luminosidade (L^*) até a cor pura espectral localizada na extremidade do círculo [34,62].

O diagrama colorimétrico mostra que os parâmetros saturação de cor e luminosidade aumentam proporcionalmente (Fig. 8). As espécies florestais com menores valores de saturação (*D. excelsa* e *M. elata*) também apresentaram os menores valores para o parâmetro colorimétrico L^* , corroborando o escurecimento de suas madeiras pela menor saturação percebida. Em contrapartida, as madeiras mais claras (*C. oblongifolia* e *C. guianensis*) apresentaram alta saturação da cor.

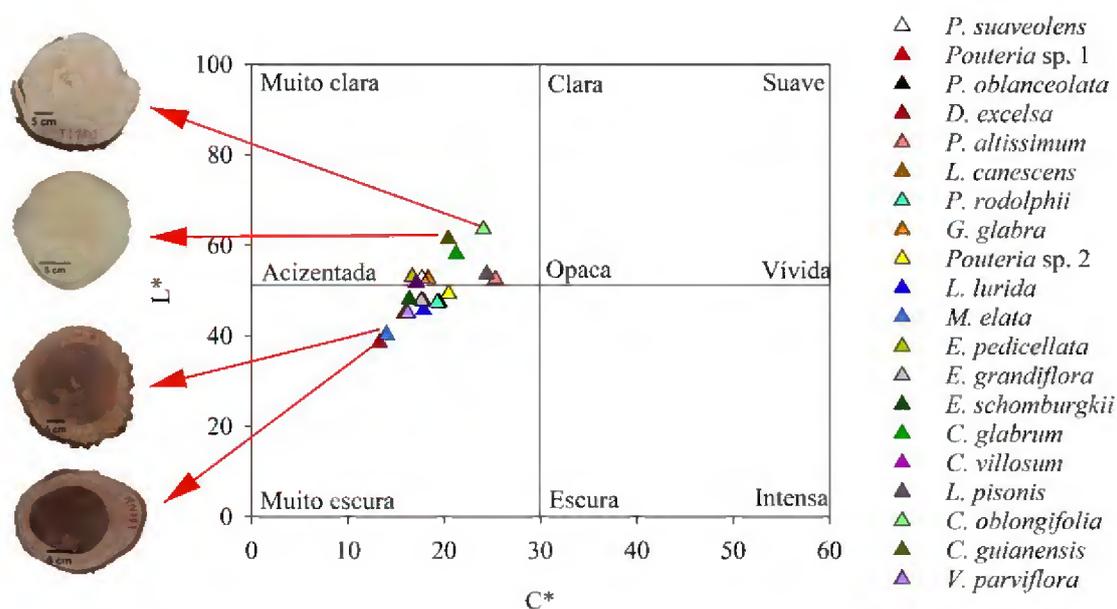


Fig. 8. Diagrama colorimétrico dos resíduos madeireiros de vinte espécies tropicais da Amazônia Brasileira.

Além da saturação de cor (C), o ângulo de tinta (h^*) é muito influenciado pelas coordenadas cromáticas (a^* e b^*). Em nosso estudo foi observada maior influência da coordenada b^* sobre h^* , em que *D. excelsa* e *C. guianensis* são as espécies com o menor e maior ângulo de tinta, respectivamente. O h^* mostrou que todas as espécies tropicais estudadas se encontram no primeiro quadrante ($0^\circ - 90^\circ$) do sistema CIEL a^*b^* . Camargos e Gonzalez [45] verificaram os ângulos de tinta de 350 espécies tropicais brasileiras enquadrados no primeiro quadrante no sistema CIEL a^*b^* . O ângulo de tinta varia de 0

a 360°, sendo que 0° corresponde ao vermelho e 90°, ao amarelo [75]. Dessa forma, mais próximo de 0° maior influência da pigmentação vermelha, o que explica junto aos valores do parâmetro b* a tonalidade verificada para as espécies *D. excelsa* e *M. elata*. A variável h* confirma a influência do pigmento amarelo na grande maioria das madeiras estudadas (90%), colocando-as próximas ao eixo b*.

Segundo a classificação colorimétrica proposta por Camargos e Gonzalez [45], as cores das madeiras residuais podem ser descritas como oliva-amarelado, oliva, cinza-rosado, rosa-acinzentado, marrom-oliva, marrom-claro, marrom-escuro e marrom-arroxeadado (Fig. 9). O grupo das madeiras de coloração oliva apresenta madeiras de densidade básica média. A coloração marrom-arroxeadado apresentou as espécies com as madeiras mais escuras (*M. elata* e *D. excelsa*), devido aos valores de a* e b*. Além disso, essas espécies apresentam as maiores densidades básicas e densidades energéticas.

Marrom-arroxeadado	 <i>Manilkara elata</i>	 <i>Dinizia excelsa</i>	Rosa-acinzentado	 <i>Caryocar glabrum</i>
Marrom-escuro	 <i>Licania canescens</i>	 <i>Vantanea parviflora</i>	Marrom-oliva	 <i>Protium allissimum</i>
Oliva	 <i>Entereolobium schomburgkii</i>	 <i>Parinari rodolphii</i>	Marrom-claro	 <i>Pouteria sp. 2</i>
	 <i>Lecythis lurida</i>	 <i>Pseudopiptadenia suaveolens</i>	Oliva-amarelado	 <i>Couratari oblongifolia</i>
	 <i>Pouteria oblanceolata</i>	 <i>Caryocar villosum</i>	 <i>Lecythis pisonis</i>	Cinza-rosado
	 <i>Goupia glabra</i>	 <i>Eschweilera grandiflora</i>		
		 <i>Pouteria sp.1</i>		

Fig. 9. Classificação colorimétrica dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável na Amazônia Brasileira.

A classificação colorimétrica poderá auxiliar na segregação dos resíduos madeireiros para produção energética, em que, as madeiras de coloração marrom-arroxeadado se mostraram as mais promissoras. Para os resíduos estudados, sugere-se a seguinte ordem para segregação em função da densidade básica e densidade energética: (i) marrom-arroxeadado, (ii) marrom-escuro, (iii) oliva, (iv) rosa-acinzentado, (v) marrom-

claro, (vi) marron-oliva, (vii) oliva-amarelado e (viii) Cinza-rosado. O número de grupos colorimétricos evidencia a variabilidade das espécies tropicais estudadas e o potencial da colorimetria em segregar os resíduos madeireiros para a finalidade energética.

6.3.3 Relação entre densidade básica, densidade energética e as variáveis colorimétricas

A Tabela 3 evidencia a matriz de correlação envolvendo as propriedades da madeira estudadas. Correlações significativas (p -valor $\leq 0,05$) entre DB e DE (0,99), b^* ($r = -0,68$), C ($r = -0,63$), h^* ($r = -0,61$) e L^* ($r = -0,76$) foram encontradas. Além disso, foram encontradas correlações significativas entre densidade energética e os parâmetros colorimétricos. Correlação significativa dos parâmetros colorimétricos com a umidade da madeira não foi encontrada, o que corrobora baixa variação para esta variável e nenhuma influência sob a aparência das madeiras.

Tabela 3

Matriz de correlação das variáveis colorimétricas, físicas e energéticas.

	L^*	a^*	b^*	C	h^*	DB	DE	Ubs
L^*	1,00							
a^*	-0,39 (0,09)	1,00						
b^*	0,83 (0,00)	0,04 (0,86)	1,00					
C	0,72 (0,00)	0,26 (0,27)	0,97 (0,00)	1,00				
h^*	0,87 (0,00)	-0,63 (0,00)	0,73 (0,00)	0,55 (0,01)	1,00			
DB	-0,76 (0,00)	0,10 (0,66)	-0,68 (0,00)	-0,63 (0,00)	-0,61 (0,00)	1,00		
DE	-0,74 (0,00)	0,08 (0,75)	-0,67 (0,00)	-0,63 (0,00)	-0,58 (0,01)	0,99 (0,00)	1,00	
Ubs	-0,03 (0,90)	0,15 (0,52)	0,19 (0,43)	0,22 (0,34)	0,00 (0,99)	0,11 (0,65)	0,04 (0,85)	1,00

L^* = Luminosidade; a^* = Coordenada cromática verde-vermelho; b^* = Coordenada cromática azul-amarelo; C = Cromaticidade; h^* = Ângulo de tinta; DB = Densidade básica; DE = Densidade energética; Ubs = Umidade (base massa seca). Correlações significativas pelo teste t ($< 0,05$) estão destacadas em negrito; em parêntesis o p -valor.

A ausência de correlação entre DB e a^* indica que, de fato, a pigmentação amarela ($+ b^*$) foi mais relevante na explicação das variações das densidades básica e energética da madeira. Contudo, Garcia e Marinonio [68] observaram correlação positiva entre a densidade básica e a^* para árvores de *Tectona grandis*, mostrando que madeiras mais densas são mais escuras e apresentam mais pigmentação vermelha. Os autores verificaram que a cor vermelha (a^*) e a luminosidade (L^*) da madeira estão correlacionadas com o teor de extrativos. Amorim et al. [76] também evidenciaram correlações negativas entre a densidade básica e L^* ($r = -0,70$), b^* ($r = -0,77$), C ($r = -0,75$) e h^* ($r = -0,76$) para espécies de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*.

Poucos estudos associam a densidade energética de resíduos madeireiros com as coordenadas cromáticas. Nossos resultados revelam que a maior quantidade de pigmentação vermelha e baixa luminosidade está atrelada a madeiras com alta densidade básica e alta densidade energética.

Os modelos lineares ajustados para determinação da densidade básica em função dos parâmetros colorimétricos L, b*, C e h* podem ser observados na Fig. 10.

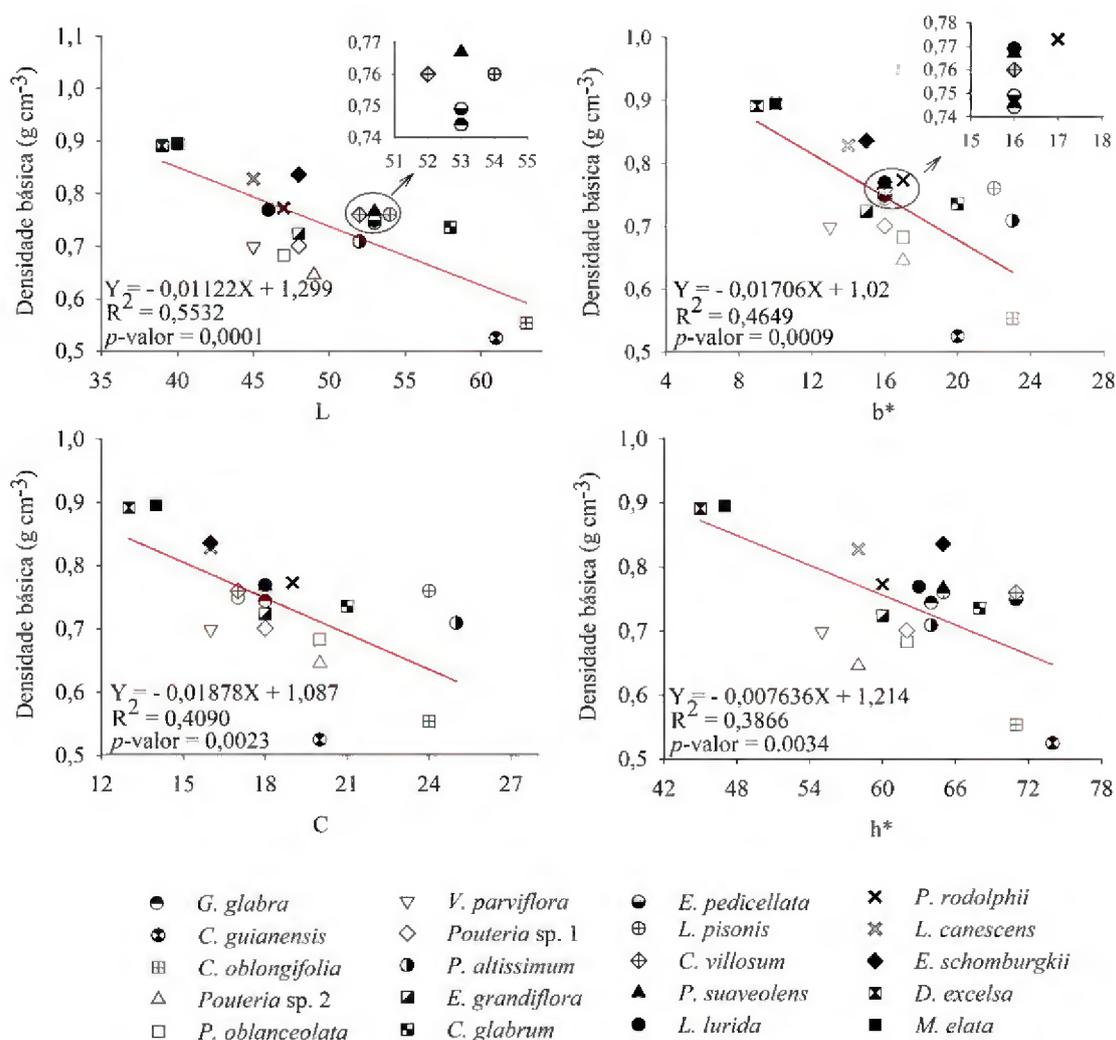


Fig. 10. Modelos lineares da densidade básica em função dos parâmetros colorimétricos L*, b*, C e h*.

A relação negativa existente entre densidade básica e L*, indica que redução na luminosidade da madeira é relacionada à maior densidade básica da madeira. Com base no modelo linear ajustado para densidade básica em função da luminosidade, madeiras com L* > 50, apresentam densidade menor que 0,740 g cm⁻³ (madeira de média densidade). Relação negativa entre a densidade e o parâmetro colorimétrico b* mostra que madeiras de densidade mais baixa têm sua coloração mais influenciada pela

pigmentação amarela. Logo, se o valor de b^* é maior, o ângulo de tinta e a cromaticidade serão maiores. Para produção energética, destacam-se madeiras com menores valores de ângulo de tinta, pois é um indicativo de que são madeiras mais avermelhadas e mais densas.

Modelos lineares foram ajustados para estimativa de densidade energética em função de L^* , b^* e h^* , e um modelo quadrático melhor se adequou para estimar densidade energética baseada em C (Fig. 11). O melhor modelo ajustado foi verificado em função de L^* ($R^2 = 0,4543$) e C ($R^2 = 0,4403$), mas o nível de explicação do modelo, baseado no coeficiente de determinação ajustado (R^2), foi considerado baixo. Isso pode ser explicado pela variabilidade de espécies estudadas. Além disso, a densidade energética é um parâmetro influenciado por outras características da madeira, especialmente pelos constituintes químicos.

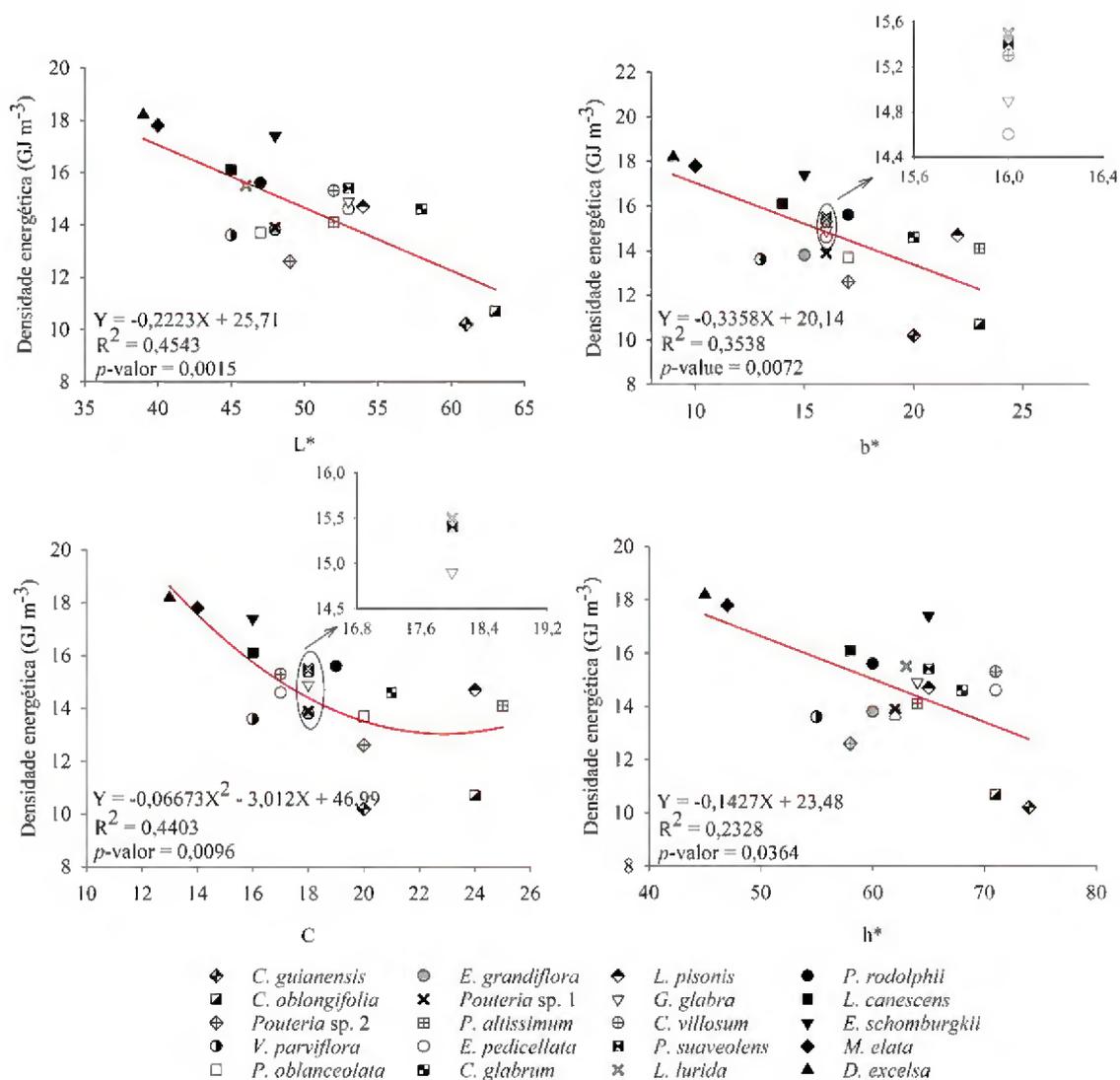


Fig. 11. Modelos lineares da densidade energética em função dos parâmetros colorimétricos L^* , b^* , C e h^* .

A constituição química influencia diretamente o potencial energético dos biocombustíveis e deve ser levada em consideração nos modelos para estimativa da densidade energética. Lignina e extrativos são exemplos de elementos químicos que influenciam positivamente a energia gerada na combustão da biomassa lenhosa [71,77], e podem ser utilizados junto aos parâmetros colorimétricos visando à melhoria dos modelos de estimativa da densidade energética.

A Tabela 4 evidencia as variações dos parâmetros colorimétricos com base nas faixas de densidade básica dos resíduos madeireiros estudados. As classes de densidade baseiam-se nos grupos formados pelo teste Scott Knott (Fig. 4), e os limites (inferior e superior) no desvio padrão dos grupos.

Tabela 4

Classificação dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal baseado em faixas de densidade básica.

Classe	FD (g cm^{-3})	DE	L*	a*	b*	C	h*
1	> 0,800	> 16,1	39 - 48	7 - 9	9 - 15	13 - 16	45 - 65
2	0,700 – 0,799	13,8 – 15,6	46 - 58	5 - 11	15 - 22	17 - 25	60 - 71
3	0,600 – 0,699	12,6 – 13,7	45 - 49	9 - 11	13 - 17	16 - 20	55 - 62
4	< 0,599	< 10,7	61 - 63	6 - 8	20 - 23	20 - 24	71 - 74

FD = Faixa de densidade; DE = Densidade energética (GJ m^{-3}); L* = Luminosidade; a* = Coordenada cromática verde-vermelho; b* = Coordenada cromática azul-amarelo, C = Cromaticidade; e h* = Ângulo de tinta.

Com base na Tabela 4 e nos modelos lineares ajustados (Fig. 7), as madeiras mais promissoras apresentam $BD > 0,800 \text{ g cm}^{-3}$, $ED > 16,1$, $L^* \leq 48$, $7 \leq a \leq 9$, $C \leq 16$ e $45 \leq h^* \leq 65$ (Classe 1). Em contrapartida, a classe 4 se mostrou a menos promissora, pois apresenta $BD < 0,599 \text{ g cm}^{-3}$, $ED < 10,7$, $L^* \geq 61$, $6 \leq a^* \leq 8$, $20 \leq b^* \leq 23$, $20 \leq C \leq 24$, e $71 \leq h^* \leq 74$. As faixas de densidade básica proposta na Tabela 4 demonstra uma alternativa para redução da heterogeneidade dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável e maximização da energia gerada em sistemas energéticos de conversão na Amazônia. Adicionalmente, a utilização de madeiras com propriedades mais homogêneas resultará em carvão vegetal com propriedades mais homogêneas e adequadas para o uso siderúrgico e doméstico.

6.3.4 Agrupamento multivariado dos resíduos

A análise de componentes principais revelou que as duas primeiras componentes explicaram aproximadamente 80% da variabilidade dos dados. As variáveis com maiores

contribuições para os agrupamentos das espécies estão discriminadas na Tabela 5. Medidas mais distantes de zero correspondem às variações com maior influência sobre o valor da componente principal. Em contrapartida, os autovetores mais próximos de zero, contribuem pouco sobre o valor da componente principal.

Tabela 5
Autovetores das 2 primeiras componentes principais.

Variável	CP1	CP2
Luminosidade (L*)	0,4305	-0,1615
Coordenada cromática verde-vermelho (a*)	-0,0744	0,7217
Coordenada cromática azul-amarelo (b*)	0,4241	0,2084
Cromaticidade (C)	0,3884	0,3765
Ângulo de tinta (h*)	0,3908	-0,3029
Densidade básica (g cm ⁻³)	-0,4053	0,0190
Densidade energética (MJ m ⁻³)	-0,4012	-0,0145
Umidade (Base massa seca)	0,0213	0,4190

*Variáveis com contribuições significativas nas componentes principais. CP1 = Componente principal 1; e CP2 = Componente principal 2.

Os maiores autovetores da componente principal 1 foram verificados para as variáveis L*, b*, C, h*, densidade básica e densidade energética. Foram encontradas correlações negativas entre a componente principal 1 e densidade básica e densidade energética, bem como correlações positivas com L*, b*, C e h*. Assim, quanto menores os escores da componente principal 1, mais propícias serão as espécies para o uso bioenergético, pois apresentarão elevados valores para densidade básica e densidade energética, bem como baixos valores de L*, b*, C, h*.

Os maiores autovetores na componente principal 2 foram observados para os parâmetros cromáticos (a*, C e h*) e umidade. Com base na natureza das correlações encontradas, quanto maior o valor da componente principal 2, maior será a influência da pigmentação vermelha na formação da cor da madeira devido ao menor ângulo de tinta e saturação da cor.

A dispersão das espécies florestais estudadas em função dos escores obtidos na análise de componentes principais pode ser observada na Fig. 12. Foi observada a formação de 5 grupos distintos de espécies com propriedades da madeira similares.

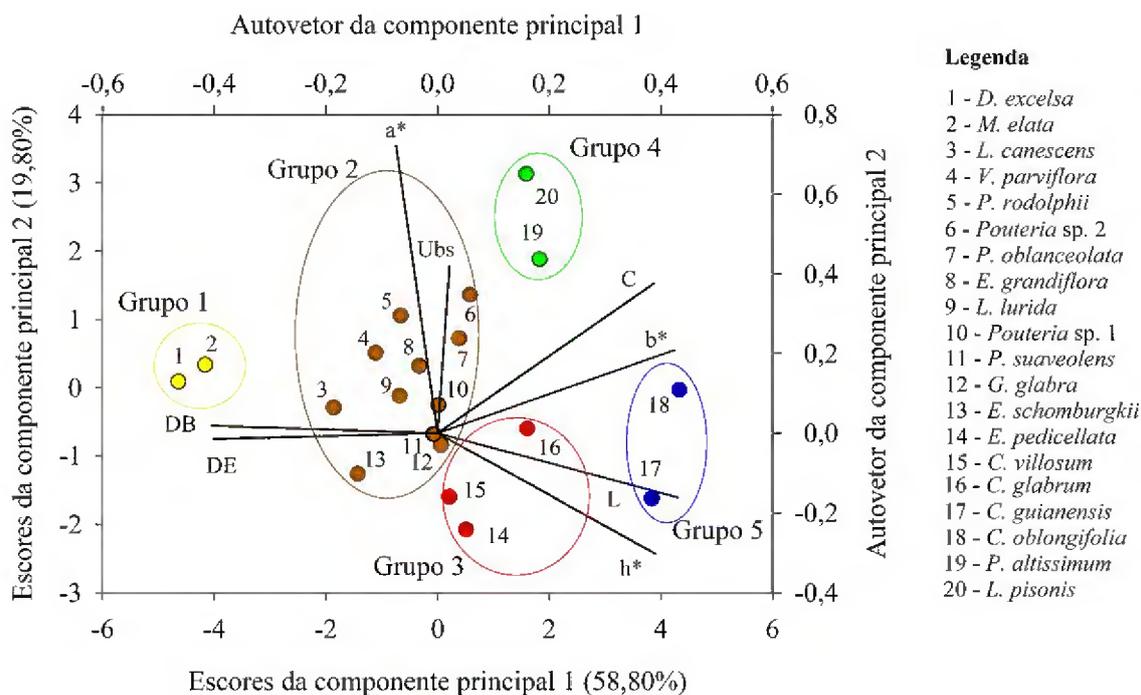


Fig. 12. Análises dos escores das duas primeiras componentes principais com discriminação dos grupos de espécies.

O grupo 1 mostra-se o mais distinto pois reúne as espécies (*D. excelsa* e *M. elata*) com maiores densidades básicas e densidades energéticas, bem como menores valores para os parâmetros colorimétricos L^* , b^* , C e h^* (Fig. 12). A Tabela 6 mostra que este é o grupo mais promissor para produção de carvão e lenha, visto a maior média de densidade básica ($0,8930 \text{ g cm}^{-3}$) e densidade energética (18 GJ m^{-3}). Além disso, apresenta madeira com coloração mais escura (marrom-arroxeadado). Isso pode ser evidenciado pelo menor valor expressado pela componente principal 1 para o grupo mencionado (Fig. 12).

Tabela 6

Médias dos parâmetros colorimétricos e físicos por grupo de espécies formados pela análise de componentes principais.

Grupo	L^*	a^*	b^*	C	h^*	DB (g cm^{-3})	DE (GJ m^{-3})	Ubs (%)
1	$39 \pm 1,22$	$9 \pm 0,10$	$10 \pm 0,57$	$14 \pm 0,52$	$46 \pm 1,28$	$0,8930 \pm 0,00$	$18,0 \pm 0,2$	$16,4 \pm 0,39$
2	$48 \pm 2,65$	$9 \pm 1,12$	$16 \pm 1,35$	$18 \pm 1,43$	$61 \pm 3,26$	$0,7428 \pm 0,06$	$14,8 \pm 1,4$	$16,3 \pm 0,73$
3	$54 \pm 3,40$	$6 \pm 1,18$	$17 \pm 2,19$	$18 \pm 2,52$	$70 \pm 1,83$	$0,7486 \pm 0,01$	$14,8 \pm 0,4$	$16,7 \pm 0,21$
4	$53 \pm 0,80$	$10 \pm 1,00$	$22 \pm 0,37$	$25 \pm 0,64$	$65 \pm 1,17$	$0,7345 \pm 0,04$	$14,4 \pm 0,4$	$18,8 \pm 4,74$
5	$62 \pm 1,52$	$7 \pm 1,44$	$21 \pm 2,25$	$22 \pm 2,58$	$72 \pm 1,90$	$0,5393 \pm 0,02$	$10,5 \pm 0,4$	$16,0 \pm 0,12$

L^* = Luminosidade; a^* = Coordenada cromática verde-vermelho; b^* = Coordenada cromática azul-amarelo; C = Cromaticidade; h^* = Ângulo de tinta; DB = Densidade básica; DE = Densidade energética; e Ubs = Umidade (base massa seca). Média \pm desvio padrão.

O grupo 2 foi composto por 55% das espécies estudadas, majoritariamente (73%) espécies com madeira de coloração oliva. Nesse grupo, apenas as espécies *Pouteria* sp. 2 (Marrom-claro), *L. canescens* (Marrom-escuro) e *V. parviflora* (Marrom-escuro) tiveram cores diferentes das demais, pois os ângulos de tinta das três espécies são inferiores aos apresentados pela maioria do grupo e não se enquadram na faixa (60 - 71) proposta por Camargos e Gonzalez [45] para o oliva. Este grupo menciona espécies com baixa luminosidade e alta influência da pigmentação vermelha, cromaticidade e ângulo de tinta. Além disso, é um grupo cuja densidade básica pode ser classificada como média. A densidade energética desse grupo se mostrou semelhante à apresentada pelo grupo 3 (Tabela 8).

O grupo 3 (*E. pedicellata*, *C. villosum* e *C. glabrum*) reúne espécie com luminosidade intermediária, entretanto mais influenciado pelo ângulo de tinta. A densidade energética desse grupo também pode ser considerada intermediária, se comparada as demais.

O grupo 4, composto pelas espécies *P. altissimum* e *L. pisonis*, apresenta luminosidade intermediária (próxima de 50), contudo a formação desse grupo foi mais influenciada pelas maiores pigmentações de amarelo e vermelho na madeira, além de elevada cromaticidade e umidade (Tabela 6).

O grupo 5 (*C. guianensis* e *C. oblongifolia*) reúne as espécies com os menores valores para a componente principal 2 e maiores valores para a componente principal 1. Assim, o grupo é caracterizado por espécies cuja cor de suas madeiras são mais influenciadas pela pigmentação amarela, o que as tornam mais claras ($L > 60$). Além disso, o ângulo de tinta influenciou o agrupamento dessas espécies. O grupo 5 apresentou menor média para densidade básica ($0,5393 \text{ g cm}^{-3}$) e densidade energética (10.5 GJ m^{-3}), como mostra a Tabela 6.

No geral, a densidade básica do grupo 1 é tida como alta. Já os grupos 2, 3, 4 e 5, são caracterizados como de densidade média. Os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C e h^*) foram substanciais para a diferenciação das espécies de densidade média, demonstrando na pesquisa um gradiente de cores para essa classe de densidade entre os grupos. A relação dos pigmentos a^* e b^* mostram efeitos na densidade energética, em que as espécies com maior pigmentação vermelha e menor pigmentação amarela apresentaram as maiores densidades energéticas.

A medição da L^* , b^* , C e h^* pode ajudar técnicos e pesquisadores na avaliação rápida e indireta da qualidade das madeiras residuais amazônicas e, consequentemente,

agrupá-las visando à produção energética de forma mais eficiente. Os índices gerados nesta pesquisa incluem uma ampla variação colorimétrica e podem ser utilizados por outros pesquisadores e técnicos do setor florestal que atuam na Amazônia. A rápida determinação da densidade básica e densidade energética, além de contribuir para controle de qualidade dos resíduos madeireiros destinados aos sistemas locais de geração de energia, pode ajudar a substituir espécies superexploradas em planos de manejo florestal na Amazônia por outras com propriedades de madeira semelhantes e estoque de crescimento florestal suficiente para [78].

6.4 Conclusões

Este manuscrito revelou que a colorimetria apresenta potencial de segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para bioenergia. Destacam-se as madeiras mais densas e de superfície mais escurecida para a finalidade energética devido a maior influência da pigmentação vermelha na formação da cor (a^*), conseqüentemente, menores valores para os parâmetros L^* , b^* , C e h^* . Além disso, madeiras com maior pigmentação vermelha (*Manilkara elata* e *Dinizia excelsa*) apresentam maior densidade energética. Todos os grupos formados pela análise de componentes principais podem ser recomendados para produção bioenergética, entretanto, o grupo 1, formado pelas espécies *Manilkara elata* e *Dinizia excelsa* de coloração marrom-arroxeadado, é o mais promissor.

Referências

- [1] L.P. Reis, A.L. Souza, P.C.M. Reis, L.J.M. Freitas, L.F. Silva, L.J.S. Rego, Application of the Mexican method of forest planning (MMFP) to estimate the cutting cycle and intensity in the eastern Amazon rainforest, *Sci. For.* 45 (2017) 187–195. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n113.19>.
- [2] A.L. Avila, G. Schwartz, A.R. Ruschel, J.C. Lopes, J.N.M. Silva, J.O.P. Carvalho, C.F. Dormann, L. Mazzei, M.H.M. Soares, J. Bauhus, Recruitment, growth and recovery of commercial tree species over 30 years following logging and thinning in a tropical rain forest, *For. Ecol. Manage.* 385 (2017) 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.039>.
- [3] B.H. Poudyal, T. Maraseni, G. Cockfield, Impacts of forest management on tree species richness and composition: assessment of forest management regimes in

- Tarai landscape Nepal, *Appl. Geogr.* 111 (2019) 102078. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102078>.
- [4] L.F.S. Dionisio, G. Schwartz, J.C. Lopes, F.A. Oliveira, Growth, mortality, and recruitment of tree species in an Amazonian rainforest over 13 years of reduced impact logging, *For. Ecol. Manage.* 430 (2018) 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.024>.
- [5] R.L.P. Neves, G. Schwartz, J.C.A. Lopes, F.M. Leão, Post-harvesting silvicultural treatments in canopy logging gaps: medium-term responses of commercial tree species under tending and enrichment planting, *For. Ecol. Manage.* 451 (2019) 117521. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117521>.
- [6] Brasil, Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa MMA no 5 de 11/12/2006. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas, Brasil, 2006.
- [7] PARÁ, Instrução Normativa SEMA No 5 DE 2015 (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 , 2015.
- [8] G.M. Domke, D.R. Becker, A.W. D’Amato, A.R. Ek, C.W. Woodall, Carbon emissions associated with the procurement and utilization of forest harvest residues for energy, northern Minnesota, USA, *Biomass and Bioenergy*. 36 (2012) 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.035>.
- [9] L.M.B. Francez, J.O.P. Carvalho, F.J. Batista, F.C.S. Jardim, E.M.L.S. Ramos, Effects of the reduced impact logging on the growth phases of a Terra Firme forest in the state of Pará, Brazil, *Ciência Florest.* 23 (2013) 743–753. <https://doi.org/10.5902/1980509812358>.
- [10] C.T.D. Numazawa, S. Numazawa, S. Pacca, V.M. John, Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting, *Resour. Conserv. Recycl.* 122 (2017) 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>.
- [11] M. Palace, M. Keller, G.P. Asner, J.N.M. Silva, C. Passos, Necromass in undisturbed and logged forests in the Brazilian Amazon, *For. Ecol. Manage.* 238 (2007) 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.026>.
- [12] M. Garcia, J.S. Espejo, J. Martin, T.R. Baker, E.N.H. Coronado, O.L. Phillips, G.M.F. van der Heijden, Low stocks of coarse woody debris in a southwest

- Amazonian forest, *Oecologia*. 152 (2007) 495–504.
<https://doi.org/10.1007/s00442-007-0667-5>.
- [13] D. Cruz Filho, J.N.M. Silva, Evaluation of the amount of coarse woody debris in area of logged and undisturbed forests, using line-intercept sampling, in the Medium Moju River, Eastern Amazonia, Brazil, *Acta Amaz.* 39 (2009) 527–532.
<https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000300006>.
- [14] E.B. Agbro, N.A. Ogie, A comprehensive review of biomass resources and biofuel production potential in Nigeria, *Res. J. Eng. Appl. Sci.* 1 (2012) 149–155.
www.emergingresource.org.
- [15] V. Bustamante-García, A. Carrillo-Parra, H. González-Rodríguez, R.G. Ramírez-Lozano, J.J. Corral-Rivas, F. Garza-Ocañas, Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln, *Ind. Crops Prod.* 42 (2013) 169–174.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.034>.
- [16] T.R.L.A. Veiga, J.T. Lima, T.C. Monteiro, A.L.A. Dessimoni, M.F.V. Rocha, Mechanical properties of individual samples of wood and charcoal from *Eucalyptus urophylla* and *Corymbia citriodora*, *Sci. For.* 46 (2018) 107–114.
<https://doi.org/10.18671/scifor.v46n117.10>.
- [17] A.C. Silva, M.D.C. Arantes, F.G. Gonçalves, M.N.F. Almeida, L.M.H. Santos, J.K.B. Andrade, D. Minini, Charcoal quality produced with eucalyptus residues, *Sci. For.* 47 (2019) 536–544. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n123.15>.
- [18] T.P. Protásio, A.M. Couto, A.A. Reis, P.F. Trugilho, T.P. Godinho, Steel and energetic potential of charcoal of *Eucalyptus* spp. clones at 42 months of age, *Pesqui. Florest. Bras.* 33 (2013) 137–149.
<https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.74.448>.
- [19] T.P. Protásio, A.M. Couto, P.F. Trugilho, J.B. Guimarães Junior, P.H. Lima Junior, M.M.O. Silva, Technological evaluation of charcoal from the wood of young clones of *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, *Sci. For.* 43 (2015) 801–816.
<https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6>.
- [20] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira, MME/EPE, Rio de Janeiro, 2018.

- [21] SINDIFER, Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário estatístico Ano-Base 2018, SINDIFER, Minas Gerais, 2019. http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario_2017.pdf.
- [22] P. Rousset, C. Figueiredo, M. Souza, W. Quirino, Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach, *Fuel Process. Technol.* 92 (2011) 1890–1897. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.005>.
- [23] C.G.F. Juizo, M.R. Lima, D.A. Silva, Quality of the bark and wood of nine *Eucalyptus* species for the charcoal production, *Rev. Bras. Ciências Agrárias*. 12 (2017) 386–390. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5461>.
- [24] M.T. Cardoso, R.A.P. Damásio, A.C.O. Carneiro, L.A.G. Jacovine, B.R. Vital, D.C. Barcelos, Construction of a gas burning system resulting from carbonization to reduce pollutants emissions, *Cerne*. 16 (2010) 115–124.
- [25] A.C. Oliveira, A.C.O. Carneiro, B.L.C. Pereira, B.R. Vital, A.M.M.L. Carvalho, P.F. Trugilho, R.A.P. Damásio, Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures, *Rev. Árvore*. 37 (2013) 557–566. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>.
- [26] M.R. Peláez-Samaniego, M. Garcia-Perez, L.B. Cortez, F. Rosillo-Calle, J. Mesa, Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12 (2008) 1063–1086. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.018>.
- [27] R. Moya, J.D. Marín, Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness, *New For.* 42 (2011) 329–345. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9255-y>.
- [28] M.F. Martins, R. Beltrame, R.A. Delucis, D.A. Gatto, P.H.G. Cademartori, G.A. Santos, Colorimetry as grouping tool of *Eucalyptus* clones wood, *Pesqui. Florest. Bras.* 35 (2015) 443–449. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.929>.
- [29] D.M. Stangerlin, A.F. Costa, J.C. González, T.C.M. Pastore, A. Garlet, Monitoring of biodeterioration of three Amazonian wood species by the colorimetry technique, *Acta Amaz.* 43 (2013) 429–438. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000400004>.
- [30] B.D. Mattos, P.H.G. Cademartori, T. V. Lourençon, D.A. Gatto, Colour changes of Brazilian eucalypts wood by natural weathering, *Int. Wood Prod. J.* 5 (2014) 33–38. <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000035>.

- [31] L.F. Moura, J.O. Brito, Effect of thermal rectification on colorimetric properties of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods, *Sci. For.* 39 (2011) 69–76.
- [32] C.G.O. Griebeler, J.L.M. Matos, G.I.B. Muniz, S. Nisgoski, D.C. Batista, C.I. Rodríguez, Colour responses of *Eucalyptus grandis* wood to the Brazilian process of thermal modification, *Maderas. Cienc. y Tecnol.* 20 (2018) 661–670. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005041201>.
- [33] K.N. Pereira, J.C. Gonçalves, J. Raabe, A.F. Costa, Surface quality of the *Ficus* sp. wood veneers submitted to finishing treatments, *Madera y Bosques.* 23 (2017) 181–191. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321224>.
- [34] C.S. Autran, J.C. Gonçalves, Colorimetry characterization of the wood of muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) and of rubber tree (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) aiming at inside use, *Ciência Florest.* 16 (2006) 445–451. <https://doi.org/10.5902/198050981926>.
- [35] A. Sgarbossa, C. Costa, P. Menesatti, F. Antonucci, F. Pallottino, M. Zanetti, S. Grigolato, R. Cavalli, Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters, *Fuel.* 137 (2014) 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.080>.
- [36] H.J. Pegoretti, M.D. Chaves, G.B. Vidaurre, V.F. Brocco, D.P. Souza, T.P. Protásio, Colorimetry of pellets produced with *Eucalyptus* and coffee cultivation residues and their relationship to quality standards, *Sci. For.* 47 (2019) 114–124. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n121.11>.
- [37] Climate-Data.org, Dados climáticos para cidades mundiais [On line], AM Online Projects, Oedheim, 2017. <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/para/paragominas-714961/>.
- [38] H.P. Veloso, A.L.R. Rangel Filho, J.C.A. Lima, Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal, IBGE, Rio de Janeiro, 1991.
- [39] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa, Rio de Janeiro, 2017.
- [40] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica., Rio de Janeiro, 2003.
- [41] E. Csanády, E. Magoss, L. Tolvaj, Quality of machined wood surfaces, Springer International Publishing, New York City, 2015.

- [42] ASTM, American Society for Testing Materials. E711 - 87: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter, ASTM International, Philadelphia, 2004.
- [43] S.V.S. Barros, G.I.B. Muniz, J.L.M. Matos, Colorimetric characterization of three wood species from the amazon forest, *Cerne*. 20 (2014) 337–342. <https://doi.org/10.1590/01047760201420031421>.
- [44] R.A. Garcia, N.S. Oliveira, A.M. Nascimento, N.D. Souza, Colorimetry of woods from *Eucalyptus* and *Corymbia* Genus and its correlation with density, *Cerne*. 20 (2014) 509–517. <https://doi.org/10.1590/01047760201420041316>.
- [45] J.A.A. Camargos, J.C. Gonçalez, Applied colorimetry as instrument in the elaboration of a timber color chart, *Bras. Florest.* (2001) 30–41.
- [46] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Viena. Austria, 2018. <https://doi.org/10.4236/ojs.2014.49064>.
- [47] V.H.F. Andrade, S.A. Machado, A. Figueiredo Filho, P.C. Botosso, B.P. Miranda, J. Schongart, Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon, *For. Ecol. Manage.* 438 (2019) 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>.
- [48] C.J. Silva, A.T. Vale, E.P. Miguel, Basic wood density tree species of Cerradão physiognomy in the state of Tocantins Abstract, *Pesqui. Florest. Bras.* 35 (2015) 63–75. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.822>.
- [49] E.M. Nogueira, B.W. Nelson, P.M. Fearnside, Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil, *For. Ecol. Manage.* 208 (2005) 261–286. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.12.007>.
- [50] P.M. Fearnside, Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia, *For. Ecol. Manage.* 90 (1997) 59–87. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03840-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03840-6).
- [51] T.R. Baker, O.L. Phillips, Y. Malhi, S. Almeida, L. Arroyo, A. Di Fiore, T. Erwin, T.J. Killeen, S.G. Laurance, W.F. Laurance, S.L. Lewis, J. Lloyd, A. Monteagudo, D.A. Neill, S. Patino, N.C.A. Pitman, J.N.M. Silva, R. V. Martinez, Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass, *Glob. Chang. Biol.* 10 (2004) 545–562. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00751.x>.

- [52] J. Chave, H.C. Muller-landau, T.R. Baker, T.A. Easdale, H.T. Steege, C.O. Webb, Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species, *Ecol. Appl.* 16 (2006) 2356–2367. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2356:RAPVOW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2356:RAPVOW]2.0.CO;2).
- [53] S. Patiño, J. Lloyd, R. Paiva, T.R. Baker, C.A. Quesada, L.M. Mercado, J. Schmerler, M. Schwarz, A.J.B. Santos, A. Aguilar, C.I. Czimczik, J. Gallo, V. Horna, E.J. Hoyos, E.M. Jimenez, W. Palomino, J. Peacock, A. Pena-Cruz, C. Sarmiento, A. Sota, J.D. Turriago, B. Villanueva, P. Vitzthum, E. Alvarez, L. Arroyo, C. Baraloto, D. Bonal, J. Chave, A.C.L. Costa, R. Herrera, N. Higuchi, T. Killeen, E. Leal, F. Luizao, P. Meir, A. Monteagudo, D. Neil, P. Núñez-Vargas, M.C. Penuela, N. Pitman, N. Priante Filho, A. Prieto, S.N. Panfil, A. Rudas, R. Salomao, N. Silva, M. Silveira, S. Soares DeAlmeida, A. Torres-Lezama, R. Vásquez-Martínez, I. Vieira, Y. Malhi, O.L. Phillips, Branch xylem density variations across the Amazon Basin, *Biogeosciences*. 6 (2009) 545–568. <https://doi.org/10.5194/bg-6-545-2009>.
- [54] R.C. Santos, A.C.O. Carneiro, A.F.M. Castro, R.V.O. Castro, J.J. Bianche, M.M. Souza, M.T. Cardoso, Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of *Eucalyptus*, *Sci. For.* 39 (2011) 221–230.
- [55] T. Rodrigues, A. Braghini Junior, Charcoal: a discussion on carbonization kilns, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 143 (2019) 104670. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>.
- [56] T.P. Protásio, S.L. Goulart, T.A. Neves, P.F. Trugilho, F.M.G. Ramalho, L.M.R.S.B. Queiroz, Wood and charcoal quality from planted forest in Minas Gerais State, Brazil, *Pesqui. Florest. Bras.* 34 (2014) 111–123. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657>.
- [57] D.A. Silva, B.V. Muller, E.C. Kuiaski, E. Eloy, A. Behling, C.M. Colaço, Properties of *Eucalyptus benthamii* wood for energy production, *Pesqui. Florest. Bras.* 35 (2015) 481–485. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>.
- [58] L.H.C. Silveira, A.V. Rezende, A.T. Vale, Moisture content and basic wood density of nine commercial Amazonian tree species, *Acta Amaz.* 43 (2013) 179–184. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000200007>.
- [59] A.J.V. Zanuncio, J.T. Lima, T.C. Monteiro, A.G. Carvalho, P.F. Trugilho, Drying logs of *Eucalyptus* and *Corymbia* for energy purposes, *Sci. For.* 41 (2013) 353–360.

- [60] M.F. Silva, M.M. Fortes, C.R. Sette Junior, Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones, *Floresta e Ambient.* 25 (2018) e20160350. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>.
- [61] K. Mononen, L. Alvila, T.T. Pakkanen, CIEL*a*b* measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood, *Scand. J. For. Res.* 17 (2002) 179–191. <https://doi.org/10.1080/028275802753626827>.
- [62] R.A.F. Silva, C. Setter, S.S. Mazette, R.R. Melo, D.M. Stangerlin, Colorimetry of wood from thirty tropical species, *Rev. Ciência Da Madeira.* 8 (2017) 36–41. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p36-41>.
- [63] H.C. Vieira, E.L. Silva, J.X. Santos, G.I.B. Muñoz, S.R. Morrone, S. Nisgoski, Wood colorimetry of native species of Myrtaceae from a Araucaria forest, *Floresta.* 49 (2019) 353–362. <https://doi.org/10.5380/rf.v49i2.58236>.
- [64] A.D. Kokutse, A. Stokes, H. Baillères, K. Kokou, C. Baudasse, Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* L.f) heartwood and relationship with colour, *Trees.* 20 (2006) 219–223. <https://doi.org/10.1007/s00468-005-0028-0>.
- [65] R. Moya, A. Berrocal, Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance, *Ann. For. Sci.* 67 (2010) 109. <https://doi.org/10.1051/forest/2009088>.
- [66] T. Meints, A. Teischinger, R. Stingl, C. Hansmann, Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 75 (2017) 499–509. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1108-0>.
- [67] C.L.S.O. Mori, F.A. Mori, J.T. Lima, P.F. Trugilho, A.C. Oliveira, Influence of technological characteristics in the color of eucalypt wood, *Ciência Florest.* 14 (2004) 123–132. <https://doi.org/10.5902/198050981812>.
- [68] R.A. Garcia, G.B. Marinonio, Color variation of the teak wood as a function of density and extractive content, *Floresta e Ambient.* 23 (2016) 124–134. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035313>.
- [69] Y. Yazaki, P.J. Collins, B. McCombe, Variations in hot water extractives content and density of commercial wood veneers from blackbutt (*Eucalyptus pilularis*), *Holzforschung.* 48 (1994) 107–111. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1994.48.s1.107>.

- [70] R. Moya, R.S. Fallas, P.J. Bonilla, C. Tenorio, Relationship between wood color parameters measured by the CIELab System and extractive and phenol content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from fast-growth plantations, *Molecules*. 17 (2012) 3639–3652. <https://doi.org/10.3390/molecules17043639>.
- [71] C. Telmo, J. Lousada, The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood, *Biomass and Bioenergy*. 35 (2011) 1663–1667. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.038>.
- [72] N. Gierlinger, D. Jacques, M. Grabner, R. Wimmer, M. Schwanninger, P. Rozenberg, L.E. Pâques, Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance, *Trees*. 18 (2004) 102–108. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0290-y>.
- [73] R. Moya, J. Calvo-Alvarado, Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical environmental factors, *Ann. For. Sci.* 69 (2012) 947–959. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0217-0>.
- [74] C.M. Atayde, J.C. Gonçalves, J.A. Camargos, Colorimetric characteristics of different anatomical sections of muirapiranga (*Brosimum* sp.) wood, *Cerne*. 17 (2011) 231–235. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200011>.
- [75] J.K. Vanclay, M. Henson, G. Palmer, Color variation and correlations in *Eucalyptus dunnii* sawnwood, *J. Wood Sci.* 54 (2008) 431–435. <https://doi.org/10.1007/s10086-008-0977-1>.
- [76] P.G.R. Amorim, J.C. Gonçalves, J.A.A. Camargos, Wood properties of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* estimated by colorimetry, *Cerne*. 19 (2013) 461–466. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300013>.
- [77] J.R. Menucelli, E.P. Amorim, M.L.M. Freitas, M. Zanata, J. Cambuim, M.L.T. Moraes, F.M. Yamaji, F.G. Silva Júnior, E.L. Longui, Potential of *Hevea brasiliensis* clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* wood as raw materials for bioenergy based on higher heating value, *BioEnergy Res.* (2019) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10041-6>.
- [78] P.C.M.R. Reis, L.P. Reis, A.L. Souza, A.M.M.L. Carvalho, L. Mazzei, A.R.S. Reis, C.M.M.E. Torres, Clustering of Amazon wood species based on physical and mechanical properties, *Ciência Florest.* 29 (2019) 337–347. <https://doi.org/10.5902/1980509828114>.

7 CAPÍTULO 2 – RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO PARA SISTEMAS LOCAIS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Revista alvo: Biomass and Bioenergy (JCR 3,537/Qualis Capes A1)

RESUMO

Os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável é uma fonte promissora de bioenergia nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, especialmente para produção de energia elétrica em comunidades remotas na Amazônia e suprimento de carvão vegetal para finalidades domésticas e industriais. Esse estudo focou na caracterização energética dos resíduos madeireiros de vinte espécies exploradas em um plano de manejo florestal sustentável e sua equivalência energética com combustíveis fósseis. Foram amostrados galhos de árvores para caracterização física (densidade básica, umidade e máximo teor de umidade), química (imediate, molecular e elemental) e energética (poder calorífico e densidade energética). A densidade básica, densidade energética, teor de cinzas e extrativos totais apresentaram ampla variação entre as espécies. O conteúdo de carbono, a lignina total, o carbono fixo, a material volátil e o poder calorífico superior foram as propriedades com as menores variações interespecíficas. Novas espécies estudadas (*D. excelsa*, *M. elata*, *P. altissium* e *G. glabra*) apresentaram melhores propriedades energéticas do que espécies utilizadas em plantios comerciais. Com base no índice de desempenho energético da lenha, as madeiras tropicais foram agrupadas em dois grupos, no entanto, os resíduos de *D. excelsa* e *L. canescens* foram os melhores e os piores para a bioenergia, respectivamente. A análise multivariada agrupou os resíduos de exploração em quatro grupos, visando os sistemas locais de conversão termoquímica na Amazônia brasileira. Os resíduos de *D. excelsa* apresentaram a maior massa de CO_{2eq} fixada em 1 m³ de resíduos madeireiros (1.687 kg), o que significa que o uso de 1 m³ de resíduos madeireiros dessa espécie mitigaria a emissão de 1.687 kg de CO_{2eq}.

Palavras-chave: Energia renovável, resíduos lenhosos, combustão, carvão vegetal

7.1 Introdução

O uso de fontes limpas e seguras de energia contribui para a diversificação da matriz energética do Brasil e redução da dependência de combustíveis fósseis, que são os

principais responsáveis pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa [1]. Nesse cenário, as Nações Unidas (ONU) destacaram os seguintes objetivos entre os dezessete para o desenvolvimento sustentável até 2030: (i) garantir energia limpa e acessível a todos (objetivo 7) e (ii) mitigar as mudanças climáticas globais (objetivo 13). Essas preocupações, ligadas ao alto custo de fornecimento e à crescente demanda por energia, estimularam o interesse no uso de energia renovável em todo o mundo [2].

A biomassa é uma alternativa de energia sustentável para a redução das emissões de CO₂, pois é considerada uma fonte de emissão neutra de carbono (RUSSELL; KUMAR, 2017). O CO₂ produzido durante a queima de biomassa para geração de energia é equivalente ao CO₂ absorvido e fixado pelo processo natural de fotossíntese das plantas [4]. Diversos países utilizam a biomassa florestal, especialmente lenha, como fonte energética, dentre eles o Brasil [5], Turquia [6], Moçambique [7], Nigéria [8], Índia [9], Espanha [10], Finlândia, Suécia [11], Austrália [12], China [13] e Irlanda [14]. A literatura evidencia que o Brasil possui recursos extensivos de biomassa que são potencialmente suficientes para equilibrar a demanda total de energia primária brasileira até 2030 [15]. Especialmente os resíduos agrícolas e florestais com potencial para geração de energia térmica e elétrica, vinculados a sistemas integrados de produção agrícola, agroindustrial e silvicultural [16].

Em 2017, a energia da biomassa (cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal e lixívia) representou 29.6% da oferta interna de energia no Brasil. A utilização de biomassa residual no Brasil está de acordo com os objetivos propostos pela ONU e pode proporcionar melhorias ambientais e econômicas à matriz energética do país, que ainda é dependente de combustíveis fósseis [17].

Nos planos de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira, sob regime de Exploração de Impacto Reduzido (EIR), o volume de resíduos florestais gerados na fase de exploração depende da intensidade de corte adotada pelas empresas florestais. Cruz Filho e Silva [18] relataram a geração de 137,18 m³ ha⁻¹ de resíduos madeireiros na floresta sob EIR com intensidade de corte de 15 m³ ha⁻¹ na cidade de Mojú, Estado do Pará, Amazônia Oriental. Keller et al. [19] quantificaram 154 m³ ha⁻¹ de resíduos de exploração de uma unidade de manejo florestal com intensidade de corte de 30 m³ ha⁻¹ na cidade de Tapajós, Pará, Brasil. Assim, alta intensidade de corte resulta em alta geração de resíduos de exploração. Estima-se que, para cada 1 tonelada de madeira colhida sob o regime de EIR na Amazônia, sejam produzidas 2,13 toneladas de resíduos [20]. Os resíduos madeireiros incluem galhos, restos de troncos e saposomas [21].

Os resíduos do manejo podem ser usados para geração de energia elétrica em comunidades remotas nos estados da Amazônia, como Rondônia, Acre, Roraima, Amapá, Amazonas e Pará [22]. Além disso, podem ser destinados à produção de carvão vegetal para suprir o segundo maior pólo siderúrgico do Brasil, localizado na região de Carajás, entre os estados do Maranhão e Pará [23]. Além disso, o uso dos resíduos do manejo para produção energética na Amazônia é previsto no Artigo 2, Inciso XIV, da Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006 [24].

Estudos anteriores corroboram a viabilidade energética dos resíduos do beneficiamento mecânico de espécies florestais amazônicas para Bioenergia [25,26]. Em contrapartida, são escassas pesquisas que abordam a potencialidade energética dos resíduos da exploração florestal em planos de manejo florestal sustentável certificados, especialmente em relação a várias espécies tropicais conjuntas. Esse conhecimento apoiaria futuras diretrizes para o otimizar o uso dessa biomassa.

No geral, os resíduos do manejo florestal são altamente heterogêneos em relação a suas propriedades tecnológicas e dimensões, o que implica baixa densidade energética e eficiência de conversão [27]. Para corrigir os processos termoquímicos, melhorar as eficiências de conversão, otimizar as rotas de conversão e reduzir a heterogeneidade da produção energética, faz-se necessário ampliar o conhecimento das propriedades físicas, químicas e energéticas dessa biomassa residual. As propriedades químicas são as mais importantes em estudos de qualificação da biomassa, pois essas propriedades influenciam diretamente a performance energética de uma determinada biomassa. A secagem dos resíduos do manejo [28] e o uso simultâneo de madeiras com propriedades semelhantes são formas de reduzir as perdas energéticas do uso de biomassa residual heterogênea em sistemas de conversão de energia na Amazônia brasileira.

Na literatura, há relatos de agrupamentos de espécies florestais com propriedades físicas e mecânicas semelhantes [29]. Assim, espécies altamente exploradas e de alto valor comercial nos planos de manejo florestal podem ser substituídas por espécies com baixa visibilidade, com propriedades semelhantes e estoque de crescimento na floresta. Contudo, há escassez de trabalhos relacionados ao agrupamento de resíduos do manejo florestal, principalmente para utilização em sistemas de conversão termoquímica.

As questões científicas que nortearam o estudo foram: (i) Há diferença de energia térmica gerada entre os resíduos do manejo florestal?; (ii) Quais propriedades dos resíduos mais influenciam o desempenho energético da lenha?; (iii) Quais características da madeira tem maior influência para o agrupamento multivariado de resíduos do manejo

florestal sustentável para bioenergia?; e (iv) Qual característica da madeira deve ser considerada para escolha de resíduos com maior equivalência energética com combustível fóssil?

As hipóteses das questões científicas apresentadas são: (i) Os resíduos apresentam efeito de espécie na energia gerada pela queima; (ii) As propriedades químicas da madeira apresentam ampla contribuição na geração de energia; (iii) As propriedades químicas e físicas da madeira apresentarão maior influência na formação dos grupos; e (iv) A escolha de resíduo baseado no poder calorífico implica em maior equivalência energética.

Portanto, os objetivos desta pesquisa foram: (i) comparar o potencial energético de resíduos madeireiros de vinte espécies da Amazônia (algumas espécies são apresentadas pela primeira vez neste estudo) com base no poder calorífico; (ii) Analisar as variações interespecíficas das propriedades físicas e químicas e as relações dessas propriedades com o desempenho energético da lenha; (iii) Analisar a contribuição das variáveis da madeira no agrupamento multivariado por meio dos autovetores da Análise de componentes principais; e (iv) Comparar as equivalências energéticas por espécie e relacioná-las as propriedades dos resíduos.

7.2 Material e métodos

7.2.1 Fonte e amostragem dos resíduos madeireiros

Os resíduos do manejo florestal sustentável avaliados nesta pesquisa foram coletados na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim (coordenadas: 3° 30' e 3° 45' S - 48° 30' e 48° 45' O), localizada no município de Paragominas, Estado do Pará, Brasil (Fig. 1).

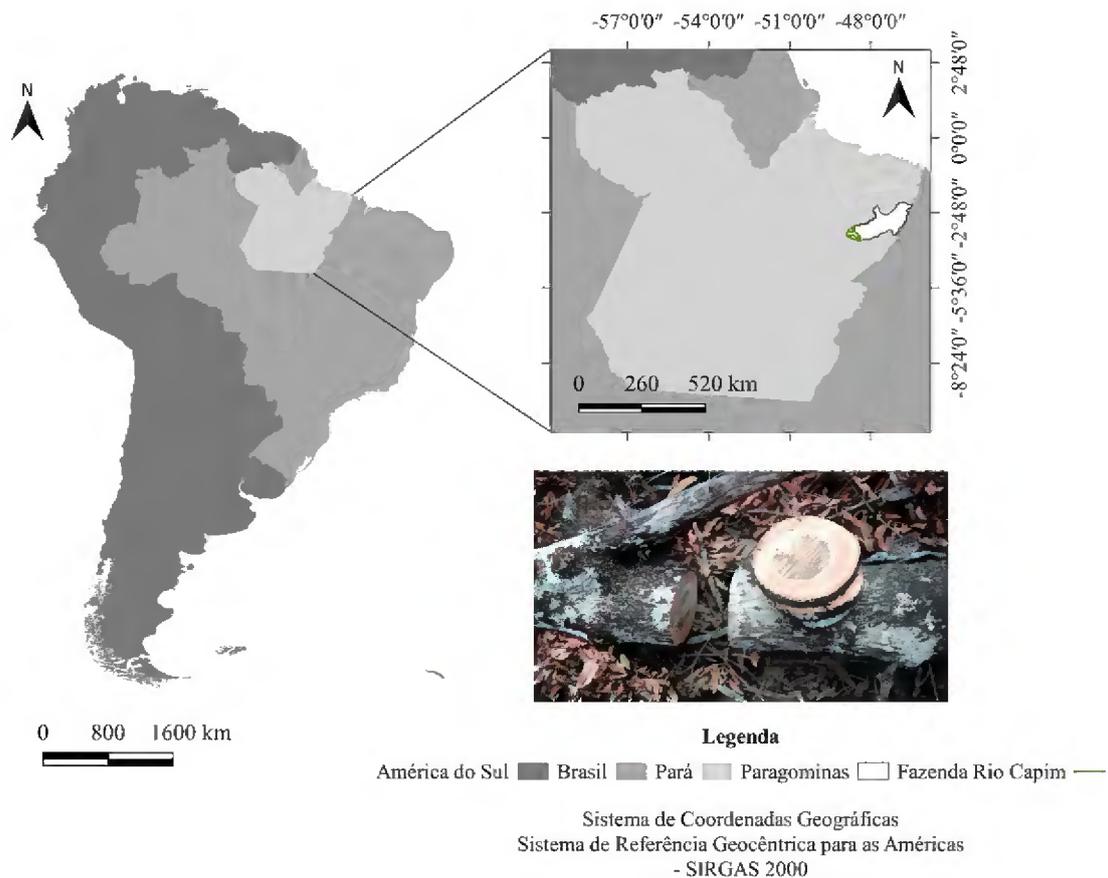


Fig. 1. Localização da Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Pará, Brasil.

O município de Paragominas apresenta clima do tipo Aw, conforme classificação de Köppen. A temperatura média e o total pluviométrico médio anual são 26,6°C e 1.805 mm, respectivamente [30]. A tipologia vegetal característica da área em que foram amostrados os resíduos é Floresta Ombrófila Densa Submontana [31].

Foram amostradas vinte espécies exploradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim. A amostragem foi realizada no galho com o maior diâmetro da copa pertencente a três árvores de cada espécie. Três discos de madeira por galho de árvore foram coletados após três dias do corte para análise laboratorial e apoio à identificação das espécies.

7.2.2 Identificação das espécies

A identificação das espécies foi realizada pelo Herbário e Xiloteca da Embrapa Amazônia Oriental. A identificação pelo herbário foi baseada na avaliação dos órgãos vegetativo (foliar) e reprodutivo (fruto e/ou flor). Quatro amostras de ramos com folhas foram coletadas quando as árvores não possuíam material reprodutivo (fruto ou flor).

Quando possuíam material reprodutivo, foram coletadas cinco amostras de galhos com folhas e frutos ou flores. Foram confeccionados corpos de prova de madeira para cada espécie com dimensões de 7 cm x 7 cm x 7 cm para a xiloteca.

Ao final, foram identificadas 20 espécies, pertencentes a 8 famílias botânicas. Apenas 17 espécies foram incorporadas à coleção do Herbário IAN e 2 ao Herbário Felisberto Camargo da Universidade Federal Rural da Amazônia (Tabela 1).

1 **Tabela 1**
 2 Espécies tropicais da Amazônia amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

N	Família	Nome científico	Nome comum	CRH	CRX
1	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu barrote	IAN198000*	X8712
2	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana	IAN198001*	X8725
3		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá	IAN197990*	X8717
4	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca	IAN197991*	X8713
5		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau	IAN197997*	-
6	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba	IAN197994*	X8715
7	Humiriaceae	<i>Vantanea parviflora</i> Lam.	Uxirana	FCUFRA7585**	-
8	Lecythidaceae	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	Tauari-liso	IAN197992*	X8724
9		<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco	IAN197996*	X8726
10		<i>Eschweilera pedicellata</i> (Rich.) S.A.Mori	Matamatá	FCUFRA7584**	-
11		<i>Eschweilera grandiflora</i> (Aubl.) Sandwith	Matamatá-preto	IAN197987*	X8721
12		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia	IAN197988*	X8723
13		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana	IAN197995*	X8714
14		<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	IAN197998*	X8718
15	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	Orelha-de-macaco	-	-
16		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana	IAN197989*	X8711
17		<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba	IAN197993*	X8720
18	Sapotaceae	<i>Pouteria oblanceolata</i> Pires	Abiu	IAN197999*	X8722
19		<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana	IAN197986*	X8716
20		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha	IAN197985*	X8719

3 *Espécies depositadas no Herbário IAN; ** Espécies depositadas no Herbário Felisberto Camargo; CRH: Código de registro no herbário; CRX: Código de registro na Xiloteca
 4 do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará, Brasil.
 5
 6

7.2.3 Propriedades físicas dos resíduos madeireiros

Um disco de madeira por árvore foi utilizado para a determinação das propriedades físicas (umidade, máximo teor de umidade e densidade básica). A umidade foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 14929 [32]. A densidade básica das cunhas de madeira opostas foi determinada de acordo com o procedimento descrito na norma NBR 11941 [33]. As espécies foram classificadas em classes de densidade (Muito baixa: 0,200 - 0,300 g cm⁻³; Baixa: 0,300 - 0,500 g cm⁻³; Média: 0,500 - 0,750 g cm⁻³; Alta: 0,750 - 1,000 g cm⁻³; e Muito alta > 1,000 g cm⁻³) de acordo com Csanády et al. [34]. O máximo teor de umidade foi calculado usando a Eq. (1) [35].

$$MTU = \left(\frac{1,54 - DB}{1,54 \times DB} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que, MTU: Máximo teor de umidade (%; base massa seca); 1,54 é a densidade real da madeira (g cm⁻³); DD: Densidade básica (g cm⁻³).

7.2.4 Análises químicas dos resíduos madeireiros

A caracterização química das madeiras residuais foi realizada por meio das análises químicas imediata (materiais voláteis, carbono fixo e cinzas), molecular (extrativos totais, lignina solúvel, lignina insolúvel e lignina total) e elementar (C, N, H, S e O).

A fração de madeira moída que foi retida entre as peneiras de 60 (0,250 mm) e 200 *mesh* (0,074 mm) foi usada para análise química elementar. Carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram quantificados em um Elementar Universal Analyzer® (modelo Vario Micro Cube). O conteúdo de oxigênio foi obtido por diferença (Eq. (2)).

$$O = 100 - C - H - N - S - TCz \quad (2)$$

Em que, O: Oxigênio (%); C: Carbono (%); H: Hidrogênio (%); N: Nitrogênio (%); S: Enxofre (%); e TCz: Teor de cinzas (%).

As razões N/C, H/C e O/C foram calculadas usando as Eqs. (3), (4) e (5), respectivamente.

$$H/C = \frac{H/1}{C/12} \quad (3)$$

Em que, H: Hidrogênio (%); C: Carbono (%); 1: Massa atômica do hidrogênio (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

$$N/C = \frac{N/14}{C/12} \quad (4)$$

Em que, N: Nitrogênio (%); C: Carbono (%); 14: Massa atômica do nitrogênio (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

$$O/C = \frac{O/16}{C/12} \quad (5)$$

Em que, O: Oxigênio (%); C: Carbono (%); 16: Massa atômica do oxigênio (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

O teor de extrativos totais foi determinado de acordo com a NBR [36]. Nesta determinação foram utilizados aproximadamente 2 g (base massa úmida) de madeira moída por galho amostrado. Três etapas foram seguidas: uma extração em etanol: tolueno (2:1 v/v) por 6 h, uma extração com etanol por 5 h em extrator soxhlet e, finalmente, uma extração em água destilada quente por 2 h. As amostras livres de extrativos foram levadas à estufa previamente calibrada a 103 ± 2 °C para obtenção da massa seca.

O teor de lignina insolúvel foi quantificado de acordo com a NBR 7989 pelo método de hidrólise ácida [37]. Primeiro, 0,3 g de serragem sem extrativos foram tratadas com ácido sulfúrico (72% - 3 mL por amostra) durante 2 h em banho-maria à temperatura ambiente (± 28 °C). Em seguida, as amostras foram fervidas em condição pressurizada por 4 h e filtradas em cadinhos com óxido de alumínio. Finalmente, os cadinhos com lignina insolúvel foram secos em estufa com circulação de ar forçada a 103 ± 2 °C. A lignina solúvel foi determinada por espectroscopia UV de acordo com Goldschimid [38]. A lignina total foi obtida pela soma de lignina insolúvel e solúvel.

O teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foram obtidos usando a norma D1762-84 [39]. Duas peneiras de malha de 40 (0,420 mm) e 60 (0,250 mm) foram utilizadas para classificar as frações de madeira moídas. O teor de materiais voláteis foi determinada com amostras de madeira aquecidas em um forno mufla a 950°C. O teor de cinzas foi obtido em um forno mufla aquecido a 600 ± 10 °C durante 6 h até a incineração completa da fração orgânica. Finalmente, o teor de carbono fixo foi determinado por diferença (100% - % de material volátil - % de cinzas).

7.2.5 Características energéticas dos resíduos madeireiros

O poder calorífico superior (PCS), base massa seca, foi determinado em uma bomba calorimétrica digital (modelo IKA C-200®), conforme norma E711-87 [40]. Enquanto que o poder calorífico inferior (PCI), base massa seca, foi estimado com base na Eq. (6), desconsiderando a quantidade de energia necessária para evaporar a água formada durante a combustão da madeira.

$$PCI = PCS - (206 \times H) \quad (6)$$

Em que, PCI: Poder calorífico inferior (kJ kg^{-1}); PCS: Poder calorífico superior (kJ kg^{-1}); H: Hidrogênio (%).

O poder calorífico líquido (PCL) foi calculado conforme a Eq. (7). Foram realizadas simulações no poder calorífico líquido dos resíduos madeireiros com diferentes umidades. Para isso, o maior limite de umidade simulada (30%) foi definido com base no menor valor para o máximo teor de umidade, visando acompanhar a performance energética de cada espécie nas mesmas faixas de umidade.

$$PCL = [PCS - (212,2 \times H) - 0,8 (O + N)] \times [1 - (0,01 \times Ubu)] - (24,43 \times Ubu) \quad (7)$$

Em que, PCL: Poder calorífico líquido (kJ kg^{-1}); PCS: Poder calorífico superior (kJ kg^{-1}); O: Oxigênio (%); N: Nitrogênio (%); Ubu: Umidade na base úmida (%).

A densidade energética unitária da madeira foi calculada levando em consideração o poder calorífico inferior e a densidade básica da madeira dos resíduos (Eq. (8)).

$$DE = PCI \times DB \quad (8)$$

Em que, DE: Densidade energética (MJ m^{-3}); PCI: Poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}); DB: Densidade básica (kg m^{-3}).

Foram realizadas conversões energéticas para tonelada equivalente de petróleo (tep) para fins de comparações com combustíveis fósseis. As variáveis estudadas foram: $\text{tep}_{\text{ton resíduos madeireiros}}$ (tonelada equivalente de petróleo à 1 tonelada de resíduos madeireiros) (Eq. (9)); $\text{tep}_{\text{m}^3 \text{ resíduos madeireiros}}$ (tonelada equivalente de petróleo à 1 m^3 de resíduos madeireiros) (Eq. (10)); EqVOC1 (Volume de óleo combustível equivalente à 1 tonelada de resíduos madeireiros) (Eq. (11)); EqVOC2 (Volume de óleo combustível

equivalente à 1 m³ de resíduos madeireiros) (Eq. (12)); e MCO₂ (Massa de CO₂ retida em 1 m³ de resíduos madeireiros) (Eq. (13)). Foi considerado que 1 tonelada equivalente de petróleo (tep) apresenta poder calorífico inferior de 41.868 MJ e o poder calorífico inferior do óleo combustível de 40,1 MJ kg⁻¹ [41].

$$\text{tep}_{\text{ton de resíduos madeireiros}} = \frac{\text{PCIRM}}{41.868} \quad (9)$$

Em que, tep_{ton de resíduos madeireiros}: tonelada equivalente de petróleo à 1 tonelada de resíduos madeireiros (tep ton⁻¹); PCIRM: Poder calorífico inferior dos resíduos madeireiros (MJ ton⁻¹); e 41.868: Densidade energética em 1 tep (MJ ton⁻¹).

$$\text{tep}_{\text{m}^3 \text{ de resíduos madeireiros}} = \frac{\text{DERM}}{41.868} \quad (10)$$

Em que, tep_{m³ de resíduos madeireiros}: tonelada equivalente de petróleo à 1 m³ de resíduos madeireiros (tep m⁻³); DERM: Densidade energética dos resíduos madeireiros (MJ m⁻³); e 41.868: Densidade energética em 1 tep (MJ ton⁻¹).

$$\text{EqVOC1} = \frac{\text{PCIRm}}{\text{DEOC}} \quad (11)$$

Em que, EqVOC1: Volume de óleo combustível equivalente à 1 tonelada de resíduos madeireiros (m³ ton⁻¹); PCIRm: Poder calorífico inferior dos resíduos madeireiros (MJ ton⁻¹); e DEOC: Densidade energética do óleo combustível (MJ ton⁻¹).

$$\text{EqVOC2} = \frac{\text{DERM}}{\text{DEOC}} \quad (12)$$

Em que: EqVOC2: Volume de óleo combustível equivalente à 1 m³ de resíduos madeireiros (m³ m⁻³); DERM: Densidade energética dos resíduos madeireiros (MJ ton⁻¹); e DEOC: Densidade energética do óleo combustível (MJ ton⁻¹).

$$\text{MCO}_2 = \text{DB} \times \left(\frac{\text{C}}{100}\right) \times \left(\frac{44}{12}\right) \quad (13)$$

Em que, MCO₂: Massa de CO₂ retida em 1 m³ de resíduos madeireiros (kg); DB: Densidade básica (kg m⁻³); C: Carbono (%); 44: Massa de CO₂ (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

O ranqueamento energético das espécies foi feito com base no índice de desempenho energético da lenha (IDEL) (Eq. (13)), proposto por Bhatt e Todaria [42]. Este índice considera a densidade básica e o poder calorífico da madeira como características positivas e, o teor de cinzas como característica negativa ao uso energético.

$$\text{IDEL} = \frac{\text{PCS} \times \text{DB}}{\text{TCz}} \quad (14)$$

Em que, IDEL: Índice de desempenho energético da lenha; PCS: Poder calorífico superior (MJ kg^{-1}); DB: Densidade básica (g cm^{-3}); TCz: Teor de cinzas (g/g).

7.2.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$) e de Bartlett ($p \leq 0,05$) para testar a normalidade dos resíduos e a homocedestividade das variâncias, respectivamente. Em seguida, os resultados foram submetidos a análise de variância considerando um delineamento inteiramente casualizado (DIC) visando verificar o efeito de espécie nas propriedades da madeira. Existindo diferença significativa, foi aplicado o teste de Scott-Knott para verificação da similaridade das espécies, em nível de significância de 5%.

Foi realizado um agrupamento multivariado das espécies por meio da análise de componentes principais. Foram utilizados os valores médios das propriedades da madeira que apresentaram efeito de espécie. O estudo dos escores das componentes principais possibilitou avaliar a similaridade ou dissimilaridade das espécies e discriminar quais as variáveis mais importantes na identificação dos grupos. As análises estatísticas foram feitas em linguagem R® versão 3.4.3 [43].

7.3 Resultados e discussão

7.3.1 Propriedades físicas e químicas dos resíduos madeireiros para carbonização e combustão

O efeito de espécie na densidade básica dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável foi confirmado (Fig. 2). Foi observada variação de $0,525 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,895 \text{ g cm}^{-3}$, incluindo espécies de densidade média (45%) e alta (55%), de acordo com Csanády et al. [34]. Com base no teste Scott-Knott foram formados 4 grupos de espécies, em que os maiores valores médios de densidade foram observados para as espécies *M. elata* ($0,895 \text{ g cm}^{-3}$), *D. excelsa* ($0,891 \text{ g cm}^{-3}$), *E. schomburgkii* ($0,836 \text{ g cm}^{-3}$) e *L. canescens* ($0,828 \text{ g cm}^{-3}$). Já as espécies *C. oblongifolia* ($0,554 \text{ g cm}^{-3}$) e *C. guianensis* ($0,525 \text{ g cm}^{-3}$) apresentaram as densidades mais baixas.

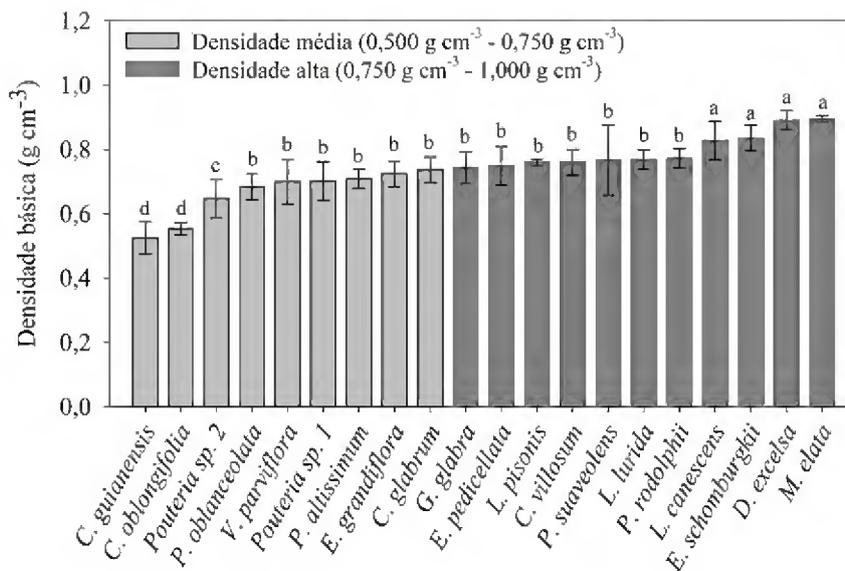


Fig. 2. Densidade básica dos resíduos madeiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Letras minúsculas iguais representam os grupos de medias formados pelo teste Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e as barras de erros, os desvios padrões.

As densidades básicas dos resíduos madeiros estão dentro da faixa esperada para espécies tropicais ($0,14 - 1,21 \text{ g cm}^{-3}$) [44]. As espécies de densidade média têm crescimento mais rápido, se comparadas com espécies de alta densidade básica [45], o que causou uma ampla variação nos valores de densidade. Nogueira et al. [46] apontam que espécies de crescimento rápido provavelmente alocam recursos para o crescimento em altura em detrimento da rigidez do tronco, resultando em um tronco de menor densidade e rápido crescimento apical. A literatura mostra que as espécies de *M. elata* e *C. guianensis* são classificadas como clímax [47] e tardia secundária [48,49], respectivamente. Ambas as espécies são consideradas tolerantes à sombra [50,51]. No entanto, *M. elata* é uma espécie emergente [52]. Este argumento sustenta a tendência desta espécie de aumentar o investimento em energia no crescimento do diâmetro após atingir o dossel da floresta. Como consequência, a árvore tende a aumentar a densidade básica da madeira. Além disso, outros fatores ecofisiológicos podem ter influenciado a densidade básica da madeira dessas espécies tropicais, como demandas estruturais, zona climática, umidade, idade, iluminação e sítio [53].

Madeiras com densidade acima de $0,5 \text{ g cm}^{-3}$ são mais adequadas para fins energéticos [54]. Madeiras mais densas reduzem o consumo específico de combustível e aumentam a eficiência de conversão de energia do reator durante a combustão [55]. Na carbonização, madeiras mais densas fornecem carvão vegetal mais denso, com maior resistência mecânica [56]. Além disso, os custos de transporte diminuem para madeira

mais densa, porque mais massa de resíduos será transportada no mesmo volume, se comparada à madeira de baixa densidade [57].

O máximo teor de umidade (46,8% - 128,0%) variou amplamente entre as madeiras residuais das diferentes espécies (Fig. 3). O teste aplicado segregou as espécies em 3 grupos distintos. As espécies *C. oblongifolia* e *C. guianensis* destacaram-se com os maiores valores médios, assim como *M. elata*, *D. excelsa*, *E. schomburgkii* e *L. canescens*, com as médias mais baixas.

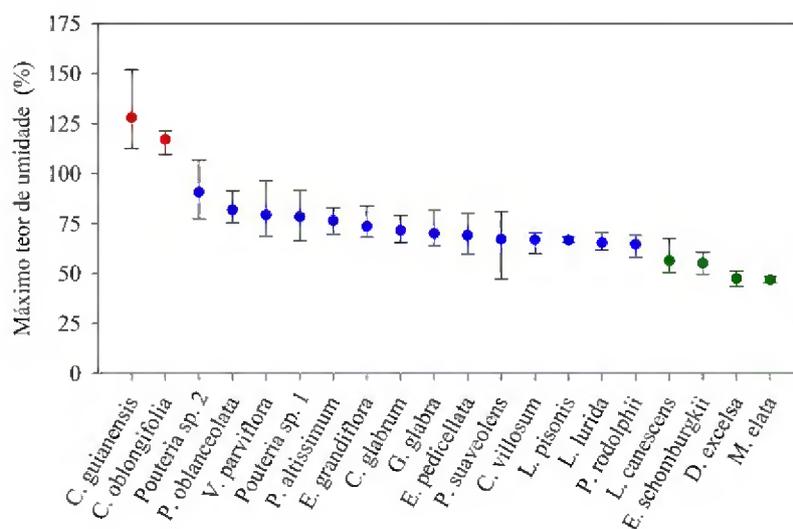


Fig. 3. Máximo teor de umidade dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Diferentes cores representam os grupos de médias formados pelo teste Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e as barras de erros, os valores de máximo e mínimo.

As espécies com as maiores densidades básicas (*M. elata*, *D. excelsa*, *E. schomburgkii* e *L. canescens*), apresentaram os menores valores para o máximo teor de umidade, devido ao menor volume de espaços vazios a serem preenchidos com água de capilaridade [58]. Simular a máxima umidade da madeira é importante pois normalmente as madeiras residuais são utilizadas com umidades elevadas, o que tem implicações negativas na carbonização e/ou combustão. Correlação negativa entre a densidade básica da madeira e o máximo teor de umidade já foi evidenciada na literatura [59]. A umidade na matéria-prima afeta o conteúdo energético, eficiência do transporte e o processo de conversão. Dessa forma, é desejável menor conteúdo de água na madeira (< 20%), pois aumenta o poder calorífico e a eficiência da caldeira de combustão, além de reduzir a energia empregada na etapa de secagem da lenha [60].

Com relação a análise química elementar, houve efeito significativo de espécie apenas para o conteúdo de carbono (Tabela 2). A média de carbono elementar foi maior

para *E. pedicellata* e menor para *E. grandiflora*, evidenciando variação dentro do mesmo gênero para este elemento. Todas as espécies apresentaram valores médios para nitrogênio elementar abaixo de 2,0%. O hidrogênio elementar dos resíduos lenhosos variou entre 6,21% (*C. villosum*) e 6,78% (*P. rodolphii*). O conteúdo de enxofre é insignificante e se manteve abaixo de 0,2% para todas as espécies, enquanto que o oxigênio variou de 39,44% (*E. schomburgkii*) a 41,87% (*E. grandiflora*).

1 **Tabela 2**
 2 Análise química elementar dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

Espécie	Análise química elementar								Relação atômica					
	C (%)		N (%)		H (%)		O (%)		H/C		O/C		N/C	
<i>E. pedicellata</i>	52,36 ± 1,99	a	1,08 ± 0,14	a	6,33 ± 0,27	a	39,92 ± 1,90	a	1,45 ± 0,12	b	0,57 ± 0,05	a	0,02 ± 0,00	a
<i>L. pisonis</i>	52,16 ± 1,13	a	1,12 ± 0,04	a	6,22 ± 0,08	a	40,05 ± 1,08	a	1,43 ± 0,01	b	0,58 ± 0,03	a	0,02 ± 0,00	a
<i>P. suaveolens</i>	52,01 ± 0,09	a	1,29 ± 0,07	a	6,28 ± 0,12	a	40,07 ± 0,23	a	1,45 ± 0,03	b	0,58 ± 0,00	a	0,02 ± 0,00	a
<i>E. schomburgkii</i>	51,80 ± 0,60	a	1,75 ± 0,72	a	6,58 ± 0,15	a	39,44 ± 1,29	a	1,52 ± 0,05	a	0,57 ± 0,03	a	0,03 ± 0,01	a
<i>D. excelsa</i>	51,65 ± 0,59	a	0,82 ± 0,03	a	6,50 ± 0,13	a	40,71 ± 0,71	a	1,51 ± 0,01	a	0,59 ± 0,02	a	0,01 ± 0,00	a
<i>G. glabra</i>	51,01 ± 0,80	a	1,04 ± 0,28	a	6,30 ± 0,04	a	41,25 ± 0,70	a	1,48 ± 0,01	b	0,61 ± 0,02	a	0,02 ± 0,01	a
<i>C. villosum</i>	50,96 ± 1,46	a	1,02 ± 0,30	a	6,21 ± 0,55	a	40,98 ± 1,46	a	1,46 ± 0,14	b	0,60 ± 0,04	a	0,02 ± 0,00	a
<i>M. elata</i>	50,95 ± 0,15	a	1,00 ± 0,14	a	6,27 ± 0,03	a	41,29 ± 0,25	a	1,48 ± 0,00	b	0,61 ± 0,01	a	0,02 ± 0,00	a
<i>P. altissimum</i>	50,92 ± 1,15	a	0,88 ± 0,09	a	6,61 ± 0,01	a	40,96 ± 1,24	a	1,56 ± 0,03	a	0,60 ± 0,03	a	0,01 ± 0,00	a
<i>P. rodolphii</i>	50,91 ± 0,52	a	0,76 ± 0,13	a	6,78 ± 0,07	a	40,62 ± 1,09	a	1,60 ± 0,01	a	0,60 ± 0,02	a	0,01 ± 0,00	a
<i>C. glabrum</i>	50,71 ± 1,00	a	1,10 ± 0,07	a	6,46 ± 0,11	a	41,04 ± 1,10	a	1,53 ± 0,00	a	0,61 ± 0,03	a	0,02 ± 0,00	a
<i>P. oblanceolata</i>	50,57 ± 0,48	b	1,07 ± 0,16	a	6,47 ± 0,33	a	41,11 ± 0,50	a	1,53 ± 0,08	a	0,61 ± 0,01	a	0,02 ± 0,00	a
<i>Pouteria</i> sp. 2	50,29 ± 0,96	b	1,23 ± 0,36	a	6,51 ± 0,13	a	40,76 ± 1,34	a	1,55 ± 0,06	a	0,61 ± 0,03	a	0,02 ± 0,01	a
<i>Pouteria</i> sp. 1	50,06 ± 0,68	b	1,21 ± 0,21	a	6,45 ± 0,22	a	41,07 ± 1,11	a	1,55 ± 0,07	a	0,62 ± 0,02	a	0,02 ± 0,00	a
<i>V. parviflora</i>	50,00 ± 0,66	b	1,24 ± 0,10	a	6,31 ± 0,06	a	40,83 ± 0,80	a	1,51 ± 0,01	a	0,61 ± 0,02	a	0,02 ± 0,00	a
<i>C. guianensis</i>	49,94 ± 0,69	b	1,06 ± 0,12	a	6,71 ± 0,11	a	41,24 ± 0,59	a	1,61 ± 0,00	a	0,62 ± 0,02	a	0,02 ± 0,00	a
<i>C. oblongifolia</i>	49,73 ± 0,93	b	1,37 ± 0,52	a	6,41 ± 0,33	a	41,52 ± 0,91	a	1,55 ± 0,11	a	0,63 ± 0,02	a	0,02 ± 0,01	a
<i>L. lurida</i>	49,72 ± 1,35	b	1,11 ± 0,13	a	6,58 ± 0,14	a	41,56 ± 1,44	a	1,59 ± 0,05	a	0,63 ± 0,04	a	0,02 ± 0,00	a
<i>L. canescens</i>	49,71 ± 0,64	b	1,17 ± 0,05	a	6,30 ± 0,02	a	40,25 ± 0,59	a	1,52 ± 0,02	a	0,61 ± 0,01	a	0,02 ± 0,00	a
<i>E. grandiflora</i>	49,18 ± 0,22	b	1,14 ± 0,31	a	6,40 ± 0,22	a	41,87 ± 0,50	a	1,56 ± 0,06	a	0,64 ± 0,01	a	0,02 ± 0,01	a
CVe (%)	1,82		23,31		3,14		2,53		3,99		4,20		22,90	

3 CVe = Coeficiente de variação experimental; C = Carbono; N = Nitrogênio; H = Hidrogênio; S = Enxofre; O = Oxigênio. Colunas com letras minúsculas diferentes indicam
 4 diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Média ± desvio padrão.
 5

Outros estudos evidenciaram o efeito de espécie sob os elementos químicos da madeira. A citar, variações significativas em C (47,70% - 48,74%), H (5,84% - 6,05%) e S (0,006% - 0,043%) para 4 espécies tropicais (*Hymenolobium petraeum*, *Dipteryx pollyphylla*, *Hymenaea couybaril* e *Nectandra rubra*) da Amazônia brasileira [61]. Comparado ao nosso estudo, todos os clones de *Eucalyptus* estudados por Santos et al. [62] apresentaram teor de carbono elementar inferior, próximo de 49%, mostrando que os resíduos do manejo florestal são promissores para a finalidade energética.

Madeiras com alto conteúdo de C e H são preferíveis para produção bioenergética, pois são os elementos da biomassa que podem gerar energia na forma de calor [63]. Elevado conteúdo de O afeta negativamente a qualidade do biocombustível, pois reduz o poder calorífico da biomassa residual [64]. É importante enfatizar que baixos níveis de S e N são desejados para evitar a formação e emissão de gases sulfurosos e nitrosos na atmosfera.

Com relação as relações atômicas, houve apenas diferenças estatísticas entre os resíduos das espécies tropicais para a relação H/C ($p \leq 0,05$). As oscilações observadas para estas relações foram: 1,43 (*L. pisonis*) – 1,61 (*C. guianensis*) para H/C; 0,57 (*E. schomburgkii* e *E. pedicellata*) – 0,64 (*E. grandiflora*) para O/C; e 0,01 (*D. excelsa*, *P. altissimum* e *P. rodolphii*) – 0,03 (*E. schomburgkii*) para N/C.

Nos biocombustíveis, é desejável uma alta relação H/C e menores relações O/C e N/C, porque mais energia será liberada pela queima [63] e menos gases serão gerados e emitidos para a atmosfera pelo processo de combustão [65]. Houve aumento no PCS para as madeiras residuais com baixa relação O/C e alta H/C, como observado para *E. schomburgkii* (Fig. 4). Analisando as relações atômicas, destaca-se *E. schomburgkii*, *D. excelsa*, *P. altissimum* e *P. rodolphii* como espécies promissoras, com menor tendência de emissão de gases e maior geração energética. Apesar da espécie *C. guianensis* apresentar a maior relação H/C, os valores observados para O/C, N/C, DB e TCz reduzem a qualidade dessa espécie como um combustível alternativo para o suprimento dos sistemas industriais e domésticos da Amazônia.

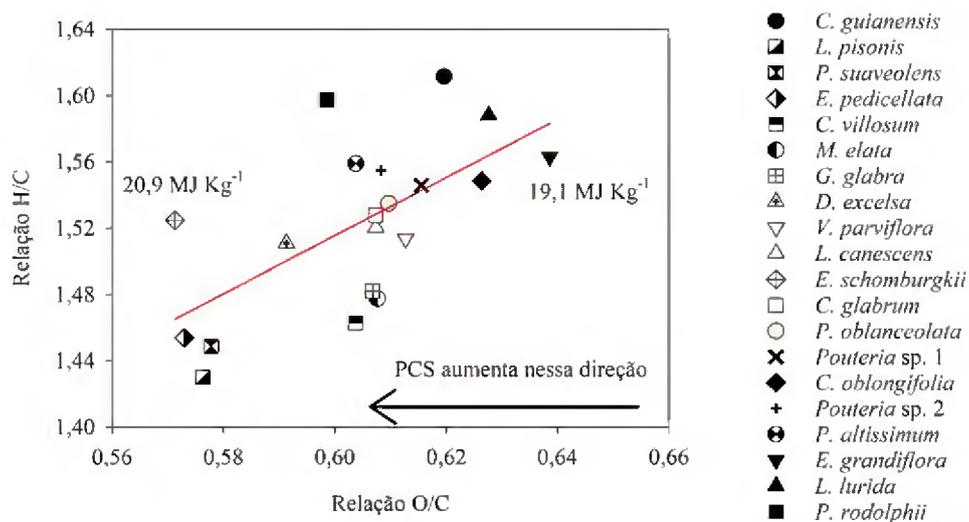


Fig. 4. Diagrama de Van Krevelen dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

A média dos valores dos constituintes químicos estruturais (lignina solúvel e insolúvel) e não estruturais (extrativos) da parede celular são apresentados na Fig. 5. Pode ser observado uma ampla variação nos valores da análise química molecular dos resíduos madeireiros das 20 espécies tropicais.

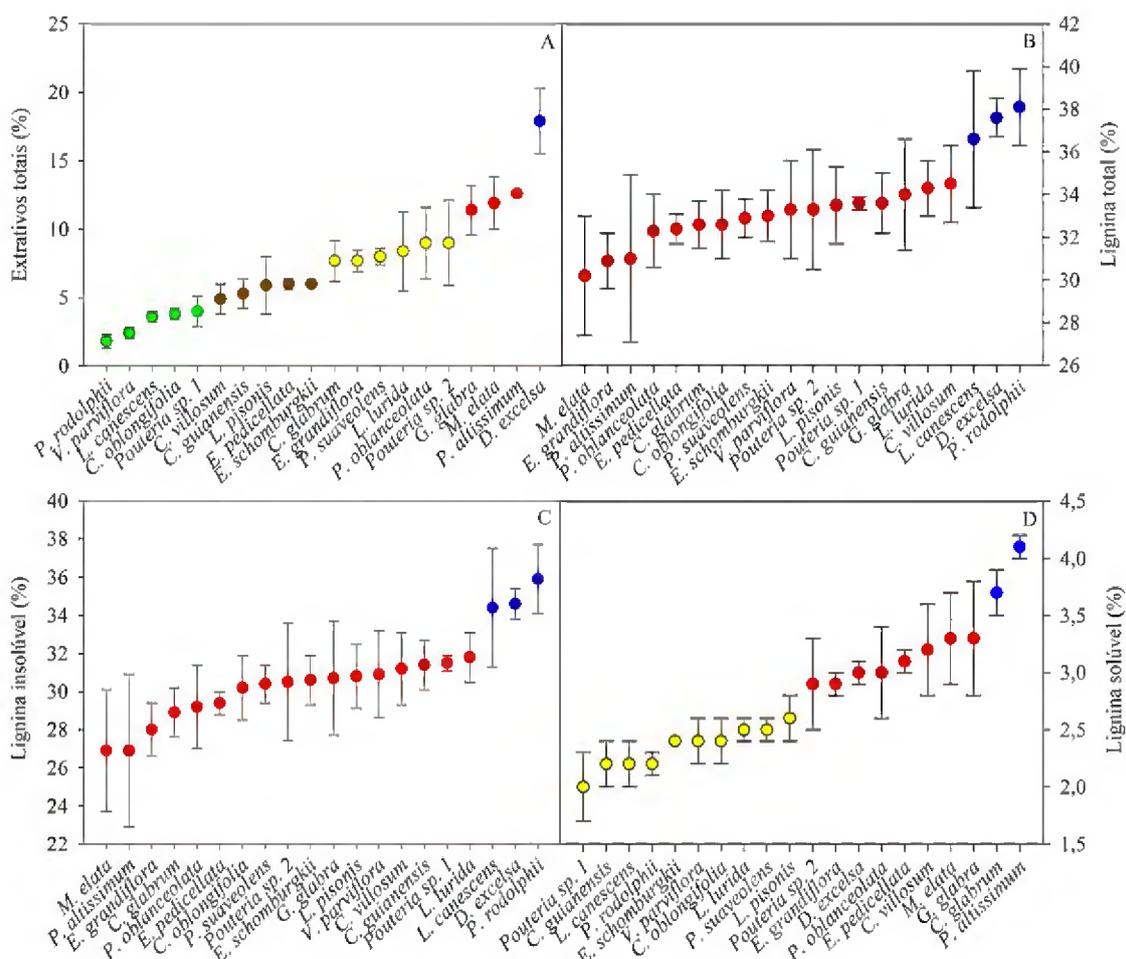


Fig. 5. Composição química molecular dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Diferentes cores representam os grupos e médias formados pelo teste de Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e a barra de erros, os desvios padrões.

A espécie *D. excelsa* se destacou com o maior teor médio de extrativos totais (17,9%). As menores médias foram registradas para as espécies *P. rodolphii* (1,8%), *V. parviflora* (2,4%), *L. canescens* (3,6%), *C. oblongifolia* (3,8%) e *Pouteria* sp. 1 (4,0%). Estudando 36 espécies amazônicas, Santana e Okino [66] verificaram variação semelhante para o teor de extrativos totais (0,6% - 17,3%). Santana et al. [67] estudando *Alexa grandiflora*, verificaram teor de extrativos totais em torno de 8,42%. Estudos evidenciam que os extrativos contribuem com o aumento do poder calorífico da madeira, sendo aconselhável priorizar resíduos com altos níveis desses constituintes químicos para a geração de energia térmica [68].

Poletto [69] estudaram os efeitos da remoção dos extrativos na combustibilidade de duas espécies florestais (*Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*). Sem extrativos, foi verificado maior tempo de degradação e menor taxa de degradação. O estudo reporta que nessas condições as madeiras são mais estáveis termicamente, sendo necessário maior

gasto energético para promover a degradação térmica da madeira. Madeiras com elevado teor de extrativos, como é o caso da *D. excelsa*, apresenta melhor combustibilidade em baixas temperaturas (150°C – 600°C) [70], pois estes elementos químicos apresentam alta volatilidade e aceleram o processo de degradação térmica.

Com relação ao teor de lignina total verificaram-se médias variando de 30,2% a 38,1%. As espécies *P. rodolphii*, *D. excelsa* e *L. canescens* se destacaram com as maiores médias, em ordem 38,1%, 37,6% e 36,6%. As espécies citadas apresentaram destaque no teor de lignina insolúvel, com as respectivas médias de 35,9%, 34,6% e 34,4%. Resultados diferentes foram observados para o teor de lignina solúvel, em que *P. altissimum* e *C. glabrum* formaram o grupo com as maiores médias, *Pouteria* sp. 1, *C. guianensis*, *L. canescens*, *P. rodolphii*, *E. schomburgkii*, *L. lurida*, *P. suaveolens* e *L. pisonis* formaram o grupo com as menores médias.

Resultados similares para o teor de lignina total foi verificado por Moulin et al. [71] estudando o resíduo do processamento mecânico de *Apuleia leiocarpa* (29,50%), *Manilkara huberi* (34,68%) e *Tabebuia serratifolia* (33,47%). Alto teor de lignina influencia positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em carbono fixo [72]. Todas as espécies estudadas apresentaram teor de lignina total superior ($\geq 28\%$) ao indicado por Pereira et al. [73] para produção de carvão vegetal. Quanto ao processo de combustão, estudos evidenciam relação linear positiva entre o teor de lignina e o poder calorífico da madeira [74,75]. Dessa forma, maior proporção de lignina contribui para o aumento da energia gerada pela queima direta da lenha [76].

As espécies tropicais se diferenciaram estatisticamente quanto ao teor de materiais voláteis (TMV), carbono fixo (TCF) e cinzas (TCz) (Fig. 6). Foram verificadas variações de 76,7% - 82,8% para TMV (Fig. 6A), 16,5% - 22,0% para TCF (Fig. 6B) e, 0,3% - 2,5% para TCz (Fig. 6C).

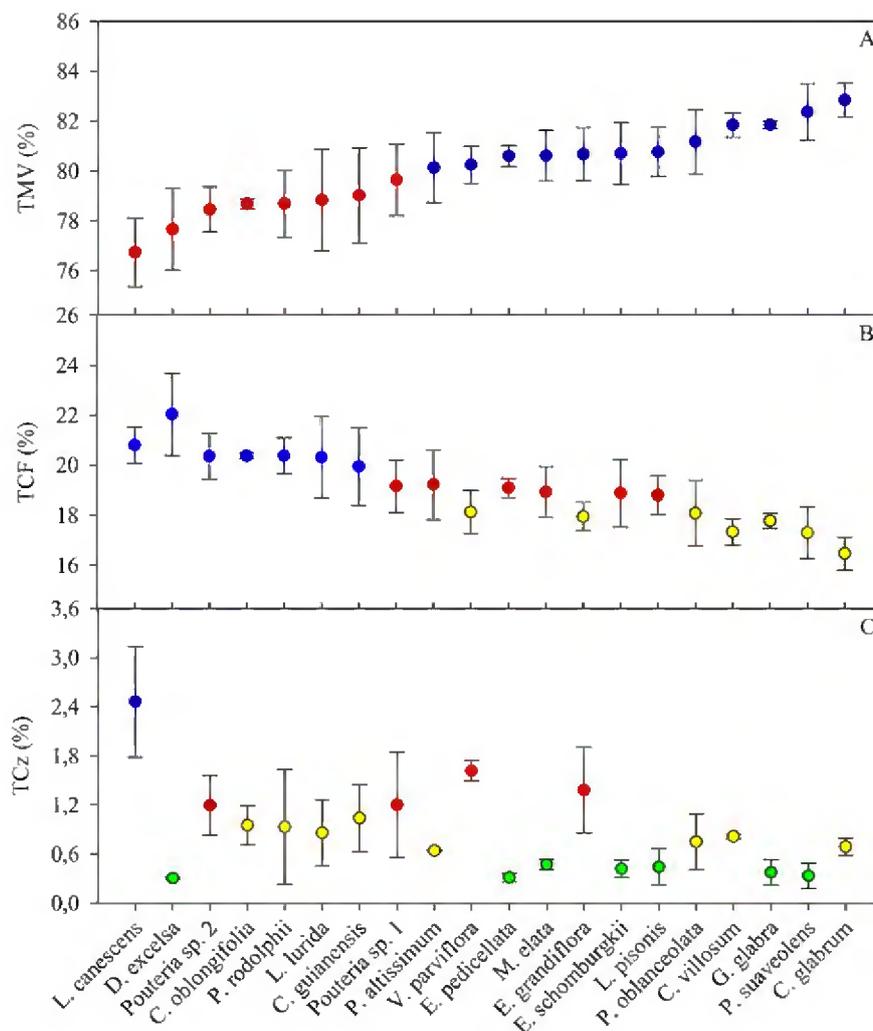


Fig. 6. Análise química imediata dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Diferentes cores representam os grupos e medias formados pelo teste de Scott-Knott test ($p \leq 0,05$) e a barra de erros, os desvios padrões.

Os resíduos de *L. canescens*, *D. excelsa*, *Pouteria sp. 2*, *C. oblongifolia*, *P. rodolphii*, *L. lurida*, *C. guianensis* e *Pouteria sp. 1* apresentaram os níveis mais baixos de materiais voláteis e maiores de carbono fixo. Isso está provavelmente relacionado ao teor de lignina total apresentado por essas espécies (Fig. 5). O estudo das proporções de materiais voláteis e carbono fixo para bioenergia é importante porque essas frações químicas influenciam a reação de oxidação na queima direta de lenha, afetando consequentemente a taxa de queima e a homogeneidade da chama na câmara de combustão [77].

Amirta et al. [78] avaliando o potencial de 31 espécies florestais nativas em uma província da Indonésia para produção de energia elétrica, destacaram espécies com baixa umidade e elevados conteúdos de materiais voláteis, C, H e poder calorífico. Segundo os autores, o maior TMV permite a biomassa entrar em ignição mais facilmente. Em nosso

estudo foi verificada variação expressiva de carbono fixo e teor de cinzas para as espécies *E. pedicellata* e *E. grandiflora*, o que corrobora a importância da caracterização química dos resíduos madeireiros para fins energéticos. Assim, a segregação de madeira com base no gênero pode resultar em implicações negativas para um sistema local de conversão de energia. Além disso, espécies com propriedades de madeira semelhantes são mais promissoras para essa finalidade.

Em um sistema autotérmico de carbonização, parte da lenha utilizada é queimada para o fornecimento de energia térmica para carbonizar o restante [79]. Sob essa ótica, as madeiras de *L. canescens*, *D. excelsa*, *Pouteria* sp. 2, *C. oblongifolia*, *P. rodolphii*, *L. lurida*, *C. guianensis* e *Pouteria* sp. 1 são recomendadas para carbonização por apresentarem maior proporção de carbono fixo. Isso propiciará uma carbonização mais lenta e facilitará o controle do processo [80]. Além disso, menor TMV reduzirá a reatividade da combustão [81].

Para a combustão direta, destacamos as mesmas espécies anteriormente citadas para carbonização, pois o maior TCF implicará em maior energia liberada na combustão, especialmente na segunda fase dessa rota de conversão energética, que é caracterizada pela queima de carbono sólido [57]. Madeiras com elevado TCF apresenta elevado PCS, conseqüentemente, liberará energia por mais tempo durante o processo de combustão [82].

O maior e menor valor médio do conteúdo de cinzas foi verificado para *L. canescens* e *D. excelsa*, respectivamente. O teor de cinzas representa o resíduo inorgânico que permanece após a combustão do carbono fixo. A utilização de madeira com alto teor de cinza danifica as tubulações e câmaras de combustão, devido a deposição de escórias e incrustações [83]. Para fins energéticos, recomenda-se madeiras com menor teor de cinzas possível. Alto conteúdo de inorgânicos reduz o poder calorífico e a eficiência da combustão [84]. Implicações negativas das cinzas sobre o PCS foram verificadas em nosso estudo para *L. canescens*, *V. parviflora*, *Pouteria* sp. 1, *Pouteria* sp. 2 e *E. grandiflora*.

Em geral, densidade básica, densidade energética, teor de cinzas e extrativos totais apresentaram ampla variação entre as espécies. O conteúdo de carbono, lignina total, carbono fixo, materiais voláteis e o poder calorífico foram as propriedades com as menores variações interespecíficas. Por um lado, as espécies mais desejáveis para fins energéticos foram: *D. excelsa*, *E. schomburgkii*, *M. elata*, *G. glabra*, *L. lurida*, *P. rodolphii* e *P. altissimum*. Por outro lado, *C. oblongifolia*, *C. guianensis*, *L. canescens*, *V.*

parviflora, *E. grandiflora*, *Pouteria* sp. 1 e *Pouteria* sp. 2 são as espécies com características menos ideais para energia.

7.3.2 Propriedades energéticas, ranqueamento e agrupamento dos resíduos madeireiros

Houve efeito de espécie ($p \leq 0,05$) nos parâmetros poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), densidade energética (DE) e índice de desempenho energético da lenha (IDEL) (Tabela 3). Para PCS, os resíduos madeireiros de *E. schomburgkii* (20,8 MJ kg⁻¹) e *D. excelsa* (20,4 MJ kg⁻¹) se destacaram com as maiores médias. As espécies *C. oblongifolia*, *E. grandiflora*, *Pouteria* sp. 2, *C. guianensis*, *V. parviflora*, *L. canescens*, *L. pisonis* e *E. pedicellata* formaram o grupo com os menores valores para PCS. O PCI variou de 17,7 MJ Kg⁻¹ (*E. grandiflora*) a 19,5 MJ Kg⁻¹ (*E. schomburgkii*).

As espécies *D. excelsa*, *E. schomburgkii* e *M. elata* apresentaram as maiores médias para densidade energética. Em ordem, *D. excelsa* (1°), *P. suaveolens* (2°), *E. pedicellata* (3°), *G. glabra* (4°), *E. schomburgkii* (5°), *L. pisonis* (6°) e *M. elata* (7°) foram as melhores ranqueadas com base no IDEL, mostrando que são as mais promissoras para a finalidade energética. A madeira residual da espécie *L. canescens* apresentou o menor valor médio para IDEL.

Tabela 3

Ranqueamento energético dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

Espécie	PCS (MJ Kg ⁻¹)		PCI (MJ Kg ⁻¹)		DE (GJ m ⁻³)		IDEL	Ranking	
<i>D. excelsa</i>	20,4 ± 0,1	b	19,0 ± 0,1	b	16,8 ± 0,7	a	6.020 ± 467	a	1°
<i>P. suaveolens</i>	20,1 ± 0,2	c	18,8 ± 0,2	c	14,3 ± 2,2	b	5.458 ± 2.643	a	2°
<i>E. pedicellata</i>	19,5 ± 0,2	d	18,2 ± 0,3	d	13,5 ± 1,1	b	4.766 ± 669	a	3°
<i>G. glabra</i>	20,0 ± 0,3	c	18,8 ± 0,3	c	13,9 ± 1,2	b	4.502 ± 1.766	a	4°
<i>E. schomburgkii</i>	20,8 ± 0,0	a	19,5 ± 0,1	a	16,2 ± 0,9	a	4.404 ± 1.366	a	5°
<i>L. pisonis</i>	19,4 ± 0,1	d	18,1 ± 0,1	d	13,7 ± 0,2	b	3.972 ± 1.869	a	6°
<i>M. elata</i>	19,9 ± 0,1	c	18,6 ± 0,1	c	16,5 ± 0,3	a	3846 ± 521	a	7°
<i>P. rodolphii</i>	20,2 ± 0,1	c	18,8 ± 0,1	c	14,4 ± 0,6	b	2.418 ± 1.604	b	8°
<i>P. altissimum</i>	19,9 ± 0,5	c	18,5 ± 0,5	c	13,0 ± 0,9	c	2.212 ± 178	b	9°
<i>C. glabrum</i>	19,8 ± 0,2	c	18,5 ± 0,2	c	13,5 ± 0,5	b	2.157 ± 263	b	10°
<i>P. oblongeolata</i>	20,0 ± 0,2	c	18,7 ± 0,3	c	12,7 ± 0,8	c	2.151 ± 1.047	b	11°
<i>L. lurida</i>	20,2 ± 0,3	c	18,8 ± 0,2	c	14,4 ± 0,5	b	2.150 ± 1.091	b	12°
<i>C. villosum</i>	20,1 ± 0,2	c	18,8 ± 0,2	c	14,2 ± 0,7	b	1.884 ± 102	b	13°
<i>Pouteria</i> sp. 1	19,8 ± 0,4	c	18,4 ± 0,4	c	12,9 ± 1,3	c	1.507 ± 1.018	b	14°
<i>C. oblongifolia</i>	19,4 ± 0,1	d	18,1 ± 0,1	d	9,9 ± 0,3	d	1.182 ± 288	b	15°
<i>E. grandiflora</i>	19,1 ± 0,0	d	17,7 ± 0,1	d	12,8 ± 0,8	c	1.157 ± 602	b	16°
<i>Pouteria</i> sp. 2	19,5 ± 0,3	d	18,2 ± 0,4	d	11,7 ± 1,0	c	1.111 ± 256	b	17°
<i>C. guianensis</i>	19,4 ± 0,4	d	18,0 ± 0,4	d	9,4 ± 0,9	d	1.103 ± 466	b	18°
<i>V. parviflora</i>	19,5 ± 0,1	d	18,2 ± 0,1	d	12,6 ± 1,3	c	845 ± 58	b	19°
<i>L. canescens</i>	19,4 ± 0,2	d	18,1 ± 0,2	d	14,9 ± 1,2	b	703 ± 261	b	20°
CVe (%)	1,18		1,30		7,19		40,23		

CVe = Coeficiente de variação experimental; PCS = Poder calorífico superior; PCI = Poder calorífico inferior; DE = Densidade energética; e IDEL = Índice de desempenho energético da lenha. Colunas com letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Média ± desvio padrão.

Avaliando o conteúdo energético das espécies *C. sativa* e *P. pinaster* na região noroeste da Espanha, Álvares-Álvares et al. [85] verificaram resultados inferiores aos nossos para PCS, próximo de 19,0 MJ Kg⁻¹. Dias Júnior et al. [86] reportaram o PCI de 17,75 MJ Kg⁻¹ para *E. grandis* x *E. urophylla*, menor que os valores de PCI das espécies nesse estudo. No Brasil é comum o uso da madeira de *Eucalyptus* para a geração de energia e, portanto, os valores encontrados para o PCS e PCI reforçam o potencial dos resíduos madeireiros gerados nos planos de manejo florestal sustentável na região amazônica como melhores combustíveis.

O destaque que as espécies *E. schomburgkii* e *D. excelsa* apresentaram para o PCS pode ser explicado pela alta relação H/C e baixa O/C (Fig. 4). Em contrapartida, os menores valores de poderes caloríficos verificados para algumas espécies (*C. oblongifolia*, *E. grandiflora*, *Pouteria* sp. 2, *C. guianensis*, *V. parviflora*, *L. canescens*, *L. pisonis* e *E. pedicellata*) pode ser atribuído aos altos níveis de cinzas. Essa fração

inorgânica não contribui no processo de combustão, mas são contabilizados na massa do combustível submetido ao processo de queima [87]. Estudo conduzido por Dias Júnior et al. [88] mostrou que 81% da proporção do PCS encontrado para 10 espécies do semiárido brasileiro foi explicado pelo teor de lignina e cinzas. Os autores mostraram que o PCS se correlaciona positivamente com o conteúdo de lignina e negativamente com o conteúdo de cinzas. O poder calorífico é uma propriedade energética importante na seleção de combustíveis para geração de energia térmica, porque mede a energia ou o calor liberado pela combustão completa de uma unidade de massa de combustível [89].

Valores semelhantes para a densidade energética foram observados em estudos anteriores para *Tachigali vulgaris* [90], *Scleronema micranthum*, *Scleronema* sp. e *Caryocar villosum* [91]. A qualidade energética de madeiras nativas do Brasil é evidenciada na literatura, entretanto, para viabilizar futuras instalações de sistemas de conversão locais baseados na geração de calor ou na produção de carvão vegetal, tornam-se necessários novos estudos com mapeamentos das fontes de lenha na Amazônia e viabilidade econômica da atividade.

Nesse estudo, houve maior influência da densidade básica da madeira na variação da densidade energética, em que as madeiras de maior densidade básica (*M. elata*, *D. excelsa* e *E. schomburgkii*) apresentaram as maiores densidades energéticas, o que estimula o interesse por resíduos madeireiros mais densos. A densidade energética é um importante parâmetro quantitativo para analisar a viabilidade energética de combustíveis sólidos, pois avalia a energia térmica que pode ser liberada durante a combustão em um dado volume de madeira [92].

Estudando as propriedades energéticas de 5 espécies florestais do Níger (*Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Guiera senegalensis* e *Piliostigma reticulatum*), Montes et al. [93] verificou variação média de 743 – 2.777 para o IDEL, valores próximos aos das espécies do segundo grupo formado pelo teste Scott-Knott nesse estudo. Variação de 295,61 a 2804,22 para IDEL foi verificada por Kumar et al. [94] avaliando 26 espécies arbóreas na Índia Ocidental. Os dois estudos citados apresentam resultados inferiores aos encontrados em nosso estudo para as espécies do grupo 1 (Tabela 3), cuja variação é de 3.846 (*M. elata*) – 6.020 (*D. excelsa*). Variação similar (585 – 6.209) foi reportada por Singh et al. [95] estudando 32 espécies nativas da Índia. O IDEL foi adotado e recomendado recentemente por outros estudos para ranqueamento energético da lenha no Brasil [96], México [97] Índia [9], Uganda [98], Moçambique [7], Nigéria [8], Bangladesh [99] e Espanha [100].

Em nosso estudo, o IDEL das espécies *D. excelsa*, *P. suaveolens*, *E. pedicellata*, *G. glabra*, *E. schomburgkii*, *L. pisonis* e *M. elata* foi muito influenciado pelo conteúdo de carbono elementar e extrativos totais nos resíduos madeiros (Fig. 7). Apesar de alta PCS e DB, *L. canescens* foi a pior ranqueada devido ao maior teor de cinzas na madeira, o que afeta negativamente a qualidade energética da madeira dessa espécie. O IDEL de *L. canescens* foi 8,6 vezes menor do que o IDEL reportado para *D. excelsa*.

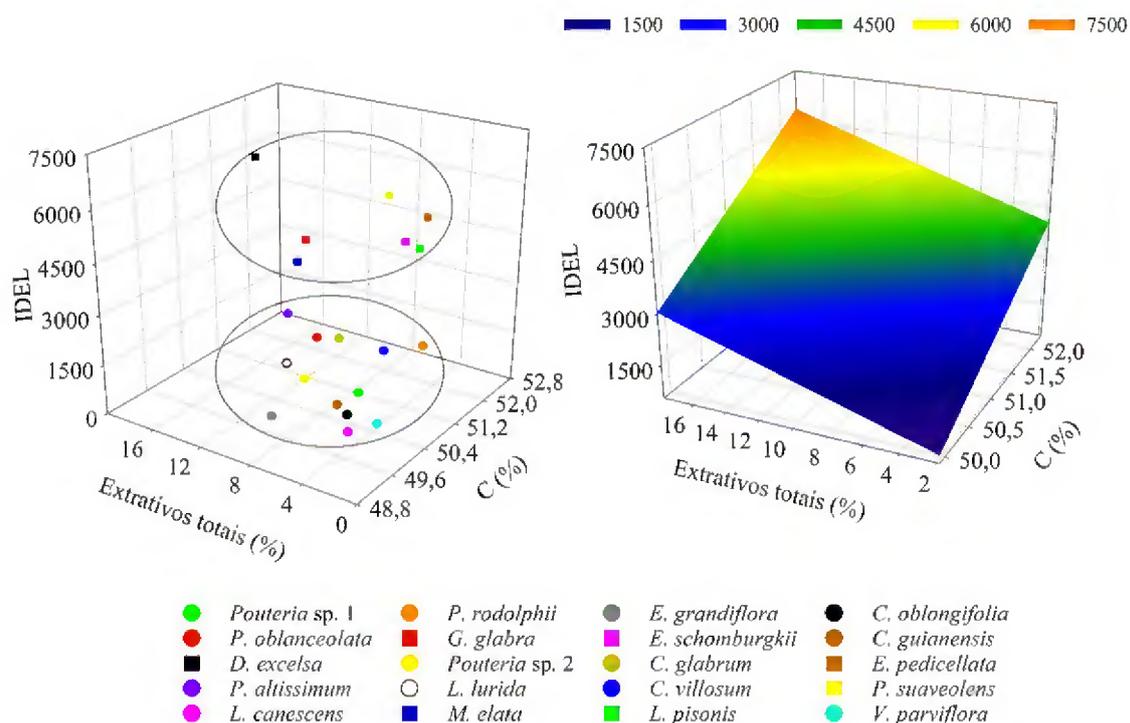


Fig. 7. Relação entre o índice de desempenho energético da lenha (IDEL), extrativos totais e carbono elementar (C) verificada para os resíduos madeiros explorados em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Em que: $IDEL = -68849,27 + 1388,97 * C + 144,23 * Extrativos$, $R^2 = 0,84$ ($F_c = 45,05$; p -valor $< 0,0001$). Os círculos representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) baseado no IDEL.

A diminuição do PCL em função do aumento da variação de Ubu foi simulada (Fig. 8). Observou-se que *E. schomburgkii* e *D. excelsa* apresentaram as maiores médias de PCL em todas as umidades simuladas. De 10% a 30%, elas mostram uma redução de 25,4% no PCL. Nessas condições, *E. grandiflora* apresentou uma redução de 25,7% no PCL.

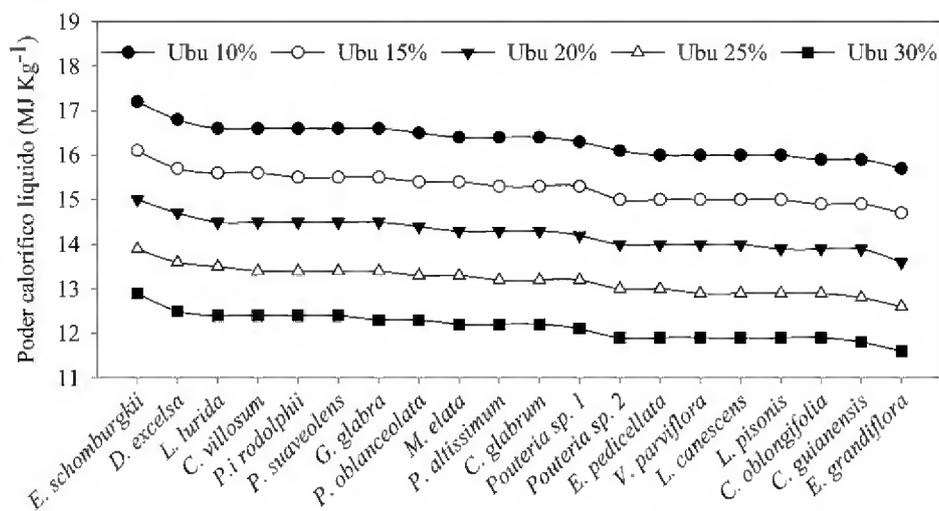


Fig. 8. Simulação do poder calorífico líquido (MJ kg^{-1}) de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável em diferentes umidades na base úmida (10%, 15%, 20%, 25% e 30%).

Reduções no poder calorífico líquido são consequências negativas promovidas pela umidade da madeira, em que ocorre consumo energético para vaporização da água na etapa de secagem durante a combustão ou carbonização [101]. A performance energética do *E. schomburgkii* e *D. excelsa* em todas as umidades simuladas, pode ser explicada pelos elevados teores de H e C, que são os principais elementos combustíveis da biomassa. Nos modernos sistemas de cogeração o valor mínimo aceitável para o PCL é $7,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ [102]. Em nosso estudo, a máxima umidade considerada não reduziu o PCL das espécies estudadas para valores inferiores ao limite reportado, com isso, todas as espécies podem ser utilizadas para produção de energia térmica com até 30% de umidade (base úmida). Contudo, destaca-se que a maior eficiência energética do resíduo madeireiro será expressada com a redução da umidade por meio da secagem ou maior tempo de estoque do resíduo.

Atualmente, a utilização dos resíduos do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal na Amazônia é realizada sem critérios de segregação. A heterogeneidade desse material (propriedades tecnológicas e dimensões) promove implicações negativas na a produção de carvão vegetal. Contudo, é necessário agrupar essa biomassa com base nas propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira visando efeitos positivos na combustão (geração de energia térmica) e carbonização (qualidade e rendimento em carvão). Assim, a análise de componentes principais é indicada como uma técnica promissora para agrupar resíduos madeireiros de espécies tropicais para uso bioenergético na Amazônia brasileira.

A análise de componentes principais revelou que três componentes foram suficientes para explicar 74,58% da variabilidade dos dados. As variáveis que mais influenciaram as componentes principais foram as seguintes: 1 - densidade básica, máximo teor de umidade, poder calorífico superior, densidade energética, teor de cinzas e carbono elementar; 2 - materiais voláteis, carbono fixo, lignina insolúvel e lignina total; e 3 - umidade, carbono fixo e extrativos totais (Tabela 4).

Tabela 4
Autovetores das três primeiras componentes principais.

Variável	CP1	CP2	CP3
Densidade básica (g cm ⁻³)	0,3807*	0,2332	0,0954
Ubs (%)	0,0117	0,0152	0,5938*
Máximo teor de umidade (%)	-0,3831*	-0,2021	-0,1435
Poder calorífico superior (MJ Kg ⁻¹)	0,3136*	0,1727	-0,1570
Densidade energética (GJ m ⁻³)	0,3965*	0,2388	0,0652
Teor de materiais voláteis (%)	0,2194	-0,3794*	0,2732
Teor de cinzas (%)	-0,3279*	0,1516	0,0506
Teor de carbono fixo (%)	-0,1243	0,3788*	-0,3335*
Extrativos totais (%)	0,2910	-0,0341	-0,5059*
Lignina insolúvel (%)	-0,0884	0,4674*	0,1071
Lignina solúvel (%)	0,2583	-0,2785	-0,2917
Lignina total (%)	-0,0302	0,4583*	0,0521
Carbono (%)	0,3484*	0,0053	0,2123

*Variáveis com contribuições importantes nas componentes principais. CP = Componente principal.

Na análise dos autovetores, os sinais (+ ou -) revelam o tipo de associação entre a variável e a componente principal. Assim, será expresso um melhor desempenho energético dos resíduos florestais se os componentes principais 1 e 2 apresentarem valores altos e o componente principal 3 valor reduzido, ou seja, madeira com alta densidade básica, densidade energética, carbono elementar, carbono fixo, carbono fixo, lignina total (insolúvel e solúveis) e extrativos totais, bem como baixo teor de umidade e cinzas.

A dispersão das espécies florestais estudadas em função dos escores obtidos na análise de componentes principais pode ser observada na Fig. 9. Foi observada a formação de 4 grupos distintos de espécies com propriedades da madeira similares. A utilização conjunta de lenha de espécies com propriedades homogêneas para produção de carvão vegetal reduzirá a heterogeneidade das propriedades do carvão e aumentará a eficiência do processo de carbonização. Na combustão, as implicações estão relacionadas à maximização da energia gerada, bem como maior controle das etapas e menor desgaste dos equipamentos domésticos e industriais de conversão.

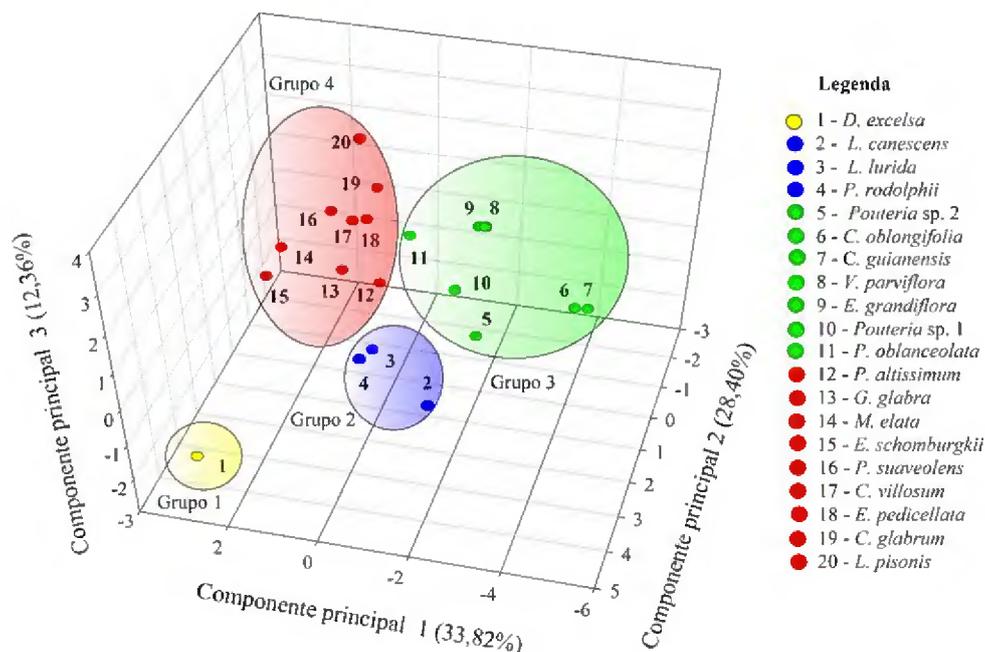


Fig. 9. Agrupamento multivariado dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

Tabela 5

Médias das variáveis estudadas para cada grupo formado pela análise de componentes principais.

Características dos resíduos	Grupos formados pela análise de componentes principais			
	1	2	3	4
Densidade básica (g cm ⁻³)	0,891 ± 0,03	0,790 ± 0,05	0,642 ± 0,09	0,764 ± 0,07
Máximo teor de umidade (%)	47,51 ± 3,80	62,14 ± 7,47	94,51 ± 24,34	67,17 ± 12,01
Ubs (%)	16,15 ± 0,15	16,63 ± 0,59	16,36 ± 0,78	16,76 ± 3,20
Poder calorífico superior (MJ Kg ⁻¹)	20,45 ± 0,08	20,01 ± 0,40	19,51 ± 0,32	20,03 ± 0,43
Densidade energética (GJ m ⁻³)	16,84 ± 0,67	14,57 ± 0,76	11,53 ± 1,67	14,15 ± 1,48
Teor de materiais voláteis (%)	77,66 ± 1,64	78,09 ± 1,73	79,46 ± 1,29	81,29 ± 1,17
Teor de cinzas (%)	0,30 ± 0,01	1,42 ± 0,95	1,23 ± 0,42	0,52 ± 0,22
Teor de carbono fixo (%)	22,04 ± 1,65	20,49 ± 0,99	19,31 ± 1,29	18,18 ± 1,20
Extrativos totais (%)	17,88 ± 2,36	4,63 ± 3,28	5,36 ± 2,66	8,33 ± 2,94
Lignina insolúvel (%)	34,63 ± 0,80	34,03 ± 2,63	30,42 ± 2,00	29,50 ± 2,41
Lignina solúvel (%)	3,00 ± 0,15	2,31 ± 0,19	2,47 ± 0,40	3,12 ± 0,56
Lignina total (%)	37,63 ± 0,91	36,34 ± 2,56	32,89 ± 1,80	32,62 ± 2,14
Carbono (%)	51,65 ± 0,59	50,11 ± 0,99	49,86 ± 0,71	51,34 ± 1,08

Média ± Desvio padrão.

O grupo 1, composto apenas pela espécie *D. excelsa* (Tabela 5), foi o mais divergente dos demais. A densidade básica da madeira desse grupo foi considerada alta. Foram reportados elevados valores para poder calorífico superior, densidade energética, carbono fixo, extrativos totais, lignina total e carbono elementar. Adicionalmente, *D. excelsa* apresentou os menores valores de umidade e cinzas. Este grupo provou ser o mais promissor entre os outros para geração de bioenergia.

As espécies do grupo 2 (*L. canescens*, *L. lurida* e *P. rodolphii*) apresentaram densidade básica elevada, assim como poder calorífico superior, carbono fixo, densidade energética e lignina total. Contudo, o grupo apresentou maior conteúdo de cinzas, conseqüentemente, apresenta maior probabilidade de promover danos aos equipamentos de queima, como formação de escória.

O grupo 3 apresentou a menor densidade básica e o maior valor médio para o teor máximo de umidade (Tabela 5). Além disso, este grupo apresentou os menores PCS e DE. A segunda maior média de teor de cinzas foi relatada para este grupo. Valores intermediários para carbono fixo, extrativos totais e lignina total foram verificados. Portanto, o uso desse grupo para produção de energia proporcionaria maior controle de umidade e manutenção mais longa nos equipamentos de queima.

O grupo 4 apresentou, com base nas médias, alta densidade básica. Além disso, o poder calorífico superior, densidade de energia, teor de cinzas, extrativos totais, lignina total e carbono elementar são razoáveis para fins energéticos.

Em geral, os grupos 1 e 4 são os mais promissores para combustão e carbonização. Os grupos 2 e 3, devido aos seus níveis mais altos de cinzas, tiveram implicações negativas no poder calorífico superior. O uso desses resíduos aumenta a probabilidade de manutenção do equipamento de queima.

Estudo conduzido por Francez et al. [104] na Unidade de Manejo Florestal Rio Capim (Paragominas, Pará, Brasil) mostrou que a retirada de resíduos após Exploração de Impacto Reduzido não apresentou não mostrou efeito significativo na composição florística da área remanescente. Numazawa et al. [20] mostraram que a não remoção dos resíduos após a exploração florestal em áreas certificadas promove o aumento dos fluxos de CO₂ a atmosfera pelo processo natural de decomposição. Tais fatos fortalecem a ideia da retirada dos resíduos do manejo para finalidade energética e, conseqüentemente, suprimento dos sistemas locais com combustíveis alternativos.

7.3.3 Equivalência energética dos resíduos madeiros com combustível fóssil

Houve efeito significativo de espécie sob tep_{ton} de resíduos madeiros, tep_m^3 de resíduos madeiros, EqVOC1, EqVOC2 e MCO₂. As espécies *E. schomburgkii* e *D. excelsa* apresentaram as maiores equivalências energéticas para $tep_{ton\ of\ wood}$ e EqVOC1. Enquanto que para tep_m^3 de resíduos madeiros, EqVOC2 e MCO₂, as espécies *D. excelsa*, *M. elata* e *E. schomburgkii* se destacaram com os melhores resultados (Tabela 6).

Tabela 6**Equivalência energética dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável com combustível fóssil.**

Espécie	tep _{ton} de resíduos madeireiros	tep _{m³} de resíduos madeireiros	EqVOC1	EqVOC2	MCO ₂
<i>E. schomburgkii</i>	0,46 ± 0,00 a	0,39 ± 0,02 a	0,48 ± 0,00 a	0,40 ± 0,02 a	1.587 ± 74,1 a
<i>D. excelsa</i>	0,45 ± 0,00 b	0,40 ± 0,02 a	0,47 ± 0,00 b	0,42 ± 0,02 a	1.687 ± 101,9 a
<i>L. lurida</i>	0,45 ± 0,01 c	0,34 ± 0,01 b	0,47 ± 0,01 c	0,36 ± 0,01 b	1.401 ± 28,1 b
<i>C. villosum</i>	0,45 ± 0,00 c	0,34 ± 0,02 b	0,47 ± 0,00 c	0,35 ± 0,02 b	1.420 ± 69,5 b
<i>P. suaveolens</i>	0,45 ± 0,00 c	0,34 ± 0,05 b	0,46 ± 0,00 c	0,36 ± 0,05 b	1.463 ± 41,2 b
<i>P. rodolphii</i>	0,45 ± 0,00 c	0,34 ± 0,01 b	0,46 ± 0,00 c	0,36 ± 0,01 b	1.443 ± 83,5 b
<i>G. glabra</i>	0,45 ± 0,01 c	0,33 ± 0,03 b	0,46 ± 0,01 c	0,35 ± 0,03 b	1.391 ± 103,8 b
<i>P. oblanceolata</i>	0,44 ± 0,01 c	0,30 ± 0,02 c	0,46 ± 0,01 c	0,32 ± 0,02 c	1.266 ± 50,8 c
<i>M. elata</i>	0,44 ± 0,00 c	0,40 ± 0,01 a	0,46 ± 0,00 c	0,41 ± 0,01 a	1.672 ± 119,4 a
<i>P. altissimum</i>	0,44 ± 0,01 c	0,31 ± 0,02 c	0,46 ± 0,01 c	0,33 ± 0,02 c	1.324 ± 102,7 c
<i>C. glabrum</i>	0,44 ± 0,00 c	0,32 ± 0,01 b	0,46 ± 0,00 c	0,34 ± 0,01 b	1.369 ± 77,0 b
<i>Pouteria</i> sp. 1	0,44 ± 0,01 c	0,31 ± 0,03 c	0,46 ± 0,01 c	0,32 ± 0,03 c	1.286 ± 32,2 c
<i>Pouteria</i> sp. 2	0,43 ± 0,01 d	0,28 ± 0,02 c	0,45 ± 0,01 d	0,29 ± 0,03 c	1.190 ± 26,9 c
<i>E. pedicellata</i>	0,43 ± 0,01 d	0,32 ± 0,03 b	0,45 ± 0,01 d	0,34 ± 0,03 b	1.437 ± 91,5 b
<i>V. parviflora</i>	0,43 ± 0,00 d	0,30 ± 0,03 c	0,45 ± 0,00 d	0,31 ± 0,03 c	1.283 ± 68,7 c
<i>L. canescens</i>	0,43 ± 0,00 d	0,36 ± 0,03 b	0,45 ± 0,00 d	0,37 ± 0,03 b	1.507 ± 61,0 b
<i>L. pisonis</i>	0,43 ± 0,00 d	0,33 ± 0,01 b	0,45 ± 0,00 d	0,34 ± 0,01 b	1.453 ± 208,7 b
<i>C. oblongifolia</i>	0,43 ± 0,00 d	0,24 ± 0,01 d	0,45 ± 0,00 d	0,25 ± 0,01 d	1.009 ± 104,7 d
<i>C. guianensis</i>	0,43 ± 0,01 d	0,22 ± 0,02 d	0,45 ± 0,01 d	0,23 ± 0,02 d	961 ± 93,1 d
<i>E. grandiflora</i>	0,42 ± 0,00 d	0,30 ± 0,02 c	0,44 ± 0,00 d	0,32 ± 0,02 c	1.306 ± 141,2 c
CVe (%)	1,32	7,19	1,32	7,19	6,83

CVe = Coeficiente de variação experimental; tep_{ton} de resíduos madeireiros = tonelada equivalente de petróleo à 1 tonelada de resíduos madeireiros (tep ton⁻¹); tep_{m³} de resíduos madeireiros = tonelada equivalente de petróleo à 1 m³ de resíduos madeireiros (tep m⁻³); *EqVOC1 = Volume de óleo combustível equivalente à 1 tonelada de resíduos madeireiros (m³ ton⁻¹); *EqVOC2 = Volume de óleo combustível equivalente à 1 m³ de resíduos madeireiros (m³ m⁻³); MCO₂ = Massa de CO₂ retida em 1 m³ resíduos madeireiros (Kg m⁻³). Colunas com letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Média ± desvio padrão.

A densidade energética dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável influenciou significativamente as equivalências energéticas. Com isso, são indicados biocombustíveis com maior densidade energética para melhor otimização dos equipamentos de queima e redução dos custos na geração de energia térmica. Para tep_{ton} de resíduos madeireiros e EqVOC1, verifica-se maior influência do PCS. Em contrapartida, tep_{m³} de resíduos madeireiros, EqVOC2 e MCO₂ foram mais influenciados pela DB dos resíduos madeireiros.

Com base em nossos resultados, a utilização de 1 m³ de madeira residual de *D. excelsa*, em detrimento de 420 L de óleo combustível ou 0,46 tep, proporcionaria a mitigação da emissão de 1.687 kg de CO₂eq, pois a madeira residual é um recurso renovável com emissão neutra em carbono. Durante a combustão, o CO₂ produzido é

equivalente ao CO₂ absorvido e fixado pelo processo natural de fotossíntese das plantas [4]. A substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis, como a biomassa residual do manejo florestal na Amazônia, é uma importante medida para reduzir as emissões de gases do efeito estufa relacionadas à energia, pois tem menor contribuição na chuva ácida e libera baixa quantidade de enxofre [1]. Além das vantagens ambientais, a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis apresenta uma vantagem econômica devido ao menor custo de biomassa sobre o petróleo [10].

Os resultados obtidos nesse estudo evidenciam o potencial de uso energético dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável em sistemas locais de conversão termoquímica na Amazônia. A utilização desses resíduos contribui para o fortalecimento da sustentabilidade do manejo florestal praticado na Amazônia Brasileira e diversificação e/ou valoração dos produtos oriundos dessa atividade. Dessa forma, destaca-se a necessidade de inclusão da retirada dos resíduos no planejamento dos planos de manejo na Amazônia, bem como, a melhor regulação dessa biomassa ainda considerada subproduto florestal, pois as leis brasileiras que regulamentam o aproveitamento energético desses resíduos são frágeis.

7.4 Conclusões

Os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável têm potencial para gerar eletricidade para regiões remotas da Amazônia, além de produzir carvão vegetal com propriedades adequadas ao uso siderúrgico. Nosso estudo revelou efeito de espécie sobre as propriedades tecnológicas das madeiras residuais, tornando necessário qualificar os resíduos madeireiros para produção de energia.

O uso de resíduos madeireiros com até 30% de umidade (base úmida) provou ser viável nos modernos sistemas de cogeração. A densidade básica, densidade energética, teor de cinzas e extrativos totais apresentaram ampla variação entre as espécies. Em contrapartida, o conteúdo de carbono elementar, lignina total, carbono fixo, materiais voláteis e poder calorífico superior foram as propriedades com menores variações interespecíficas. Maior densidade energética é necessária para os resíduos visando melhor equivalência energética com combustíveis fósseis. Novas espécies estudadas, como *D. excelsa*, *M. elata*, *P. altissium* e *G. glabra*, apresentaram melhores propriedades energéticas se comparadas às espécies utilizadas em plantios comerciais.

O IDEL é positivamente relacionado às propriedades químicas (extrativos totais e carbono elementar) dos resíduos madeireiros, mostrando ser um importante índice energético para classificação de biomassas com propriedades distintas. Com base no IDEL, as madeiras tropicais foram agrupadas em dois grupos. No entanto, os resíduos de *D. excelsa* e *L. canescens* são em ordem os melhores e piores para a bioenergia. Os resíduos madeireiros de *D. excelsa* apresentaram a maior massa de CO₂eq fixada em 1 m³ de resíduos madeireiros (1,687 kg), significa que se usado 1 m³ de resíduos madeireiros dessa espécie mitigaria a emissão de 1,687 kg de CO₂eq. Os resíduos madeireiros de *C. guianensis* apresentaram a menor massa de CO₂eq fixada em 1 m³ de resíduos madeireiros (961 kg). Finalmente, os resíduos da espécie *D. excelsa* foram os mais divergentes em comparação aos demais. Por outro lado, esta espécie apresentou as melhores propriedades para a produção bioenergética. De acordo com a análise multivariada, foi possível agrupar os resíduos madeireiros em quatro grupos, visando os sistemas locais de conversão termoquímica na Amazônia brasileira. As variáveis com maiores contribuições nas componentes principais foram densidade básica, umidade, máximo teor de umidade, densidade energética, extrativos totais, lignina insolúvel e lignina total.

Referências

- [1] M.N. Uddin, J. Taweekun, K. Techato, M.A. Rahman, M. Mofijur, M.G. Rasul, Sustainable biomass as an alternative energy source: Bangladesh perspective, *Energy Procedia*. 160 (2019) 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.217>.
- [2] M.K. Janowiak, C.R. Webster, Promoting ecological sustainability in woody biomass harvesting, *J. For.* 108 (2010) 16–23.
- [3] A.E. Russell, B.M. Kumar, Forestry for a low-carbon future: integrating forests and wood products into climate change strategies, *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* 59 (2017) 16–23. <https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1274580>.
- [4] D. Nhuchhen, M. Afzal, HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses, *Bioengineering*. 4 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/bioengineering4010007>.
- [5] T.R. Teixeira, C.A.A.S. Ribeiro, A.R. Santos, G.E. Marcatti, A.S. Lorenzon, N.L.M. Castro, G.F. Domingues, H.G. Leite, S.J.M.C. Menezes, P.H.S. Mota, L.A.A. Telles, R.S. Vieira, Forest biomass power plant installation scenarios,

- Biomass and Bioenergy. 108 (2018) 35–47.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.006>.
- [6] K. Kaygusuz, T. Sekerci, Biomass for efficiency and sustainability energy utilization in Turkey, *J. Eng. Res. Appl. Sci.* 5 (2016) 332–341.
- [7] C. Cuvilas, I. Lhate, R. Jirjis, N. Terziev, The characterization of wood species from Mozambique as a Fuel, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 36 (2014) 851–857. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.582601>.
- [8] H. Adamu, A. Sabo, A.A. Chinade, A. Lame, Exploration of influence of chemical composition on combustion and fuel characteristics of wood-charcoals commonly used in Bauchi State, Nigeria, *Int. J. Renew. Energy Res.* 8 (2018) 1508–1518.
- [9] M. Taran, D. Deb, S. Deb, Utilization pattern of fuelwood plants by the Halam community of Tripura, Northeast India, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 38 (2016) 2545–2552. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1062821>.
- [10] M.A. Perea-Moreno, E. Samerón-Manzano, A.-J. Perea-Moreno, Biomass as renewable energy: worldwide research trends, *Sustainability.* 11 (2019) 863. <https://doi.org/10.3390/su11030863>.
- [11] K. Koponen, L. Sokka, K. Pingoud, T. Koljonen, E. Alakangas, K. Sipila, Sustainability of forest energy in Northern Europe Sustainability of forest energy in Northern Europe, VTT Technology, 2015.
- [12] A. Rothe, M. Moroni, M. Neyland, M. Wilnhammer, Current and potential use of forest biomass for energy in Tasmania, *Biomass and Bioenergy.* 80 (2015) 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.021>.
- [13] S. Ahmed, A. Mahmood, A. Hasan, G. Ahmad, S. Sidhu, M.F.U. Butt, A comparative review of China, India and Pakistan renewable energy sectors and sharing opportunities, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.191>.
- [14] R. Van den Broek, S. Teeuwisse, K. Healion, T. Kent, A. Van Wijk, A. Faaij, W. Turkenburg, Potentials for electricity production from wood in Ireland, *Energy.* 26 (2001) 991–1013. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00050-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00050-0).
- [15] A. Welfle, Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade, *Biomass and Bioenergy.* 105 (2017) 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>.

- [16] G.H.F. Santos, R.S. Nascimento, G.M. Alves, Biomass as sustainable energy in Brazil, *Rev. UNINGÁ*. 29 (2017) 6–13.
- [17] S.M.H. Vindel, S. Campos, A.J. Spadotto, Y.M. Garcia, Comparison of energy consumption by the Brazilian and Honduran energy matrix sector and its dependence of non-renewable energy, *Energ. Na Agric.* 33 (2018) 352–357. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2018v33n4p352-357>.
- [18] D. Cruz Filho, J.N.M. Silva, Evaluation of the amount of coarse woody debris in area of logged and undisturbed forests, using line-intercept sampling, in the Medium Moju River, Eastern Amazonia, Brazil, *Acta Amaz.* 39 (2009) 527–532. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000300006>.
- [19] M. Keller, M. Palace, G.P. Asner, R. Pereira Jr., J.N.M. Silva, Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon, *Glob. Chang. Biol.* 10 (2004) 784–795. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00770.x>.
- [20] C.T.D. Numazawa, S. Numazawa, S. Pacca, V.M. John, Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting, *Resour. Conserv. Recycl.* 122 (2017) 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>.
- [21] L.M.B. Francez, J.O.P. Carvalho, F.J. Batista, F.C.S. Jardim, E.M.L.S. Ramos, Effects of the reduced impact logging on the growth phases of a Terra Firme forest in the state of Pará, Brazil, *Ciência Florest.* 23 (2013) 743–753. <https://doi.org/10.5902/1980509812358>.
- [22] Empresa de Pesquisa Energética, Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira, MME/EPE, Rio de Janeiro, 2018.
- [23] A. Uhlig, J. Goldemberg, S.T. Coelho, O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas, *Rev. Bras. Energ.* 14 (2008) 67–85.
- [24] Brasil, Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa MMA no 5 de 11/12/2006. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas, Brasil, 2006.
- [25] A.R.S. Reis, J.S.F. Reis, J.R. Silva, J.C. Carvalho, D.V. Souza, L.P. Reis, Comparison of charcoal obtained from babaçu coconut and wood waste commercialized in Altamira – PA, *Rev. Ciência Da Madeira*. 6 (2015) 100–106. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p100-106>.

- [26] V.H.P. Moutinho, J.J.M. Rocha, E.P. Amaral, L.G.M. Santana, O.J.R. Aguiar, Chemical and energetic properties of Amazonian woods of the second cutting cycle, *Floresta e Ambient.* 23 (2016) 443–449. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.131715>.
- [27] L.J.R. Nunes, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, Biomass in the generation of electricity in Portugal: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71 (2017) 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.067>.
- [28] C.L.M. Martinez, E. Sermyagina, A.C.O. Carneiro, M. Cardoso, Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil, *Biomass and Bioenergy.* 123 (2019) 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>.
- [29] P.C.M.R. Reis, L.P. Reis, A.L. Souza, A.M.M.L. Carvalho, L. Mazzei, A.R.S. Reis, C.M.M.E. Torres, Clustering of Amazon wood species based on physical and mechanical properties, *Ciência Florest.* 29 (2019) 337–347. <https://doi.org/10.5902/1980509828114>.
- [30] Climate-Data.org, Dados climáticos para cidades mundiais [On line], AM Online Projects, Oedheim, 2017. <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/para/paragominas-714961/>.
- [31] H.P. Veloso, A.L.R. Rangel Filho, J.C.A. Lima, Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal, IBGE, Rio de Janeiro, 1991.
- [32] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa, Rio de Janeiro, 2017.
- [33] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica., Rio de Janeiro, 2003.
- [34] E. Csanády, E. Magoss, L. Tolvaj, Quality of machined wood surfaces, Springer International Publishing, New York City, 2015.
- [35] W. Simpson, A. TenWolde, Physical properties and moisture relations of wood, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI, p. 4-2., 2010.
- [36] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14853: Madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona, Rio de Janeiro, 2010.

- [37] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7989: Pasta celulósica e madeira - determinação de lignina insolúvel em ácido, Rio de Janeiro, 2010.
- [38] O. Goldschmid, Ultraviolet spectra, in: *Lignins Occur. Form. Struct. React.*, Wiley Interscience, New York, 1971: pp. 241–266.
- [39] ASTM, American Society for Testing Materials. D1762 - 84: standard test method for chemical analysis of wood charcoal, ASTM International, Philadelphia, 2007. <https://doi.org/10.1520/D1762-84R07>.
- [40] ASTM, American Society for Testing Materials. E711 - 87: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter, ASTM International, Philadelphia, 2004.
- [41] BEN, Balanço Energético Nacional. Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética, EPE, Rio de Janeiro, 2018.
- [42] B.P. Bhatt, N.P. Todaria, Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs, *Commonw. For. Rev.* 71 (1992) 183–185. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(90\)90067-T](https://doi.org/10.1016/0144-4565(90)90067-T).
- [43] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Viena. Austria, 2018. <https://doi.org/10.4236/ojs.2014.49064>.
- [44] P.M. Fearnside, Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia, *For. Ecol. Manage.* 90 (1997) 59–87. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03840-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03840-6).
- [45] V.H.F. Andrade, S. do A. Machado, A. Figueiredo Filho, P.C. Botosso, B.P. Miranda, J. Schongart, Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon, *For. Ecol. Manage.* 438 (2019) 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>.
- [46] E.M. Nogueira, B.W. Nelson, P.M. Fearnside, Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil, *For. Ecol. Manage.* 208 (2005) 261–286. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.12.007>.
- [47] H.S.D. Barros, E.D. Cruz, A.G. Pereira, E.A.A. Silva, Physiological classification of maçaranduba seeds: tolerance to desiccation and storage, *Rev. Ciências Agrárias.* 62 (2019) 1–5. <https://doi.org/10.22491/rca.2019.2949>.
- [48] D.D. Amaral, I.C.G. Viera, S.S. Almeida, R.P. Salomão, A.S.L. Silva, M.A.G. Jardim, Checklist of remnant forest fragments of the metropolitan area of Belém

- and historical value of the fragments, State of Pará, Brazil, Bol. Do Mus. Para. Emilio Goeldi, Ciências Nat. 4 (2009) 231–289.
- [49] D.D. Amaral, I.C.G. Vieira, S.S. Almeida, Ecological characteristics and structure of the tree community in a forest remnant from the Belém Area of Endemism, Brazil, Rev. Bras. Biociências. 14 (2016) 225–232.
- [50] G. Schwartz, V. Falkowski, M. Peña-Claros, Natural regeneration of tree species in the Eastern Amazon: short-term responses after reduced-impact logging, For. Ecol. Manage. 385 (2017) 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.036>.
- [51] S.H.S. Aguiar, J.O.P. Carvalho, A.R. Ruschel, E.M.L.S. Ramos, E.S. Rocha, T.C. Castro, B.M.F. Silva, Dynamics of natural regeneration of timber species during three decades after logging in the Tapajós National Forest, Brazil, Sci. For. 47 (2019) 157–166. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n121.16>.
- [52] A.L. Avila, G. Schwartz, A.R. Ruschel, J.C. Lopes, J.N.M. Silva, J.O.P. Carvalho, C.F. Dormann, L. Mazzei, M.H.M. Soares, J. Bauhus, Recruitment, growth and recovery of commercial tree species over 30 years following logging and thinning in a tropical rain forest, For. Ecol. Manage. 385 (2017) 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.039>.
- [53] H. ter Steege, D.S. Hammond, Character convergence, diversity, and disturbance in Tropical Rain Forest in Guyana, Ecology. 82 (2001) 3197–3212. <https://doi.org/10.2307/2679844>.
- [54] R.C. Santos, A.C.O. Carneiro, A.F.M. Castro, R.V.O. Castro, J.J. Bianche, M.M. Souza, M.T. Cardoso, Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of *Eucalyptus*, Sci. For. 39 (2011) 221–230.
- [55] D.A. Silva, B.V. Muller, E.C. Kuiaski, E. Eloy, A. Behling, C.M. Colaço, Properties of *Eucalyptus benthamii* wood for energy production, Pesqui. Florest. Bras. 35 (2015) 481–485. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>.
- [56] M.F. V. Rocha, B.R. Vital, A.C.O. Carneiro, A.M.M.L. Carvalho, M.T. Cardoso, P.R.G. Hein, Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark, J. Trop. For. Sci. 28 (2016) 243–248.
- [57] T.P. Protásio, M. V. Scatolino, A.C.C. Araújo, A.F.C.F. Oliveira, I.C.R. Figueiredo, M.R. Assis, P.F. Trugilho, Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* firewood, BioEnergy Res. 12 (2019) 626–641. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>.

- [58] J.T. da S. Oliveira, J.C. Hellmeister, M. Tomazello Filho, Variation of the moisture content and specific gravity in the wood of seven eucalypt species, *Rev. Árvore*. 29 (2005) 115–127. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013>.
- [59] A.J.V. Zanuncio, J.T. Lima, T.C. Monteiro, A.G. Carvalho, P.F. Trugilho, Drying logs of *Eucalyptus* and *Corymbia* for energy purposes, *Sci. For.* 41 (2013) 353–360.
- [60] A.R. Kizha, H. Han, Moisture content in forest residues: an insight on sampling methods and procedures, *Curr. For. Reports*. 3 (2017) 202–212. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0060-5>.
- [61] J.P. Castro, D.M. Perígolo, M.L. Bianchi, F.A. Mori, A.S. Fonseca, I.C.N. Alves, F.J. Vasconcellos, Use of amazonian species for aging distilled beverages: physical and chemical wood analysis, *Cerne*. 21 (2015) 319–327. <https://doi.org/10.1590/01047760201521021567>.
- [62] R.C. Santos, A.C.O. Carneiro, B.R. Vital, R.V.O. Castro, G.B. Vidaurre, P.F. Trugilho, A.F.N.M. Castro, Effect of properties chemical and siringil/guaiacil relation wood clones of *Eucalyptus* in the production of charcoal, *Ciência Florest.* 26 (2016) 657–669. <https://doi.org/10.5902/1980509822765>.
- [63] A. Adamovics, R. Platace, I. Gulbe, S. Ivanovs, The content of carbon and hydrogen in grass biomass and its influence on heating value, *Eng. Rural Dev.* 1 (2018) 1277–1281. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N014>.
- [64] A.C.O. Carneiro, A.F.N.M. Castro, R.V.O. Castro, R.C. Santos, L.P. Ferreira, R.A.P. Damásio, B.R. Vital, Potential energy of *Eucalyptus* sp. wood according to age and different genetic materials, *Rev. Árvore*. 38 (2014) 375–381. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.
- [65] A.A. Reis, T.P. Protásio, I.C.N.A. Melo, P.F. Trugilho, A.C.O. Carneiro, Wood composition and charcoal of *Eucalyptus urophylla* in different planting locations, *Pesqui. Florest. Bras.* 32 (2012) 277–290. <https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.277>.
- [66] M.A.E. Santana, E.Y.A. Okino, Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species, *Holzforschung*. 61 (2007) 469–477. <https://doi.org/10.1515/HF.2007.084>.
- [67] L.G.M. Santana, K.N.F. Santos, I.S. Chaibe, B.S. Marques, F.W.C. Andrade, V.H.P. Moutinho, Radial variation in extractives content of Amazonian wood *Alexa*

- grandiflora*, Adv. For. Sci. 5 (2018) 315–318. <https://doi.org/10.34062/afs.v5i2.5681>.
- [68] J.R. Menucelli, E.P. Amorim, M.L.M. Freitas, M. Zanata, J. Cambuim, M.L.T. Moraes, F.M. Yamaji, F.G. Silva Júnior, E.L. Longui, Potential of *Hevea brasiliensis* clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* wood as raw materials for bioenergy based on higher heating value, BioEnergy Res. (2019) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10041-6>.
- [69] M. Poletto, Effect of extractive content on the thermal stability of two wood species from Brazil, Maderas. Cienc. y Tecnol. 18 (2016) 435–442. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000039>.
- [70] X. Guo, S. Wang, K. Wang, Q. Liu, Z. Luo, Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis, J. Fuel Chem. Technol. 38 (2010) 42–46. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(10\)60019-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(10)60019-9).
- [71] J.C. Moulin, J.R.C. Nobre, J.P. Castro, P.F. Trugilho, M.D.C. Arantes, Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in Amazon Rainforest, Cerne. 23 (2017) 209–218. <https://doi.org/10.1590/01047760201723022216>.
- [72] R. Moriana, F. Vilaplana, M. Ek, Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties, Cellulose. 22 (2015) 3409–3423. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0738-4>.
- [73] B.L.C. Pereira, A.C.O. Carneiro, A.M.M.L. Carvalho, J.L. Colodette, A.C. Oliveira, M.P.F. Fontes, Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties, BioResources. 8 (2013) 4574–4592. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4574-4592>.
- [74] A. Demirbas, Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products, Energy Sources. 25 (2003) 629–635. <https://doi.org/10.1080/00908310390212336>.
- [75] C. Telmo, J. Lousada, The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood, Biomass and Bioenergy. 35 (2011) 1663–1667. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.038>.
- [76] A. Álvarez, C. Pizarro, R. García, J.L. Bueno, Spanish biofuels heating value estimation based on structural analysis, Ind. Crops Prod. 77 (2015) 983–991. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.078>.

- [77] R.C. Santos, A.C.O. Carneiro, A.S. Pimenta, R.V.O. Castro, I.V. Marinho, P.F. Trugilho, I.C.N. Alves, A.F.N.M. Castro, Energy potential of species from forest management plan for the Rio Grande do Norte State, *Ciência Florest.* 23 (2013) 491–502. <https://doi.org/10.5902/198050989293>.
- [78] R. Amirta, E.M. Angi, B.R. Ananto, B. Setiyono, M.T. Haqiqi, H.A. Septiana, M. Lodong, R.N.U.R. Oktavianto, Plant diversity and energy potency of community forest in East Kalimantan, Indonesia: searching for fast growing wood species for energy production, *Nusant. Biosci.* 8 (2016) 22–31. <https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n080106>.
- [79] C.R. Lohri, H.M. Rajabu, D.J. Sweeney, C. Zurbrügg, Char fuel production in developing countries – a review of urban biowaste carbonization, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59 (2016) 1514–1530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.088>.
- [80] V.J. Costa, R.M. Vieira, S.B.F.T. Giroto, F.J. Simioni, Pyrolysis and thermogravimetry of blended and nonblended residues of pine and eucalyptus forestry woods, *Environ. Prog. Sustain. Energy.* 35 (2016) 1521–1528. <https://doi.org/10.1002/ep.12372>.
- [81] 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) 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.104>.
- [82] E.J. Brun, A.Pa. Bersch, F.A. Pereira, D.A. Silva, Y.R. de Barba, J.R. Dorini Junior, Characterization energy of wood of three genetic materials of *Eucalyptus* sp., *Floresta.* 48 (2018) 87–92. <https://doi.org/10.5380/rf.v48>.
- [83] J. Hytonen, J. Nurmi, Heating value and ash content of intensively managed stands, *Wood Res.* 60 (2015) 71–82.
- [84] B. Klasnja, S. Kopitovic, S. Orlovic, Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood, *Biomass and Bioenergy.* 23 (2002) 427–432. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00069-7).
- [85] P. Álvarez-Álvarez, C. Pizarro, M. Barrio-Anta, A. Cámara-Obregón, J.L.M. Bueno, A. Álvarez, I. Gutiérrez, D.F.R.P. Burslem, Evaluation of tree species for biomass energy production in Northwest Spain, *Forests.* 9 (2018) 160. <https://doi.org/10.3390/f9040160>.
- [86] A.F. Dias Júnior, R.B. Anuto, C.R. Andrade, N.D. Souza, S. Takeshita, J.O. Brito, A.M. Nolasco, Influence of *Eucalyptus* wood addition to urban wood waste during

- combustion, *Cerne*. 23 (2017) 455–464. <https://doi.org/10.1590/01047760201723042337>.
- [87] T. de P. Protásio, L. Bufalino, G.H.D. Tonoli, A.M. Couto, P.F. Trugilho, M. Guimarães Júnior, Relation between higher heating value and elemental and mineral biomass plant components, *Pesqui. Florest. Bras.* 31 (2011) 113–122. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113>.
- [88] A.F. Dias Júnior, C.R. Andrade, T.P. Protásio, J.O. Brito, P.F. Trugilho, M.P. Oliveira, G.B.V. Dambroz, Thermal profile of wood species from the Brazilian Semi-arid region submitted to pyrolysis, *Cerne*. 25 (2019) 44–53. <https://doi.org/10.1590/01047760201925012602>.
- [89] J.S. Reis, R.O. Araujo, V.M.R. Lima, L.S. Queiroz, C.E.F. Costa, J.J.R. Pardaul, J.S. Chaar, G.N. Rocha Filho, L.K.C. Souza, Combustion properties of potential Amazon biomass waste for use as fuel, *J. Therm. Anal. Calorim.* (2019) 1–5. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08457-5>.
- [90] B.B.M. Orellana, A.T. Vale, J. González, M.C. Guedes, J.B.P. Orellana, C.M. Lima, Energetic density of *Tachigali vulgaris* wood by diametric class in two experimental plants in the Amazon, *Nativa*. 6 (2018) 773–781. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i0.5130>.
- [91] D.A. Silva, V.C. Almeida, L.C. Viana, U. Klock, G.I.B. Muñiz, Evaluation of the energy-related properties of tropical wood waste using NIR Spectroscopy, *Floresta e Ambient.* 21 (2014) 561–568. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043414>.
- [92] M.F. Silva, M.M. Fortes, C.R. Sette Junior, Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones, *Floresta e Ambient.* 25 (2018) e20160350. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>.
- [93] C.S. Montes, J.C. Weber, T. Abasse, D.A. Silva, S. Mayer, C.R. Sanquetta, G.I.B. Muñiz, R.A. Garcia, Variation in fuelwood properties, and correlations of fuelwood properties with wood density and growth in five tree and shrub species in Niger, *Can. J. For. Res.* 43 (2017) 552–562. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0497>.
- [94] J.I.N. Kumar, K. Patel, R.N. Kumar, R.K. Bhoi, An evaluation of fuelwood properties of some Aravally mountain tree and shrub species of Western India, *Biomass and Bioenergy*. 35 (2011) 411–414. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.051>.

- [95] K. Singh, N.N. Gautam, B. Singh, V.L. Goel, D.D. Patra, Screening of environmentally less-hazardous fuelwood species, *Ecol. Eng.* 64 (2014) 424–429. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.01.013>.
- [96] M.C.B.T. Cavalcanti, M.A. Ramos, E.L. Araújo, U.P. Albuquerque, Implications from the use of non-timber forest products on the consumption of wood as a fuel source in human-dominated Semiarid Landscapes, *Environ. Manage.* 56 (2015) 389–401. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0510-4>.
- [97] F. Ruiz-aquino, S. Ruiz-ángel, W. Santiago-García, M.E. Fuente-Carrasco, Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico, *Wood Res.* 64 (2019) 71–82.
- [98] S. Ojelele, T. Otit, S. Mugisha, Fuel value indices of selected woodfuel species used in Masindi and Nebbi districts of Uganda, *Energy. Sustain. Soc.* 5 (2015) 14. <https://doi.org/10.1186/s13705-015-0043-y>.
- [99] M.N. Islam, S.B. Ratul, A. Sharmin, K.-S. Rahman, M. Ashaduzzaman, G.M.N. Uddin, Comparison of calorific values and ash content for different woody biomass components of six mangrove species of Bangladesh Sundarbans, *J. Indian Acad. Wood Sci.* (2019) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13196-019-00246-9>.
- [100] S. Pérez, C.J. Renedo, A. Ortiz, F. Delgado, I. Fernández, Energy potential of native shrub species in northern Spain, *Renew. Energy.* 62 (2014) 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.048>.
- [101] B. Nakomcic-Smaragdakis, Z. Cepic, N. Dragutinovic, Analysis of solid biomass energy potential in Autonomous Province of Vojvodina, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.118>.
- [102] M.A. Brand, T.S.F. Stähelin, J.C. Ferreira, M.D. Neves, Production of biomass for energy generation in plantations of *Pinus taeda* L. with different ages, *Rev. Árvore.* 38 (2014) 353–360. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200016>.
- [103] M.R.S. Silva, E.A.S. Ribeiro, J.P. Barbosa, F.T. Alves Júnior, M.C. Guedes, P.G. Pinheiro, L. Bufalino, Quality attributes of commercial charcoals produced in Amapá, a Brazilian state located in the Amazonia, *Environ. Dev. Sustain.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0216-x>.
- [104] L.M.D.B. Francez, J.O.P. Carvalho, F.C.D.S. Jardim, Changes on floristic composition after logging in a terra firme forest in the region of Paragominas, PA, *Acta Amaz.* 37 (2007) 219–228. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200007>.

8 CAPÍTULO 3 – CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL PARA USOS DOMÉSTICO E INDUSTRIAL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Revista alvo: Energy Conversion and Management (JCR 7,181/Qualis Capes A1)

RESUMO

Técnicas que reduzam a heterogeneidade dos resíduos do manejo florestal sustentável para carbonização na Amazônia são importantes visando maior rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido, contudo há escassez de informações na literatura relacionada às características tecnológicas da madeira residual e do carvão vegetal proveniente desses resíduos. Nosso estudo apresenta a caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal de resíduos do manejo florestal, bem como o balanço de massa da carbonização e equivalência com combustíveis fósseis. Foi produzido carvão vegetal de galhos de árvores das 20 espécies mais exploradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil. O teor de extrativos totais da madeira influenciaram positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, o balanço de massa da carbonização, o poder calorífico e o índice de desempenho energético do carvão vegetal. Densidade relativa aparente, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em gases não condensáveis, teor de cinzas, rendimento em carbono fixo, densidade energética, rendimento energético e carbono retido foram as variáveis de variação mais ampla entre as espécies. A análise de componentes principais segregou o carvão vegetal dos resíduos do manejo florestal em 5 grupos com características similares. Estes grupos podem ser utilizados na classificação das espécies para carbonização em fornos de alvenaria na Amazônia visando suprir o polo siderúrgico local e os sistemas de cogeração em comunidades remotas na Amazônia.

Palavras-chave: Resíduos de madeira, energia sustentável, bioenergia

8.1 Introdução

As energias renováveis são alternativas promissoras para mitigar as mudanças climáticas [1]. O aumento da população mundial e da demanda energética per capita e o fato dos níveis de CO₂ atmosférico terem excedido o nível perigoso 10 anos antes do previsto corroboram com a necessidade do desenvolvimento de tecnologias de energias

renováveis [2]. O aumento da proporção das energias renováveis na matriz energética mundial promoverá maior segurança energética, benefícios ambientais e econômicos e geração de empregos [3].

No Brasil, a demanda energética vem aumentando em quase 2,2% ao ano. Os setores industrial, de transportes e energético são os responsáveis pela maior parcela do consumo final de energia. Em 2018, 54,8% do total de energia fornecida internamente no Brasil são de fontes não renováveis (petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e urânio), enquanto que 45,2% são de fontes renováveis (hidráulica, lenha e carvão vegetal, derivados da cana-de-açúcar, eólica, solar e outras) [4].

A biomassa é uma fonte de energia térmica e elétrica renovável ecologicamente correta no contexto dos cenários energéticos, visto os conteúdos irrisórios de N e S em sua composição química e à neutralidade da emissão de carbono de carbono [5]. Portanto a combustão ou carbonização de biomassas lenhosas emitirão menos dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_x) e fuligem em comparação aos combustíveis fósseis convencionais [2].

O Brasil é um país promissor na produção de energia proveniente de biomassa, pois apresenta localização geográfica e condições climáticas favoráveis, alta produtividade nacional, indústria de serviços para projetos de bioenergia estruturada e políticas nacionais que obrigam o tratamento e destinação adequada dos resíduos [6]. A cana-de-açúcar (17,4%) juntamente com a lenha e carvão vegetal (8,4%) foram as principais biomassas utilizadas para produção energética no Brasil no ano de 2018 [4].

Nos atuais planos de manejo florestal sustentável aplicados na Amazônia são gerados quantitativos significativos de resíduos na etapa da exploração. Estima-se que para cada 1 tonelada de madeira extraída em planos de manejo certificados na Amazônia, são gerados 2,14 toneladas de resíduos [7]. A utilização desses resíduos para bioenergia contribui para o fortalecimento da sustentabilidade do manejo florestal praticado na Amazônia Brasileira e diversificação e/ou valorização dos produtos oriundos dessa atividade. Adicionalmente, se não for removida da unidade de manejo, a biomassa residual pode causar produção espontânea de lixiviados e metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes [7,8]. O aproveitamento desses resíduos para produção de lenha e carvão é previsto na Instrução Normativa N° 5, de 11 de dezembro de 2006, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente brasileiro [9]. Contudo, são escassas pesquisas que abordam a potencialidade dos resíduos da exploração florestal em planos

de manejo florestal sustentável certificados para produção de lenha e carvão vegetal, especialmente de várias espécies tropicais.

Na Amazônia, os resíduos do manejo têm sido destinados para a produção de carvão vegetal sem critérios de segregação de espécies com diferentes potenciais bioenergéticos. Como consequência, tem-se baixo rendimento gravimétrico (entre 15% e 25%) e qualidade do carvão [10,11], alta produção de atíço, maior tempo de resfriamento do forno e elevado teor de gases poluentes [12]. Além disso, o carvão vegetal gerado apresenta propriedades heterogêneas, confirmando a necessidade de segregação prévia dos resíduos visando reduzir a heterogeneidade do produto.

O carvão vegetal oriundo dos resíduos florestais gerados durante o manejo florestal certificado pode ser utilizado para produção de energia elétrica em comunidades remotas na Amazônia [13] e no suprimento de altos fornos siderúrgicos para redução do minério de ferro no segundo maior polo siderúrgico do Brasil, o Polo Carajás, localizado entre os estados do Maranhão e Pará [14]. Nos altos fornos, o carvão vegetal é responsável pelo fornecimento de energia na forma de calor, recomposição do poder redutor do dióxido de carbono, sustentação da carga do minério de ferro e a percolação gasosa pelo leito [15]. O carvão vegetal adequado para o setor siderúrgico deve apresentar: baixa umidade ($< 7\%$); alta densidade relativa aparente ($> 250 \text{ kg m}^{-3}$); alto teor de carbono fixo (74–77%); baixo teor de cinzas (1-1,5%), teor de materiais voláteis equilibrados (22-25%), alta resistência a compressão (50-100 kg cm^{-2}) e baixa reatividade [16].

Existe uma lacuna na literatura relacionada às características tecnológicas dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável e do carvão vegetal dessa biomassa residual na Amazônia Brasileira. Além disso, são necessárias técnicas que reduzam a heterogeneidade dos resíduos do manejo florestal e do carvão vegetal produzido, visando maior rendimento e qualidade do carvão vegetal de resíduos na Amazônia.

Com esse estudo, buscamos responder o seguinte questionamento: (i) Quais características da madeira residual apresentam maior influência na produção de carvão vegetal de resíduos? Acredita-se que o teor de lignina das madeiras residuais apresenta maior influência na produção de carvão vegetal. Dessa forma, o objetivo foi analisar as relações existentes entre as propriedades da madeira e carvão vegetal.

8.2 Material e métodos

8.2.1 Origem do material biológico

A coleta dos resíduos do manejo florestal sustentável foram realizadas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim (UMF/Rio Capim), localizada na cidade de Paragominas, Pará, Brasil (Fig. 1).

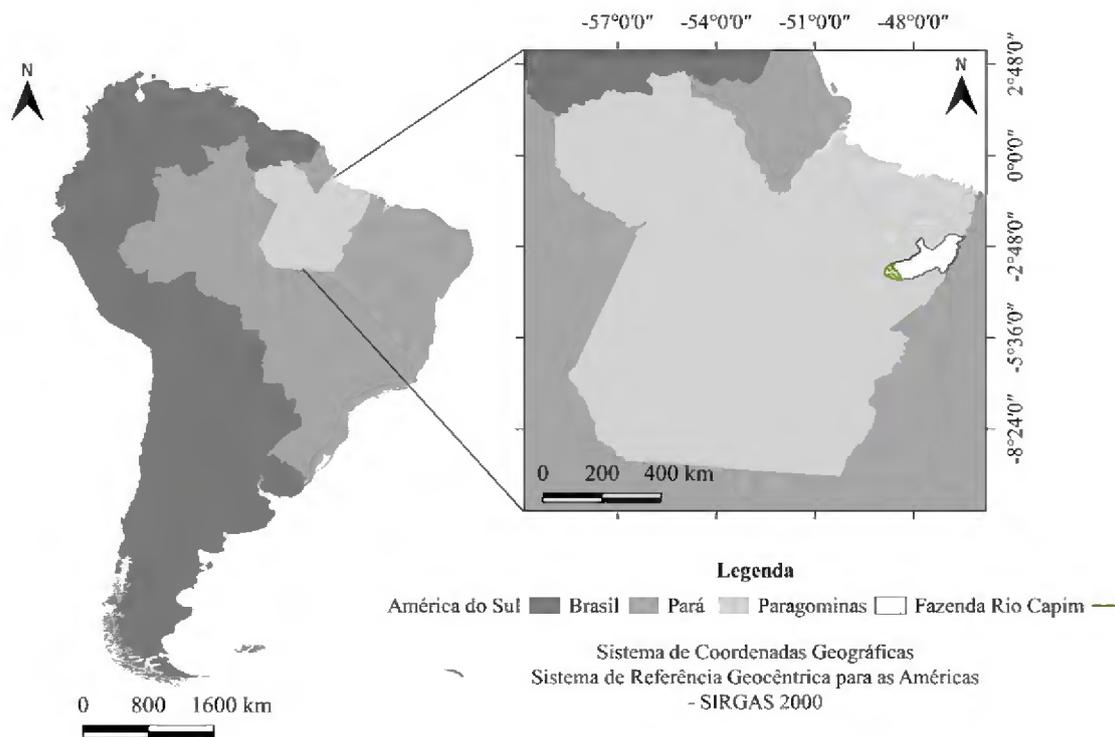


Fig. 1. Localização da Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

O município de Paragominas apresenta clima do tipo *Aw*, conforme classificação de Köppen. A temperatura média anual da região é 26,6°C, com precipitação acumulada de 1.805 mm [17]. A tipologia vegetal característica da área em que foram amostrados os resíduos é Floresta Ombrófila Densa Submontana [18].

Foram coletados três discos de madeira por espécie florestal aos três dias após a etapa de exploração na UMF Rio Capim visando às determinações laboratoriais. A amostragem foi realizada no galho de maior diâmetro da copa de três árvores de vinte espécies florestais mais exploradas nos planos de manejo florestal da região.

8.2.2 Identificação das espécies

A identificação das espécies foi baseada na avaliação do material vegetativo e reprodutivo e da madeira pelo herbário e xiloteca. Ambos pertencentes ao Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém, Pará, Brasil. Para análise e depósito na xiloteca, foram confeccionados corpos de prova de dimensões de 7 cm x 7 cm x 7 cm.

Vinte (20) espécies pertencentes a 8 famílias botânicas foram identificadas. Deste total, 17 espécies foram incorporadas à coleção do Herbário IAN e 2 ao Herbário Felisberto Camargo, pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia (Tabela 1).

1 **Tabela 1**
 2 Identificação taxonômica das espécies amazônicas amostradas na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

N	Família	Nome científico	Nome comum	CRH	CRX
1	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu barroto	IAN198000*	X8712
2	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana	IAN198001*	X8725
3		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá	IAN197990*	X8717
4	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca	IAN197991*	X8713
5		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau	IAN197997*	-
6	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba	IAN197994*	X8715
7	Humiriaceae	<i>Vantanea parviflora</i> Lam.	Uxirana	FCUFRA7585**	-
8	Lecythidaceae	<i>Couratari guianensis</i> Aubl.	Tauari-liso	IAN197992*	X8724
9		<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco	IAN197996*	X8726
10		<i>Eschweilera pedicellata</i> (Rich.) S.A.Mori	Matamatá	FCUFRA7584**	-
11		<i>Eschweilera grandiflora</i> (Aubl.) Sandwith	Matamatá-preto	IAN197987*	X8721
12		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia	IAN197988*	X8723
13		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana	IAN197995*	X8714
14		<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	IAN197998*	X8718
15	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	Orelha-de-macaco	-	-
16		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana	IAN197989*	X8711
17		<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba	IAN197993*	X8720
18	Sapotaceae	<i>Pouteria oblanceolata</i> Pires	Abiu	IAN197999*	X8722
19		<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana	IAN197986*	X8716
20		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha	IAN197985*	X8719

3 *Espécies depositadas no Herbário IAN; **Espécies depositadas no Herbário Felisberto Camargo; CRH: Código de Registro no Herbário; CRX: Código de Registro na Xiloteca
 4 do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará, Brasil.

8.2.3 Densidade básica e teor de extrativos dos resíduos madeireiros

Para a determinação da densidade básica da madeira, os discos foram seccionados em quatro cunhas com os centros passando pela medula. As duas menores cunhas opostas foram utilizadas para a determinação da densidade básica pelo método de imersão em água, conforme a norma NBR 11941 [19]. A densidade básica foi calculada como sendo a média aritmética das densidades verificadas para as duas cunhas opostas retiradas por disco.

O teor de extrativos totais foi determinado conforme norma NBR 14853 [20]. Foram seguidas três etapas, uma extração em etanol: tolueno (2:1 v/v) por 6 h, uma extração com etanol por 5 h em extrator soxhlet e, finalmente, uma extração em água destilada quente. Ao final, a amostra livre de extrativos foi levada à estufa previamente calibrada a 103 ± 2 °C para obtenção da massa seca.

O teor de lignina insolúvel foi quantificado de acordo com a NBR 7989 pelo método de hidrólise ácida [21]. Primeiro, 0,3 g de serragem sem extrativos foram tratadas com ácido sulfúrico (72% - 3 mL por amostra) durante 2 h em banho-maria à temperatura ambiente (± 28 °C). Em seguida, as amostras foram fervidas em condição pressurizada por 4 h e filtradas em cadinhos com óxido de alumínio. Finalmente, os cadinhos com lignina insolúvel foram secos em estufa com circulação de ar forçada a 103 ± 2 °C. A lignina solúvel foi determinada por espectroscopia UV de acordo com Goldschimid [22]. A lignina total foi obtida pela soma de lignina insolúvel e solúvel.

8.2.4 Carbonização em escala de laboratório

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico do tipo mufla, com reator metálico conectado a um condensador resfriado a água, que é acoplado a um frasco coletor (Kitasato) de gases condensáveis. Para a carbonização, foram utilizados por galho aproximadamente 300g de madeira das duas cunhas opostas não utilizadas para a determinação da densidade básica, previamente secas em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas. O tempo total de carbonização foi de 4 horas e 30 minutos, enquanto a temperatura máxima foi de 450°C. A Fig. 2 mostra a rampa de aquecimento adotada para os ensaios de carbonização.

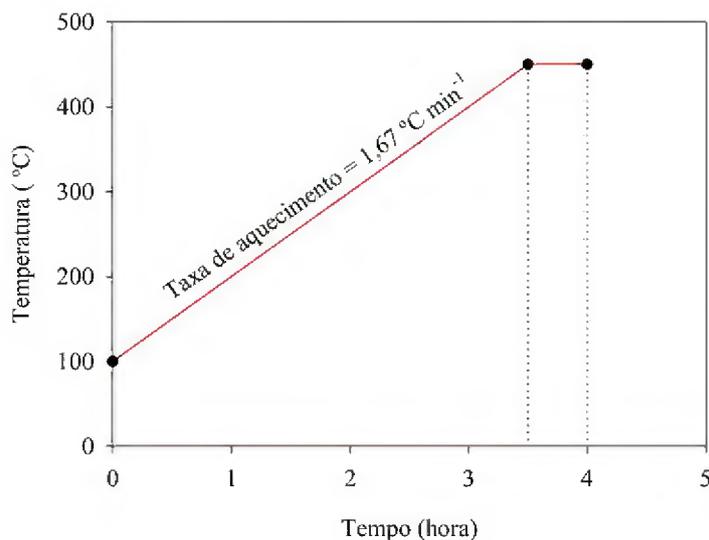


Fig. 2. Rampa de carbonização usada nos ensaios de carbonização dos resíduos madeireiros de um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

Após as carbonizações foram calculados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC), líquido pirolenhoso (RLP) e gases não condensáveis (RGNC) por meio das Eqs (1), (2) e (3), respectivamente.

$$\text{RGC} = \left(\frac{\text{MCV}}{\text{MSM}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que, RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base seca (%), MCV: Massa seca de carvão vegetal (g) e MSM: Massa seca de madeira (g).

$$\text{RLP} = \left(\frac{\text{MLP}}{\text{MSM}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que, RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso (%), MLP: Massa de líquido pirolenhoso (g) e MSM: Massa seca de madeira (g).

$$\text{RGNC} = 100 - (\text{RGC} + \text{RLP}) \quad (3)$$

Em que, RGNC: Rendimento em gases não condensáveis (%), RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%) e RLP: Rendimento em líquido pirolenhoso (%).

A Eq. (4) foi utilizada para o cálculo do consumo específico de lenha por espécie.

$$\text{CE} = \left[\frac{1}{\text{DB} \times \left(\frac{\text{RGC}}{100} \right)} \right] \quad (4)$$

Em que, CE: Consumo específico de lenha (m³ de resíduos madeireiros ton⁻¹ de carvão vegetal), DB: Densidade básica (ton m⁻³) e RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base seca (%).

8.2.5 Qualidade do carvão vegetal

A densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em água, conforme adaptação da norma NBR 11941 [19].

A caracterização química do carvão vegetal será realizada com base na determinação da constituição química elementar e imediata. A fração de madeira moída que foi retida entre as peneiras de 60 (0,250 mm) e 200 *mesh* (0,074 mm) foi usada para análise química elementar. Carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram quantificados em um Elementar Universal Analyzer® (modelo Vario Micro Cube). O conteúdo de oxigênio foi obtido por diferença (Eq. (5)).

$$O = 100 - C - H - N - S - TCz \quad (5)$$

Em quê, O: Oxigênio (%); C: Carbono (%); H: Hidrogênio (%); N: Nitrogênio (%); S: Enxofre (%); e TCz: Teor de cinzas (%).

As razões N/C, H/C e O/C foram calculadas usando as Eqs. (6), (7) e (8), respectivamente.

$$H/C = \frac{H/1}{C/12} \quad (6)$$

Em quê, H: Hidrogênio (%); C: Carbono (%); 1: Massa atômica do hidrogênio (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

$$N/C = \frac{N/14}{C/12} \quad (7)$$

Em quê, N: Nitrogênio (%); C: Carbono (%); 14: Massa atômica do nitrogênio (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

$$O/C = \frac{O/16}{C/12} \quad (8)$$

Em quê, O: Oxigênio (%); C: Carbono (%); 16: Massa atômica do oxigênio (u); e 12: Massa atômica do carbono (u).

A composição química imediata do carvão vegetal foi determinada a partir das amostras de carvão vegetal moídas e peneiradas, retidas em peneira de 60 *mesh* e, posteriormente, secas em estufa a 103 ± 2 °C, até massa constante, conforme a norma

NBR 6923 [23]. A determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foi realizada com base na norma NBR 8112 [24].

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi estimado com base na Eq. (10), ajustada ($R^2 = 0,93$) por Cordero et al. [25], enquanto que o poder calorífico inferior foi calculado pela Eq. (11).

$$PCS = (0,3543 \times TCF) + (0,1708 \times TMV) \quad (10)$$

Em que, PCS: Poder calorífico superior (MJ kg^{-1}), TCF: Teor de carbono fixo (%) e TMV: Teor de materiais voláteis (%).

$$PCI = PCS - (206 \times H) \quad (11)$$

Em que, PCI: Poder calorífico inferior (kJ kg^{-1}), PCS: Poder calorífico superior (kJ kg^{-1}) e H: Hidrogênio elementar (%).

A densidade energética unitária do carvão vegetal foi calculada levando em consideração o poder calorífico inferior e a densidade relativa aparente do carvão vegetal dos resíduos madeireiros (Eq. (12)).

$$DE = PCI \times DRA \quad (12)$$

Em que, DE: Densidade energética do carvão vegetal (MJ m^{-3}), PCI: Poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}) e DRA: Densidade relativa aparente (kg m^{-3}).

8.2.6 Balanço de massa da carbonização

Para a determinação dos balanços de carbono, oxigênio e hidrogênio foram considerados os teores destes elementos presentes no carvão vegetal e na madeira e o rendimento gravimétrico do processo de carbonização (Eqs (13), (14) e (15)). Nos cálculos foram considerados os percentuais de carbono, oxigênio e hidrogênio que permaneceram retidos na estrutura do carvão vegetal, base massa seca de cada elemento químico presente na madeira. Os percentuais de carbono, oxigênio e hidrogênio volatilizados foram obtidos por diferença, ou seja, subtraindo de 100% o percentual de cada elemento retido no carvão vegetal.

$$CR = RGC \times \left(\frac{CEC}{CEM} \right) \quad (13)$$

Em que, CR: Carbono retido no carvão vegetal (%), RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base seca (%), CEC: Carbono elementar contido no carvão vegetal (%) e CEM: Carbono elementar contido na madeira (%).

$$OR = RGC \times \left(\frac{OEC}{OEM} \right) \quad (14)$$

Em que, OR: Oxigênio retido no carvão vegetal (%), RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base seca (%), OEC: Oxigênio elementar contido no carvão vegetal (%) e OEM: Oxigênio elementar contido na madeira (%).

$$HR = RGC \times \left(\frac{HEC}{HEM} \right) \quad (15)$$

Em que, HR: Hidrogênio retido no carvão vegetal (%), RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base seca (%), HEC: Hidrogênio elementar contido no carvão vegetal (%), e HEM: Hidrogênio elementar contido na madeira (%).

8.2.7 Rendimento em carbono fixo e rendimento energético das espécies

O rendimento em carbono fixo (RCF) do carvão vegetal dos resíduos madeiros do manejo florestal sustentável foi quantificado com base na Eq. (16).

$$RCF = \frac{RGC \times TCF}{100} \quad (16)$$

Em que, RCF: Rendimento em carbono fixo (%), RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%) e TCF: Teor de carbono fixo (%).

O rendimento energético (RE) foi calculado através da Eq. (17), baseado no rendimento gravimétrico da carbonização e no poder calorífico inferior da madeira e do carvão vegetal.

$$RE = RGC \times \left(\frac{PCIC}{PCIm} \right) \quad (17)$$

Em que, RE: Rendimento energético (%), RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base seca (%), PCIC: Poder calorífico do carvão vegetal (MJ kg⁻¹) e PCIm: Poder calorífico inferior da madeira (MJ kg⁻¹).

8.2.8 Ranqueamento do carvão vegetal e equivalências energéticas com combustíveis fósseis

O ranqueamento energético do carvão vegetal dos resíduos madeiros de espécies tropicais foi construído com base no índice de desempenho energético (Eq. (18)), proposto por Bhatt e Todaria [26]. Este índice considera a densidade e o poder calorífico do carvão como características positivas e, o teor de cinzas como característica negativa ao uso energético.

$$IDE = \frac{PCS \times DRA}{TCz} \quad (18)$$

Em que, IDE: Índice de desempenho energético do carvão vegetal, PCS: Poder calorífico superior (MJ kg⁻¹), DRA: Densidade relativa aparente (g cm⁻³) e TCz: Teor de cinzas (g/g).

Para comparação dos carvões de resíduos de madeira com combustíveis fósseis, os seguintes índices foram estudados: tep_{ton de carvão vegetal} - tonelada equivalente de petróleo relacionada à 1 tonelada de carvão vegetal (Eq. (19)); tep_{m³ de carvão vegetal} - tonelada equivalente de petróleo relacionada à 1 m³ de carvão vegetal (Eq. (20)); EqVOC1 - volume de óleo combustível equivalente à 1 tonelada de carvão vegetal (Eq. (21)); EqVOC2 - volume de óleo combustível equivalente à 1 m³ de carvão vegetal (Eq. (22)); e MCO₂ - massa de CO₂ retida em 1 m³ de carvão vegetal (Eq. (23)). Foi considerado que 1 tonelada equivalente de petróleo (tep) apresenta poder calorífico inferior de 41.868 MJ e o poder calorífico inferior do óleo combustível de 40,1 MJ kg⁻¹ [27].

$$tep_{ton \text{ de carvão vegetal}} = \frac{PCIC}{41.868} \quad (19)$$

Em que, tep_{ton de carvão vegetal}: tonelada equivalente de petróleo relacionada à 1 tonelada de carvão vegetal (tep ton⁻¹), PCIC: Poder calorífico inferior do carvão vegetal (MJ ton⁻¹) e 41.868: Densidade energética em 1 tep (MJ ton⁻¹).

$$tep_{m^3 \text{ de carvão vegetal}} = \frac{DEC}{41.868} \quad (20)$$

Em que, tep_{m³ de carvão vegetal}: tonelada equivalente de petróleo relacionada à 1 m³ de carvão vegetal (toe m⁻³), DEC: Densidade energética do carvão vegetal (MJ m⁻³) e 41.868: Densidade energética em 1 tep (MJ ton⁻¹).

$$EqVOC1 = \frac{PCIC}{DEO} \quad (21)$$

Em que, EqVOC1: Volume de óleo combustível equivalente à 1 tonelada de carvão vegetal (m³ ton⁻¹), PCIC: Poder calorífico inferior do carvão vegetal (MJ ton⁻¹) e DEO: Densidade energética do óleo combustível (MJ ton⁻¹).

$$EqVOC2 = \frac{DEC}{DEO} \quad (22)$$

Em que, EqVOC2: Volume de óleo combustível equivalente à 1 m³ de carvão vegetal (m³ m⁻³), DEC: Densidade energética do carvão vegetal (MJ ton⁻¹) e DEO: Densidade energética do óleo combustível (MJ ton⁻¹).

$$MCO_2 = DRA \times \left(\frac{C}{100}\right) \times \left(\frac{44}{12}\right) \quad (23)$$

Em que, MCO₂: Massa de CO₂ retida em 1 m³ de carvão vegetal (kg), DRA: Densidade relativa aparente do carvão vegetal (kg m⁻³), C: Carbono elementar (%), 44: Massa de CO₂ (u) e 12: Massa atômica do carbono (u).

8.2.9 Análises estatísticas

Os dados foram testados quanto a homogeneidade de variâncias e normalidade dos resíduos pelos testes de Bartlett ($p \leq 0,05$) e Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$), respectivamente. Em seguida, os resultados foram submetidos à análise de variância considerando um delineamento inteiramente casualizado (DIC) visando verificar o efeito de espécie nas propriedades do carvão vegetal e no balanço de massa da carbonização. O teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) foi aplicado para comparação de médias e verificação de similaridade entre as espécies. O coeficiente de determinação de Pearson foi utilizado para verificar a existência de associação entre as variáveis estudadas. Finalmente, foram plotados modelos de regressão polinomiais para entender o grau de associação entre as variáveis.

Foi realizado um agrupamento multivariado das espécies por meio da análise de componentes principais de acordo com os valores médios das propriedades do carvão vegetal que apresentaram efeito de espécie. O estudo dos escores das componentes principais possibilitou avaliar a similaridade ou dissimilaridade das espécies e discriminar quais as variáveis mais importantes na identificação dos grupos visando futuras diretrizes para o uso energético. As análises estatísticas foram realizadas em linguagem R® versão 3.4.3 [28].

8.3 Resultados e discussão

8.3.1 Densidade básica dos resíduos madeireiros

O efeito da espécie sobre a densidade básica dos resíduos de madeira do manejo florestal sustentável foi verificado ($p \leq 0,05$), conforme (Fig. 3). Os valores dessa variável variaram de $0,525 \text{ g cm}^{-3}$ (*D. excelsa*) a $0,895 \text{ g cm}^{-3}$ (*C. guianensis*). Essa variação está relacionada às taxas de crescimento das espécies florestais estudadas, sendo que as de menor densidade básica apresentam taxas de crescimento mais aceleradas [29]. A alta densidade básica tem impacto positivo na produção de carvão, como baixo consumo específico de lenha e alta densidade a granel de carvão. Como base nessa variável, *M. elata*, *D. excelsa*, *E. schomburgkii* e *L. canescens* são as espécies mais promissoras para a bioenergia.

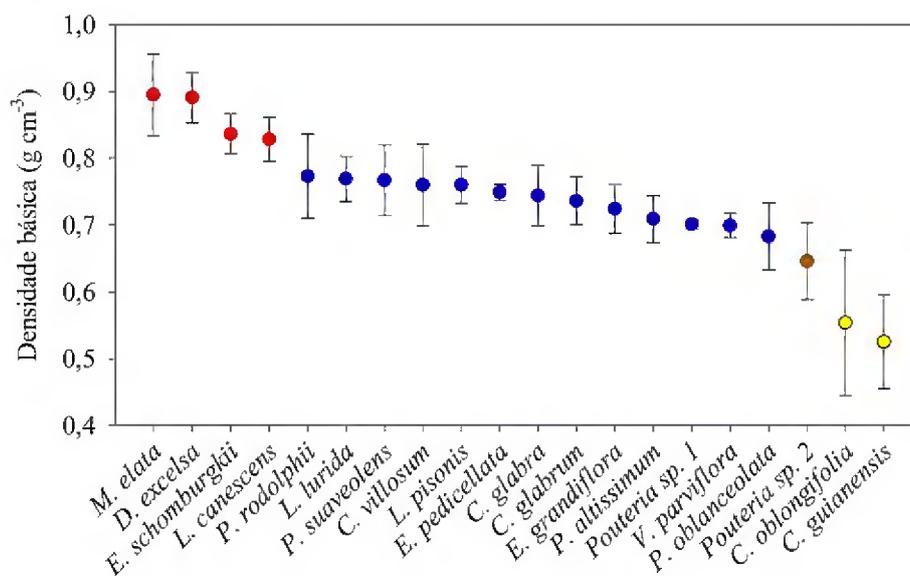


Fig. 3. Densidade básica dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Cores diferentes representam os grupos de médias formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.

8.3.2 Consumo específico de lenha

O consumo específico de lenha variou significativamente entre os resíduos de exploração, sendo que *D. excelsa* e *M. elata* tiveram as médias mais baixas (Fig. 4). Dessa forma, seriam necessários 2,5 m³ e 2,8 m³ de resíduos da exploração de *D. excelsa* e *M. elata*, respectivamente, para produzir 1 tonelada de carvão vegetal. O CE se correlacionou negativamente com a densidade básica e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, dessa forma o uso de resíduos tropicais madeireiros com alta densidade básica reduzirá o consumo específico de lenha e aumentará o rendimento gravimétrico no carvão [30].

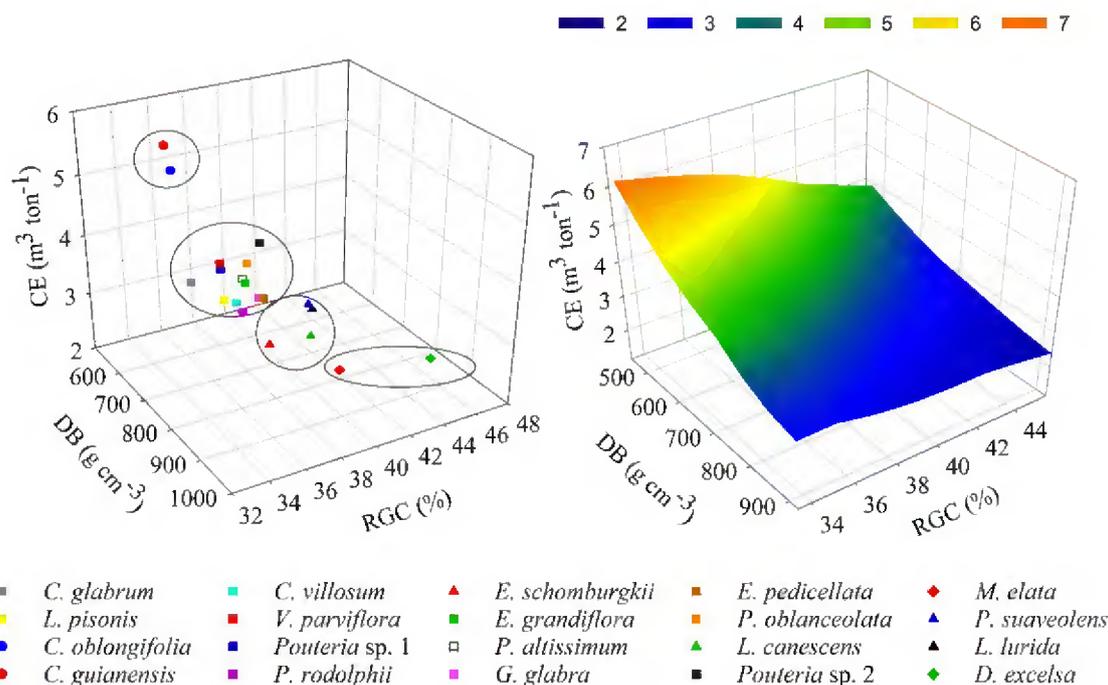


Fig. 4. Consumo específico de lenha (CE) dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável e relação dessa variável com a densidade básica (DB) e rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC). Os círculos representam os grupos formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) para o consumo específico de lenha.

8.3.3 Rendimentos e balanço de massa da carbonização dos resíduos

O maior rendimento em carvão vegetal (RGC) foi verificado para a espécie *D. excelsa* (45,5%). As espécies que tiveram maiores rendimentos em gases não condensáveis (RGNC) foram *G. glabra* (23,4%) e *E. schomburgkii* (25,0%). O rendimento em líquido pirolenhoso (RLP) variou de 37,9% (*D. excelsa*) a 46,1% (*C. guianensis*). A espécie *D. excelsa* apresentou o melhor rendimento em carbono fixo (RCF) (33,2%), enquanto que *C. glabrum* (24,4%) apresentou o pior desempenho para essa variável (Tabela 2).

Tabela 2

Rendimentos da carbonização dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável em escala de laboratório.

Espécie	RGC (%)		RGNC (%)		RLP (%)		RCF (%)	
<i>D. excelsa</i>	45,5 ± 0,5	a	16,6 ± 0,4	d	37,9 ± 0,5	b	33,2 ± 0,6	a
<i>L. lurida</i>	40,7 ± 2,2	b	15,2 ± 0,6	d	44,1 ± 2,7	a	29,4 ± 1,7	b
<i>P. suaveolens</i>	40,5 ± 2,5	b	16,4 ± 0,6	d	43,1 ± 2,3	a	29,4 ± 1,7	b
<i>M. elata</i>	39,9 ± 2,0	b	17,0 ± 1,2	d	43,2 ± 2,6	a	28,7 ± 1,1	b
<i>Pouteria</i> sp. 2	39,8 ± 0,4	b	17,1 ± 0,7	d	43,1 ± 0,3	a	27,5 ± 1,4	c
<i>L. canescens</i>	39,5 ± 2,1	b	18,8 ± 0,3	c	41,7 ± 1,8	a	26,5 ± 0,6	c
<i>P. oblanceolata</i>	38,4 ± 2,0	c	18,5 ± 1,3	c	43,0 ± 2,7	a	27,2 ± 2,1	c
<i>E. pedicellata</i>	38,2 ± 0,7	c	19,4 ± 0,8	c	42,4 ± 1,2	a	28,5 ± 0,1	b
<i>G. glabra</i>	38,0 ± 0,4	c	23,4 ± 3,1	a	38,6 ± 3,1	b	27,4 ± 0,4	c
<i>P. altissimum</i>	37,7 ± 1,6	c	18,4 ± 1,6	c	43,9 ± 3,3	a	27,4 ± 1,8	c
<i>E. grandiflora</i>	37,6 ± 2,5	c	18,1 ± 1,0	c	44,3 ± 2,9	a	26,0 ± 1,0	c
<i>E. schomburgkii</i>	37,0 ± 0,1	c	25,0 ± 0,7	a	37,9 ± 0,7	b	27,9 ± 0,5	c
<i>P. rodolphii</i>	36,6 ± 1,0	c	21,9 ± 4,2	b	41,5 ± 5,1	a	26,7 ± 0,5	c
<i>Pouteria</i> sp. 1	36,6 ± 1,1	c	19,0 ± 2,2	c	44,4 ± 1,2	a	26,0 ± 0,3	c
<i>V. parviflora</i>	36,6 ± 1,4	c	19,3 ± 0,8	c	44,1 ± 0,9	a	25,2 ± 1,2	c
<i>C. villosum</i>	36,5 ± 1,0	c	20,1 ± 0,9	c	43,4 ± 1,9	a	26,5 ± 0,5	c
<i>C. guianensis</i>	36,4 ± 0,7	c	17,5 ± 0,6	d	46,1 ± 1,2	a	26,4 ± 0,6	c
<i>C. oblongifolia</i>	36,3 ± 0,6	c	18,6 ± 1,0	c	45,1 ± 0,4	a	26,8 ± 0,7	c
<i>L. pisonis</i>	35,8 ± 1,5	c	19,2 ± 0,4	c	45,0 ± 1,3	a	26,8 ± 0,7	c
<i>C. glabrum</i>	34,4 ± 0,8	c	20,7 ± 0,8	b	44,9 ± 0,4	a	24,4 ± 0,2	c
CVe (%)	3,84		7,89		5,12		3,83	

CVe = Coeficiente de variação experimental; RGC = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RGNC = Rendimento em gases não condensáveis; RLP = Rendimento em líquido pirolenhoso; e RCF = Rendimento em carbono fixo. Média ± desvio padrão.

Zanuncio et al. [31] carbonizaram madeiras de reflorestamento de *Eucalyptus* (*E. paniculata*, *E. urophylla*, *E. urophylla* x *E. camaldulensis* e *E. citriodora* x *E. toreliana*), *Corymbia citriodora* e *Pinus oocarpa* sob condições semelhantes às deste trabalho (temperatura final de 450°C e taxa de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹). Os autores verificaram resultados inferiores para o RGC (29,39% - 33,07%). Portanto, os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável apresentam melhor RGC para produção de carvão vegetal e menor conversão de massa de madeira em subprodutos (gases condensáveis e não condensáveis) da pirólise em comparação com madeiras de espécies comumente utilizadas para finalidades bioenergéticas no Brasil.

Com base no coeficiente de correlação de Pearson, houve correlação significativa do RGC apenas com Extrativos totais ($r = 0,69$; $p \leq 0,05$). Não houve correlação com a Lignina total ($r = 0,30$; $p \leq 0,20$). Dessa forma, os altos valores de RGC estão associados

as madeiras com maiores conteúdos de extrativos totais (Fig. 5). Moulin et al. [32] reportaram influência positiva das substâncias extraíveis em água quente de resíduos de três espécies nativas amazônicas (*Apuleia leiocarpa*, *Manilkara huberi* e *Tabebuia serratifolia*) no RGC. Com isso, existe a necessidade de qualificar os extrativos dos resíduos madeireiros estudados, visto que a relação H/C nos extrativos está relacionada positivamente com o RGC e a estabilidade térmica desses constituintes químicos [33].

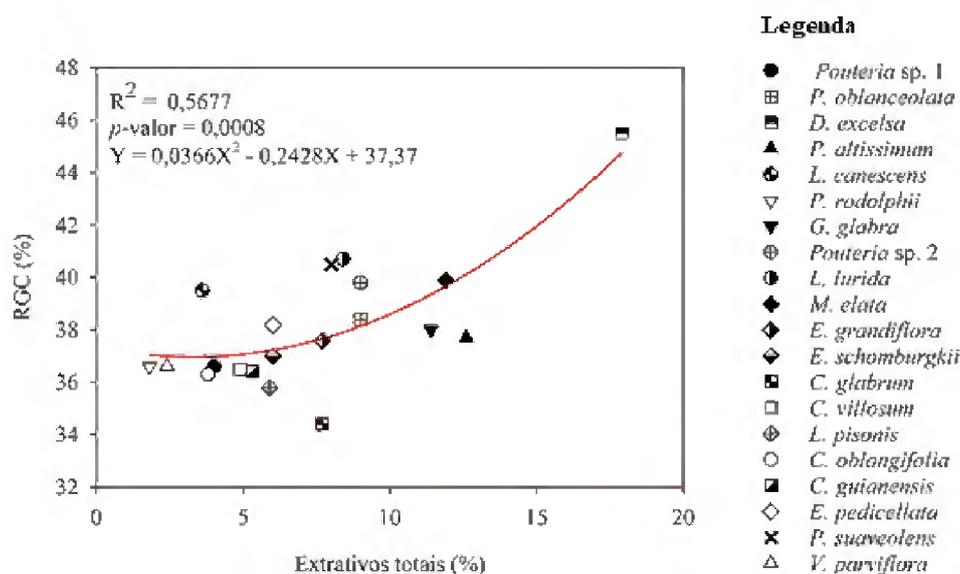


Fig. 5. Relação entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC) e extrativos totais de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável no Pará, Brasil.

Com relação ao RLP e RGNC reportados em nosso estudo, nota-se que os resíduos de madeiras tropicais apresentam menor conteúdo de subprodutos gerados pela carbonização se consideradas madeiras do cerrado (*Anadenanthera colubrine*, *Poincianella pyramidalis*, *Cnidoscolus quercifolius*, *Piptadenia stipulacea*, *Mimosa tenuiflora*, *Manihot carthaginensis*, *Aspidosperma pyriformis*, *Platycyamus regnellii*, *Jatropha grossidentata* e *Commiphora leptophloeos*), avaliadas por Dias Júnior et al. [34]. Os autores verificaram as seguintes variações para os subprodutos da pirólise: 32,61% - 52,52% (RGNC) e 24,32% - 36,39% (RLP). Menor geração de subprodutos gasosos não condensáveis (CO, CO₂, CH₄, H₂ e hidrocarbonetos de baixa massa molecular) pela carbonização implica na redução da emissão de gases causadores do efeito estufa [35]. Dessa forma, a escolha dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável, além de ter um forte apelo ambiental devido aos baixos níveis de gases emitidos, apresenta rendimento gravimétrico em carvão vegetal promissor visando o abastecimento do polo siderúrgico de Carajás e a geração de eletricidade na região.

O RCF expressa a relação entre o conteúdo de carbono presente na madeira e o retido no carvão vegetal [35]. Os altos valores de RCF encontrados em nosso estudo expressam maior eficiência da carbonização para as respectivas espécies (*D. excelsa*, *L. lurida* e *P. Suaveolens*). Dessa forma, espécies com maior RCF são desejáveis para finalidade energética pois apresentarão maior carbono retido na forma de carbono sólido após a carbonização [36], conseqüentemente, maior conteúdo energético estocado. Adicionalmente, essa variável apresenta relação diretamente proporcional ao conteúdo de lignina e extrativos da madeira, e inversamente proporcional ao conteúdo de hemicelulose [37]. Valores de RCF menores do que os reportados em nosso estudo, foram registrados por Dias Júnior et al. [34] analisando a carbonização de *Eucalyptus grandis* (28,57%) e *Eucalyptus saligna* (27,21%) após 5 horas sob taxa de aquecimento de $1,67^{\circ}\text{C min}^{-1}$.

Apenas para o balanço de oxigênio (O) não houve diferença entre os resíduos estudados. *D. excelsa* apresentou os melhores resultados para carbono retido (71%) e carbono volatilizado (29%). O oxigênio foi o elemento menos retido após a carbonização se comparado aos demais (C e H). As espécies que mais reteram oxigênio pós carbonização foram *D. excelsa*, *G. glabra* e *M. elata*, conseqüentemente, também foram as que menos volatilizaram esse elemento. As espécies *D. excelsa* e *C. guianensis* se destacaram com a melhor e pior performance no balanço de H (Fig. 6).

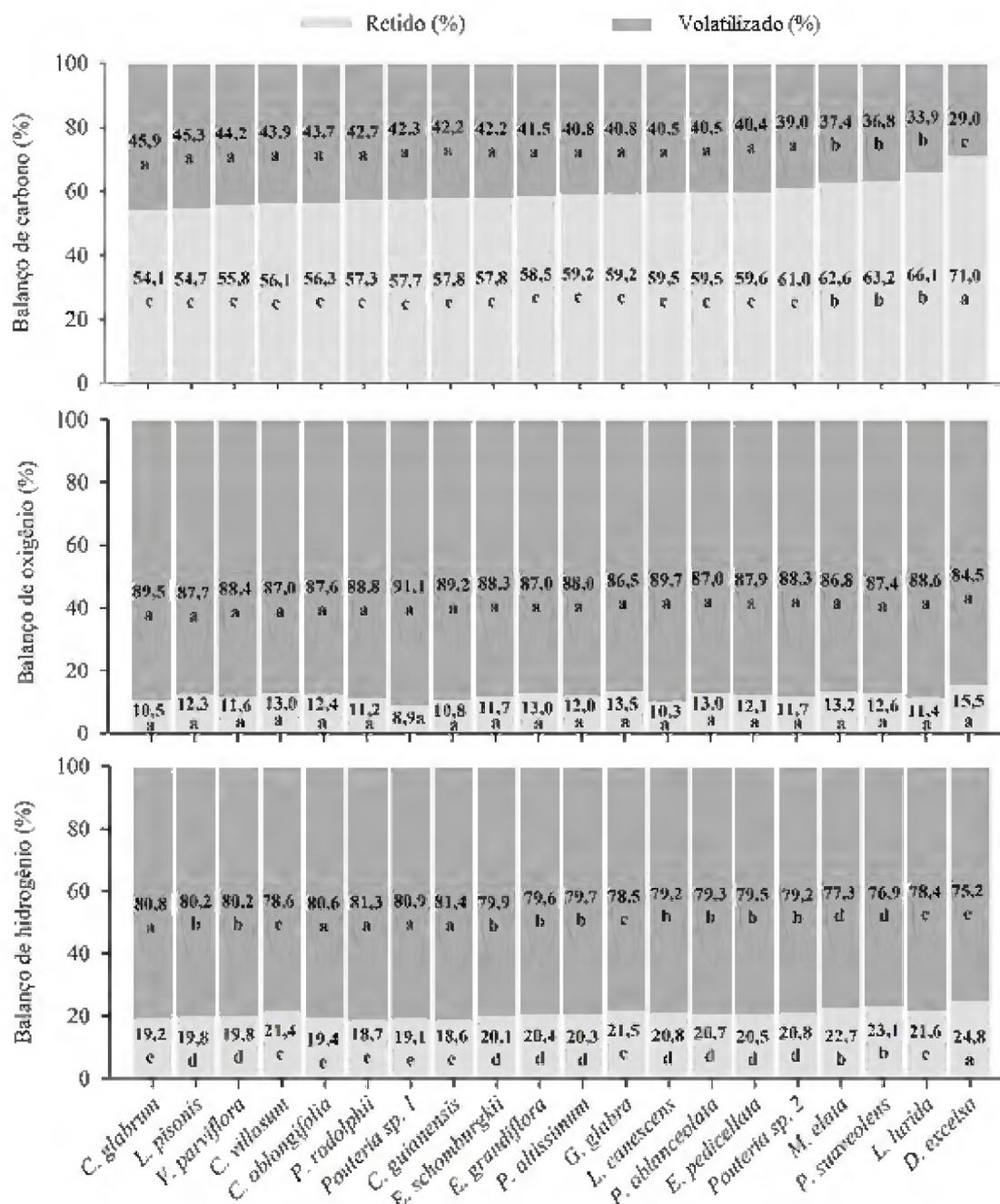


Fig. 6. Balanço de massa da carbonização em escala laboratorial de resíduos madeiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável no Pará, Brasil.

Entre os três elementos analisados no balanço de massa, o C foi o mais retido, seguido do H e O, pois a carbonização promove a maior concentração de C devido a menor degradação da lignina e expulsão de O no produto sólido [30,37]. O maior conteúdo volatilizado de O é um ponto positivo do processo de carbonização, pois este elemento reduz o poder calorífico do combustível [38].

O balanço de massa da carbonização foi influenciado positivamente pelo teor de extrativos totais das madeiras residuais analisadas. O coeficiente de determinação de

Pearson corroborou relações positivas ($p \leq 0,05$) entre os extrativos totais das madeiras com C retido (0,71), O retido (0,68) e H retido (0,74). Dessa forma, é possível afirmar que os teores retidos de C, O e H no carvão vegetal aumentam proporcionalmente com o teor de extrativos totais na madeira (Fig. 7).

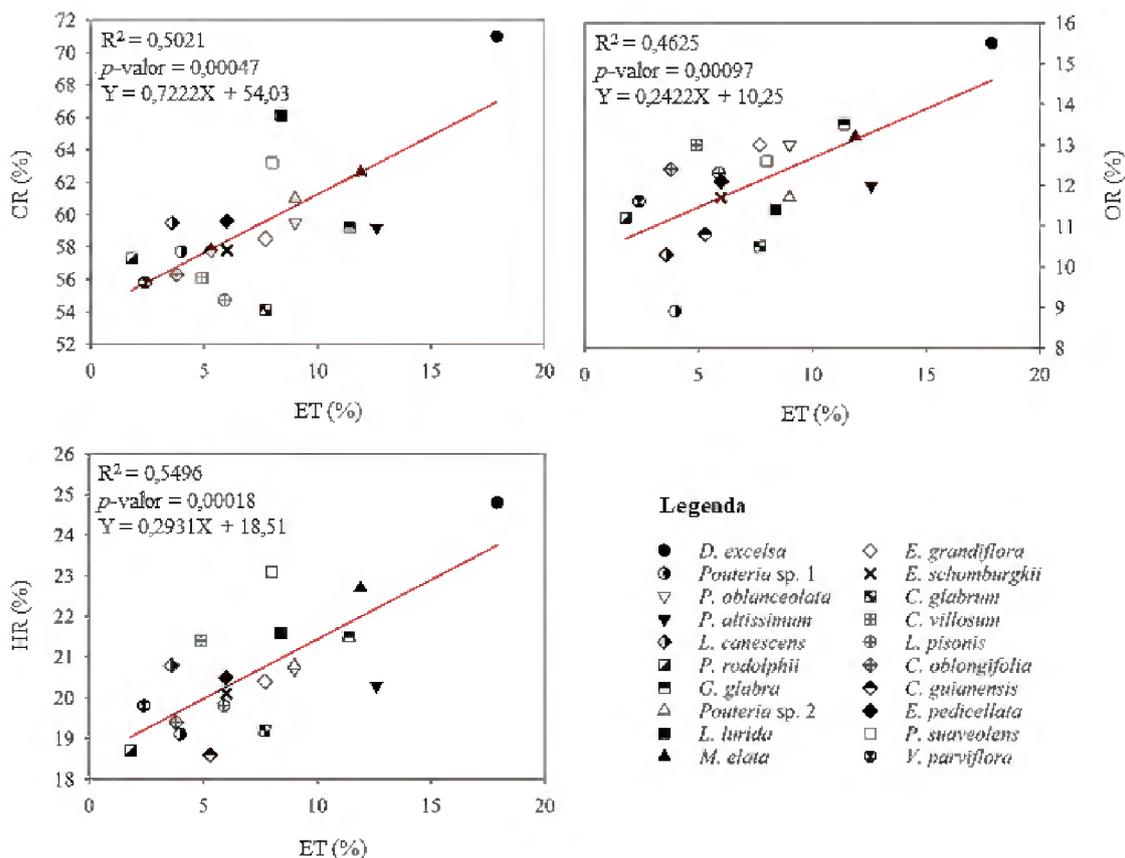


Fig. 7. Relação dos extrativos totais (ET) com carbono retido (CR), oxigênio retido (OR) e hidrogênio retido (HR) dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável no Pará, Brasil.

Portanto, sugere-se a qualificação dos extrativos contidos nas madeiras residuais, visando esclarecer a composição química desses constituintes químicos não estruturais da parede celular. Contudo, estes elementos apresentam altos conteúdos de C, H e O em sua composição, pois Roy [39] verificaram que a remoção de extrativos em madeiras de *Populus tremuloides* aos vinte anos de idade promoveu o decréscimo de 34% e 64% nos conteúdos de H e O do carvão vegetal.

8.3.4 Densidade relativa aparente do carvão vegetal dos resíduos madeireiros

A análise de variância revelou que a densidade relativa aparente do carvão vegetal foi influenciada significativamente pela espécie, ao nível de 5% de significância. Este parâmetro oscilou de $0,4231 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,6199 \text{ g cm}^{-3}$, em que as maiores médias foram observadas para *M. elata*, *L. lurida*, *L. canescens* e *D. excelsa*. A menor média de densidade relativa aparente foi reportada para *C. guianensis* (Fig. 8).

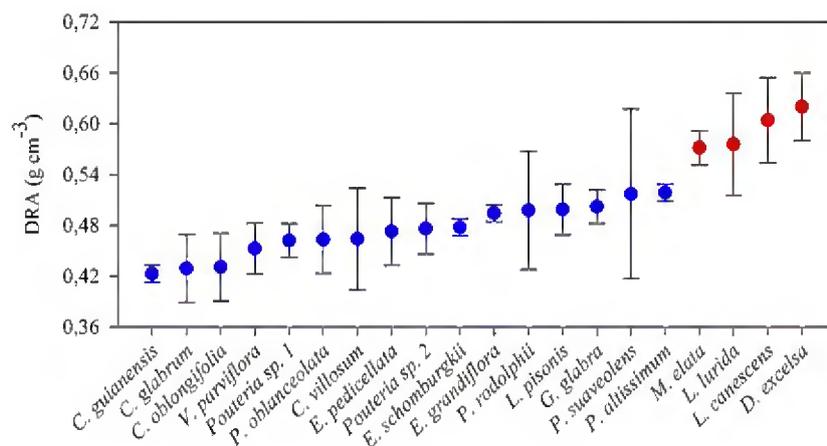


Fig. 8. Densidade relativa aparente do carvão vegetal de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Cores diferentes representam os grupos de médias formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.

Os valores de densidade relativa aparente do carvão vegetal foram positivamente correlacionados ($r = 0,75$) com a densidade básica da madeira (Fig. 9). Os carvões de *M. elata*, *L. lurida*, *L. canescens* e *D. excelsa* são densos porque a madeira dessas espécies também são densas. Outros estudos [40,41] corroboram relação linear positiva entre essas duas variáveis.

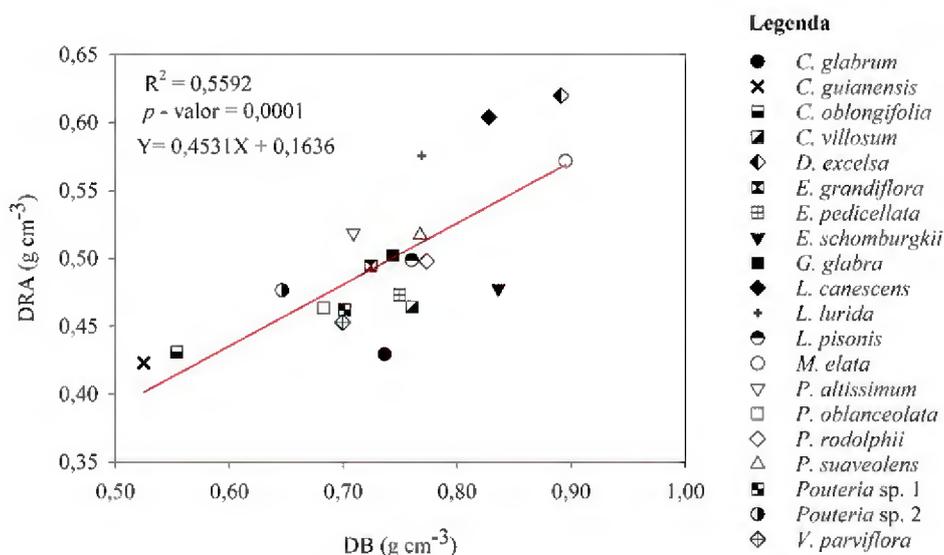


Fig. 9. Relação entre a densidade aparente do carvão vegetal (DRA) e a densidade básica (DB) dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

Para fins siderúrgicos, é desejável um carvão vegetal com alta densidade aparente, pois essa propriedade resulta em uma maior capacidade calorífica por unidade de volume [37]. Além disso, o uso de carvão vegetal mais denso melhora a produtividade dos altos fornos siderúrgicos devido a maior quantidade de carbono fixo empregada no processo, e aumenta o tempo de permanência da carga metálica no equipamento [16,42]. Se considerada apenas a densidade relativa aparente como parâmetro de segregação de espécies para carbonização, são estipulados valores superiores a $0,250 \text{ g cm}^{-3}$ como ideal ao uso siderúrgico [16], todas as madeiras residuais estudadas são promissoras para a finalidade.

O carvão vegetal das espécies *D. excelsa*, *L. lurida*, *L. canescens* e *P. altissimum* apresentaram menores tendências à formação de fissuras, se comparadas as espécies *C. guianensis* e *C. oblongifolia* (Fig. 10). Esse resultado é explicado pela maior densidade relativa aparente do carvão vegetal que têm maior resistência mecânica e menos finos gerados durante o manuseio e/ou transporte desse combustível.



Fig. 10. Carvão vegetal de resíduos madeireiros de um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

8.3.5 Propriedades químicas do carvão vegetal dos resíduos

A composição química imediata do carvão vegetal foi influenciado significativamente pelo fator espécie. Variações expressivas foram registradas para o teor de carbono fixo (TCF) (67,2% - 75,3%), materiais voláteis (TMV) (22,4% - 26,7%) e cinzas (TCz) (0,5% - 9,6%) (Fig. 11). O grupo de espécies com as maiores médias de carbono fixo teve variação de 72,0% (*G. glabra*) a 75,28% (*E. schomburgkii*). A maior e menor média de materiais voláteis foram reportadas para *C. glabrum* e *C. oblongifolia*, respectivamente. As espécies *V. parviflora* (6,0%), *Pouteria* sp. 1 (6,0%), *Pouteria* sp. 2 (6,3%) e *L. canescens* (9,6%) apresentaram as piores performances para o teor de cinzas.

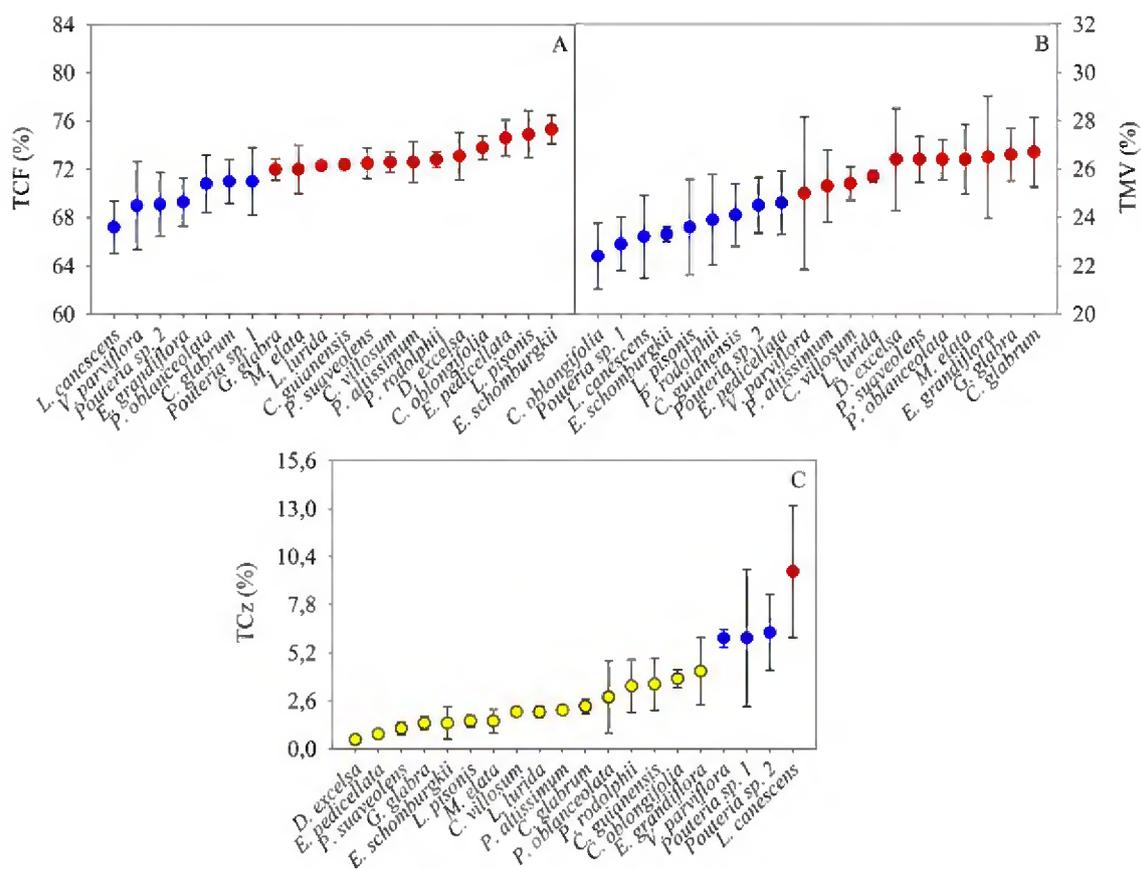


Fig. 11. Teor de carbono fixo (TCF), materiais voláteis (TMV) e cinzas (TCz) do carvão vegetal proveniente de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Cores diferentes representam os grupos de médias formados pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) e as barras de erro, o desvio padrão.

Carvão vegetal com alto TCF é recomendado para o uso siderúrgico e produção de energia elétrica devido à maior estabilidade térmica e a maior capacidade de gerar energia na forma de calor [37]. Proporções elevadas de carbono fixo têm reflexos positivos na produtividade dos alto fornos siderúrgicos [42]. Dessa forma, as espécies *E. schomburgkii*, *L. pisonis*, *E. pedicellata*, *C. oblongifolia* e *D. excelsa* se destacam como mais promissoras para as finalidades abordadas. Em contrapartida, as espécies *L. canescens* e *V. parviflora* foram as piores nesta classificação.

O carvão vegetal deve ter o TMV variando de 20 – 25% para o uso na produção de aço, uma vez que acima da faixa mencionada fonece níveis mais baixo de carbono fixo e reduz a eficiência do carvão vegetal nos altoforos. No entanto, a fração volátil do carvão vegetal determina a estabilidade da chama e a velocidade de combustão, promove o aumento da permeabilidade da carga do alto-forno e diminuição da reatividade do carvão vegetal [37]. Com isso, é preciso priorizar o equilíbrio entre TCF e TMV no carvão vegetal, pois ambas as frações são importantes no contexto energético.

Os menores TCz no carvão vegetal são desejáveis em alto fornos siderúrgicos. Níveis elevados podem provocar o desgaste do alto-forno, trincas e fissuras no ferro-gusa devido ao processo de segregação [37,42]. Para combustão, são requeridas biomassas com níveis baixos de cinzas, pois contribuirá para o aumento do poder calorífico do biocombustível e, reduzirá a probabilidade de danos aos equipamentos de queima [43,44]. Assim, o carvão vegetal das espécies *L. canescens* e *V. parviflora* é considerado menos promissor para ser utilizado como biorredutor siderúrgico e/ou abastecimento de sistemas modernos de cogeração.

O teste F acusou diferença significativa entre as espécies para os elementos químicos C, N, H e S (Tabela 3). A maior média para o carbono elementar foi apresentada pela espécie *E. pedicellata*, e a menor para *L. canescens*. O carvão de todas as espécies teve conteúdo de nitrogênio abaixo de 2%. As espécies *P. suaveolens*, *E. schomburgkii*, *D. excelsa*, *M. elata*, *P. altissimum*, *C. glabrum*, *G. glabra* e *C. villosum* se destacaram com o melhores níveis de H no carvão vegetal. Os conteúdos de O ($p \leq 0,05$) e S variaram de 10,52% (*L. canescens*) a 14,65% (*G. glabra*) e 0 (*D. excelsa*, *P. rodolphii*, *G. glabra* e *E. pedicellata*) a 0,46% (*L. lurida*), respectivamente.

As relações atômicas variaram em função de espécie, mostrando efeito significativo ($p \leq 0,05$) para H/C e N/C. As melhores relações H/C foram reportadas para o primeiro grupo formado pelo teste de Scott Knott, cuja variação foi de 0,53 (*P. suaveolens*, *E. schomburgkii*, *M. elata*, *P. oblanceolata*, *C. oblongifolia* e *Pouteria* sp. 2) a 0,55 (*C. villosum*). A relação O/C oscilou de 0,10 (*Pouteria* sp. 1) a 0,14 (*G. glabra*, *C. villosum*, *C. oblongifolia* e *E. grandiflora*). Para N/C, foi verificado que 30% das espécies estudadas apresentaram média para N/C de 0,01, e 70% das espécies, média de 0,02 (Tabela 3).

1 **Tabela 3**
 2 Análise química elementar do carvão vegetal proveniente de resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia
 3 Legal, Pará, Brasil.

Espécie	Análise química elementar				Relação atômica			Fórmula empírica
	C (%)	N (%)	H (%)	O (%)	H/C	O/C	N/C	
<i>E. pedicellata</i>	81,61 ± 0,63	a 1,54 ± 0,10	a 3,40 ± 0,09	b 12,68 ± 0,66	a 0,50 ± 0,02	b 0,12 ± 0,01	a 0,02 ± 0,005	a C ₁₀₀ H ₅₀ O ₁₂ N ₂
<i>P. suaveolens</i>	81,18 ± 1,81	a 1,75 ± 0,38	a 3,58 ± 0,08	a 12,36 ± 2,01	a 0,53 ± 0,01	a 0,11 ± 0,02	a 0,02 ± 0,004	a C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₁ N ₂
<i>E. schomburgkii</i>	80,88 ± 2,52	a 1,64 ± 0,13	a 3,57 ± 0,02	a 12,45 ± 1,81	a 0,53 ± 0,01	a 0,12 ± 0,02	a 0,02 ± 0,002	a C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₂ N ₂
<i>D. excelsa</i>	80,71 ± 1,39	a 1,32 ± 0,15	b 3,55 ± 0,06	a 13,88 ± 1,65	a 0,53 ± 0,00	a 0,13 ± 0,02	a 0,01 ± 0,001	b C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₃ N ₁
<i>L. lurida</i>	80,62 ± 2,05	a 1,78 ± 0,13	a 3,49 ± 0,01	b 11,64 ± 1,67	a 0,52 ± 0,02	b 0,11 ± 0,02	a 0,02 ± 0,002	a C ₁₀₀ H ₅₂ O ₁₁ N ₂
<i>M. elata</i>	80,07 ± 3,39	a 1,23 ± 0,19	b 3,58 ± 0,10	a 13,58 ± 2,69	a 0,54 ± 0,01	a 0,13 ± 0,03	a 0,01 ± 0,002	b C ₁₀₀ H ₅₄ O ₁₃ N ₁
<i>P. altissimum</i>	79,93 ± 2,61	a 1,43 ± 0,09	b 3,57 ± 0,09	a 13,00 ± 2,83	a 0,54 ± 0,00	a 0,12 ± 0,03	a 0,02 ± 0,000	b C ₁₀₀ H ₅₄ O ₁₂ N ₂
<i>L. pisonis</i>	79,84 ± 2,39	a 1,47 ± 0,08	a 3,44 ± 0,21	b 13,77 ± 2,29	a 0,52 ± 0,02	b 0,13 ± 0,03	a 0,02 ± 0,001	a C ₁₀₀ H ₅₂ O ₁₃ N ₂
<i>C. glabrum</i>	79,81 ± 1,98	a 1,78 ± 0,20	a 3,60 ± 0,07	a 12,48 ± 1,99	a 0,54 ± 0,02	a 0,12 ± 0,02	a 0,02 ± 0,002	a C ₁₀₀ H ₅₄ O ₁₂ N ₂
<i>P. rodolphii</i>	79,60 ± 0,38	a 1,15 ± 0,12	b 3,45 ± 0,11	b 12,44 ± 1,90	a 0,52 ± 0,02	b 0,12 ± 0,02	a 0,01 ± 0,009	b C ₁₀₀ H ₅₂ O ₁₂ N ₁
<i>G. glabra</i>	79,38 ± 0,91	a 1,05 ± 0,12	b 3,56 ± 0,07	a 14,65 ± 0,91	a 0,54 ± 0,01	a 0,14 ± 0,01	a 0,01 ± 0,001	a C ₁₀₀ H ₅₄ O ₁₄ N ₁
<i>C. guianensis</i>	79,19 ± 1,40	a 1,58 ± 0,20	a 3,42 ± 0,08	b 12,27 ± 1,02	a 0,52 ± 0,01	b 0,12 ± 0,01	a 0,02 ± 0,001	a C ₁₀₀ H ₅₂ O ₁₂ N ₂
<i>Pouteria</i> sp. 1	78,98 ± 3,36	a 1,58 ± 0,23	a 3,36 ± 0,08	b 10,01 ± 0,81	a 0,51 ± 0,02	b 0,10 ± 0,01	a 0,02 ± 0,008	b C ₁₀₀ H ₅₁ O ₁₀ N ₂
<i>C. villosum</i>	78,41 ± 1,60	a 1,32 ± 0,03	b 3,63 ± 0,05	a 14,63 ± 1,59	a 0,55 ± 0,01	a 0,14 ± 0,02	a 0,01 ± 0,000	b C ₁₀₀ H ₅₅ O ₁₄ N ₁
<i>P. oblanceolata</i>	78,39 ± 2,68	a 1,46 ± 0,14	a 3,49 ± 0,07	b 13,80 ± 1,83	a 0,53 ± 0,01	a 0,13 ± 0,02	a 0,02 ± 0,002	a C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₃ N ₂
<i>C. oblongifolia</i>	77,04 ± 0,85	b 1,50 ± 0,11	a 3,42 ± 0,05	b 14,20 ± 0,59	a 0,53 ± 0,01	a 0,14 ± 0,01	a 0,02 ± 0,002	a C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₄ N ₂
<i>Pouteria</i> sp. 2	76,99 ± 1,70	b 1,35 ± 0,15	b 3,41 ± 0,08	b 11,92 ± 2,73	a 0,53 ± 0,00	a 0,12 ± 0,03	a 0,02 ± 0,006	b C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₂ N ₂
<i>E. grandiflora</i>	76,59 ± 1,15	b 1,33 ± 0,11	b 3,47 ± 0,13	b 14,39 ± 1,77	a 0,54 ± 0,03	a 0,14 ± 0,02	a 0,01 ± 0,001	b C ₁₀₀ H ₅₄ O ₁₄ N ₁
<i>V. parviflora</i>	76,21 ± 2,18	b 1,34 ± 0,11	b 3,41 ± 0,07	b 13,01 ± 2,18	a 0,54 ± 0,00	a 0,13 ± 0,03	a 0,02 ± 0,006	b C ₁₀₀ H ₅₄ O ₁₃ N ₂
<i>L. canescens</i>	74,94 ± 2,37	b 1,62 ± 0,19	a 3,32 ± 0,18	b 10,52 ± 1,36	a 0,53 ± 0,02	a 0,11 ± 0,01	a 0,02 ± 0,002	a C ₁₀₀ H ₅₃ O ₁₁ N ₂
CVe (%)	2,58	11,21	2,75	14,23	2,55	16,16	10,97	

4 CVe = coeficiente de variação experimental; C = Carbono; N = Nitrogênio; H = Hidrogênio; e O = Oxigênio. As colunas com letras minúsculas diferentes indicam diferenças
 5 significativas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Média ± desvio padrão.

6

Carvão vegetal com alto teor de C e H, bem como menores níveis de N, S e O, é desejável para ser utilizado como biorredutor siderúrgico, bem como para geração de energia elétrica para comunidades remotas na Amazônia. Com base nos valores de C e H, as espécies *P. suaveolens*, *E. schomburgkii*, *D. excelsa*, *M. elata*, *P. autissimum*, *C. glabrum*, *G. glabra* e *C. villosum* se mostram muito promissoras para as finalidades mencionadas. Além disso, essas espécies também se destacaram com as melhores relações H/C, indicando que podem liberar mais energia durante a queima [45]. Estes elementos são os constituintes combustíveis da biomassa que devem ser priorizados na qualificação e ranqueamento de biocombustíveis, pois influenciam positivamente o PCI [46].

Todas as espécies apresentam carvão vegetal com níveis de S e N insignificantes. Isso significa que o aumento no uso de biomassa residual do manejo florestal sustentável na Amazônia como combustível sólido ou para produção de energia térmica faz com que as emissões de gases sulfurosos e nitrosos diminuam proporcionalmente [47].

Avaliando o carvão vegetal de duas cultivares de *Coffea arabica* (Mundo novo e Catuí) em diferentes sistemas agroflorestais de cultivo (Convencional, orgânico e natural) no Estado de Minas Gerais, Leite et al. [48] reportaram as seguintes variações para os constituintes químicos elementares: 77,44 - 83,45% (C), 2,67 - 3,26% (H), 0,86 - 1,39 (N) e 9,03 - 11,26 (O). Nossos resultados se assemelham aos mencionados, porém, os resíduos estudados se sobressaíram com os melhores conteúdos de H. Valores inferiores aos nossos foram reportados para C (63,37% e 67,01%) por Fuwape [49] ao avaliar a química elementar do carvão vegetal de *Leucaena leucocephala* e *Tectona grandis* aos cinco anos de idade em sistema agroflorestal na Nigéria.

8.3.6 Propriedades energéticas do carvão vegetal dos resíduos

Com relação aos poderes caloríficos superior (PCS) e inferior (PCI), observa-se que as espécies *E. schomburgkii*, *E. pedicellata*, *L. pisonis*, *D. excelsa* e *P. Suaveolens* se destacaram com as melhores médias (Tabela 4). Em contapartida, as piores ranqueadas com base nessas duas características foram *Pouteria* sp. 2, *V. parviflora* e *L. canescens*. A densidade energética unitária foi influenciada pelo fator espécie, em que *D. excelsa* apresentou o melhor valor e se mostrou mais distinta das demais. O rendimento energética (RE) variou de 70,9% (*D. excelsa*) a 53,8% (*C. glabrum*). As sete espécies melhores ranqueadas pelo IDE foram: *D. excelsa* > *E. pedicellata* > *P. suaveolens* > *E.*

schomburgkii > *M. elata* > *G. glabra* > *L. pisonis*. O carvão vegetal (*L. canescens*) de qualidade inferior, tem IDE 19,3 vezes menor que o do carvão vegetal de melhor qualidade energética (*D. excelsa*).

Tabela 4

Classificação energética do carvão vegetal dos resíduos madeireiros de espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil.

Espécie	PCS (MJ Kg ⁻¹)	PCI (MJ Kg ⁻¹)	DE (GJ m ⁻³)	RE (%)	IDE	Ranking
<i>D. excelsa</i>	30,4 ± 0,3	a 29,7 ± 0,3	a 18,4 ± 1,1	a 70,9 ± 0,7	a 3,713	1°
<i>E. pedicellata</i>	30,6 ± 0,3	a 29,9 ± 0,3	a 14,2 ± 1,2	b 63,0 ± 1,0	b 1,931	2°
<i>P. suaveolens</i>	30,2 ± 0,3	a 29,5 ± 0,3	a 15,2 ± 3,0	a 63,6 ± 3,2	b 1,517	3°
<i>E. schomburgkii</i>	30,7 ± 0,4	a 29,9 ± 0,4	a 14,3 ± 0,2	b 56,9 ± 1,0	d 1,440	4°
<i>M. elata</i>	30,0 ± 0,5	a 29,3 ± 0,5	a 16,7 ± 0,5	a 62,8 ± 2,5	b 1,310	5°
<i>G. glabra</i>	30,1 ± 0,1	a 29,3 ± 0,1	a 14,7 ± 0,8	b 59,5 ± 0,3	c 1,179	6°
<i>L. pisonis</i>	30,6 ± 0,4	a 29,9 ± 0,4	a 14,9 ± 0,9	b 59,0 ± 1,5	c 1,077	7°
<i>L. lurida</i>	30,0 ± 0,1	a 29,3 ± 0,1	a 16,9 ± 1,7	a 63,2 ± 3,4	b 871	8°
<i>P. altissimum</i>	30,1 ± 0,4	a 29,3 ± 0,4	a 15,2 ± 0,0	a 59,8 ± 4,8	c 763	9°
<i>C. villosum</i>	30,1 ± 0,2	a 29,3 ± 0,2	a 13,6 ± 1,8	b 56,9 ± 0,8	d 708	10°
<i>P. oblanceolata</i>	29,6 ± 0,8	a 28,9 ± 0,8	a 13,4 ± 1,3	b 59,4 ± 4,3	c 635	11°
<i>C. glabrum</i>	29,7 ± 0,4	a 29,0 ± 0,4	a 12,4 ± 1,0	b 53,8 ± 1,1	d 552	12°
<i>P. rodolphii</i>	29,9 ± 0,2	a 29,2 ± 0,2	a 14,5 ± 1,9	b 56,9 ± 1,4	d 480	13°
<i>C. guianensis</i>	29,8 ± 0,3	a 29,1 ± 0,3	a 12,3 ± 0,3	b 58,8 ± 1,2	c 407	14°
<i>E. grandiflora</i>	29,1 ± 0,5	b 28,4 ± 0,5	b 14,0 ± 0,6	b 60,0 ± 3,5	c 391	15°
<i>C. oblongifolia</i>	30,0 ± 0,1	a 29,3 ± 0,1	a 12,6 ± 1,0	b 58,8 ± 1,0	c 344	16°
<i>Pouteria</i> sp. 1	29,1 ± 1,1	b 28,4 ± 1,1	b 13,1 ± 1,0	b 56,3 ± 1,2	d 332	17°
<i>Pouteria</i> sp. 2	28,7 ± 0,8	b 28,0 ± 0,8	b 13,3 ± 0,8	b 61,3 ± 1,3	b 230	18°
<i>V. parviflora</i>	28,7 ± 0,7	b 28,0 ± 0,7	b 12,7 ± 0,5	b 56,4 ± 2,0	d 217	19°
<i>L. canescens</i>	27,8 ± 1,0	c 27,1 ± 1,0	c 16,4 ± 1,6	a 59,0 ± 1,6	c 193	20°
CVe (%)	1,78	1,81	8,74	3,80	48,4	

CVe = Coeficiente de variação experimental; PCS = Poder calorífico superior; PCI = Poder calorífico inferior; DE = Densidade energética; RE = Rendimento energético da carbonização; e IDE = Índice de desempenho energético do carvão vegetal. As colunas com letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Média ± desvio padrão.

A variação (27,8 MJ kg⁻¹ - 30,7 MJ kg⁻¹) encontrada em nosso estudo para o PCS, está em acordo com a variação destacada (10 MJ kg⁻¹ - 50 MJ kg⁻¹) por Ahmadi e Subawi [50] para biomassas. Os autores destacam ainda relação positiva do conteúdo de carbono elementar e negativa dos níveis de cinzas com o poder calorífico, o que explica as variações de PCS e PCI em nosso estudo, em que as espécies com melhor performance para essas variáveis energéticas também apresentaram maiores níveis de carbono elementar no carvão vegetal. O elevado nível de cinza no carvão vegetal de *L. canescens* promoveu implicações negativas sob PCS e PCI. Baseado nessas variáveis, as espécies mais promissoras para geração de energia são *E. schomburgkii*, *E. pedicellata*, *L. pisonis*

e *D. excelsa*, pois o carvão vegetal dessas espécies liberam mais energia na forma de calor durante a queima.

A espécie *D. excelsa* apresentou indiscutivelmente o melhor resultado para densidade energética, muito em função dos elevados valores de poder calorífico inferior e densidade relativa aparente do carvão vegetal, indicando maior conteúdo energético estocado por unidade de volume [51]. A espécie *L. canescens* apresentou o segundo melhor resultado para densidade energética, que foi majoritariamente explicado pela densidade relativa aparente do carvão vegetal, já que o poder calorífico teve influência negativa do teor de cinzas. O maior rendimento energético obtido para *D. excelsa* é explicado pelos seus elevados valores de PCI da madeira e carvão vegetal. Isso mostra que *D. excelsa* apresenta maior eficiência de conversão energética se comparada as demais. Na carbonização é desejável que a maior parte da energia contida na madeira seja mantida no carvão vegetal, em detrimento dos subprodutos do processo termoquímico.

Portanto, os destaques que o carvão vegetal da madeira residual de *D. excelsa* apresentou para os parâmetros químicos e energéticos avaliados culminaram no melhor valor de IDE, sendo o carvão vegetal de melhor qualidade para produzir energia na Amazônia dentre os estudados, bem como ser utilizado como biorredutor no Pólo Siderúrgico de Carajás.

O IDE encontrado em nosso estudo foi influenciado positivamente pelo teor de extrativos na madeira e carbono fixo no carvão vegetal (Fig. 12). O coeficiente de correlação de Pearson para o índice de desempenho energético do carvão vegetal com extrativos totais (p -valor = 0,0009) e carbono fixo (p -valor = 0,0222) no carvão vegetal foi de 0,68 e 0,51, respectivamente.

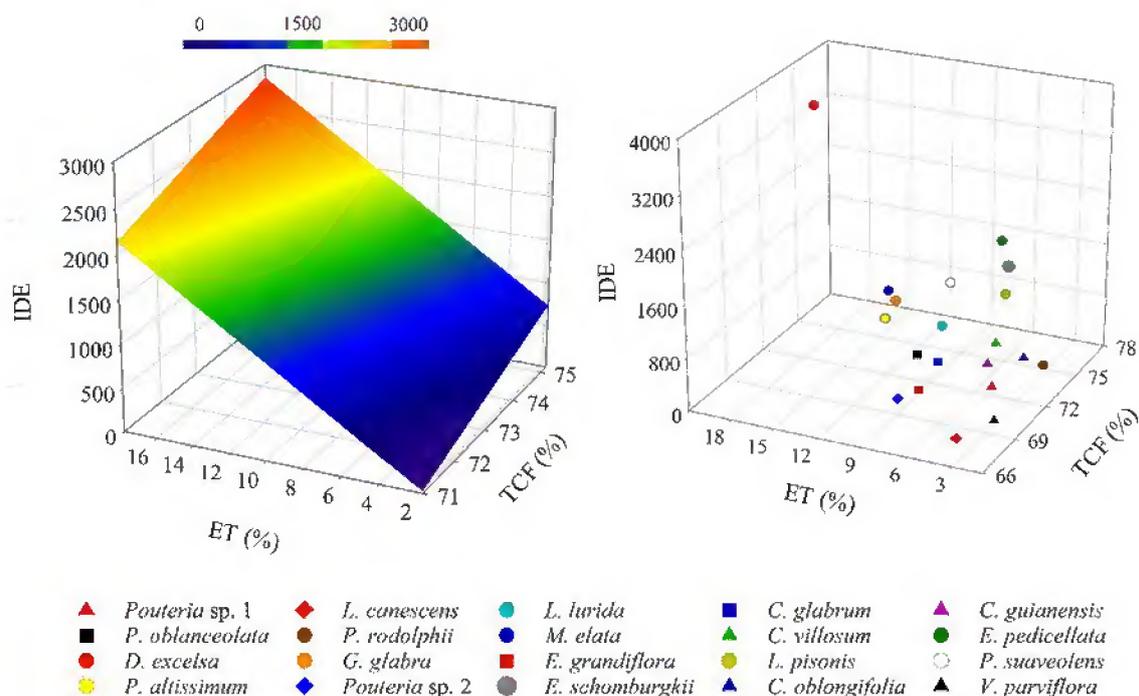


Fig. 12. Relação entre índice de desempenho energético do carvão vegetal (IDE), extrativos totais (ET) e teor de carbono fixo (TCF) verificado para resíduos de exploração do manejo florestal sustentável na Amazônia Legal, Pará, Brasil. Em que, $IDE = -12333,61 + 170,66 \cdot TCF + 132,38 \cdot ET$, $R^2 = 0,61$ ($F_c = 15,77$; p -valor $< 0,0001$).

8.3.7 Equivalências energéticas do carvão vegetal dos resíduos madeireiros com combustíveis fósseis

Houve efeito significativo de espécie sob tep_{ton} de carvão vegetal, tep_m^3 de carvão vegetal, EqVOC1, EqVOC2 e MCO₂. As espécies *E. pedicellata*, *E. schomburgkii*, *L. pisonis* e *D. excelsa* apresentaram as maiores equivalências energéticas para tep_{ton} de carvão vegetal e EqVOC1. Enquanto que para tep_m^3 de carvão vegetal, EqVOC2 e MCO₂, as espécies *D. excelsa*, *M. elata*, *L. lurida* e *L. canescens* se destacaram com os melhores resultados (Tabela 5).

Tabela 5

Equivalência energética do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável com combustíveis fósseis.

Espécie	tep _{ton de carvão vegetal}	tep _{m³ de carvão vegetal}	EqVOC1	EqVOC2	MCO ₂
<i>E. pedicellata</i>	0,71 ± 0,01 a	0,34 ± 0,03 b	0,74 ± 0,01 a	0,35 ± 0,03 b	1416,0 ± 128 b
<i>E. schomburgkii</i>	0,71 ± 0,01 a	0,34 ± 0,01 b	0,74 ± 0,01 a	0,35 ± 0,01 b	1416,5 ± 5 b
<i>L. pisonis</i>	0,71 ± 0,01 a	0,35 ± 0,02 b	0,74 ± 0,01 a	0,37 ± 0,02 b	1459,1 ± 71 b
<i>D. excelsa</i>	0,71 ± 0,01 a	0,44 ± 0,03 a	0,74 ± 0,01 a	0,46 ± 0,03 a	1833,6 ± 100 a
<i>P. suaveolens</i>	0,70 ± 0,01 a	0,36 ± 0,07 a	0,73 ± 0,01 a	0,38 ± 0,08 a	1537,3 ± 287 a
<i>G. glabra</i>	0,70 ± 0,00 a	0,35 ± 0,02 b	0,73 ± 0,00 a	0,37 ± 0,02 b	1462,4 ± 86 b
<i>P. altissimum</i>	0,70 ± 0,01 a	0,36 ± 0,00 a	0,73 ± 0,01 a	0,38 ± 0,00 a	1520,8 ± 70 a
<i>C. villosum</i>	0,70 ± 0,00 a	0,32 ± 0,04 b	0,73 ± 0,00 a	0,34 ± 0,04 b	1332,3 ± 156 b
<i>M. elata</i>	0,70 ± 0,01 a	0,40 ± 0,01 a	0,73 ± 0,01 a	0,42 ± 0,01 a	1677,5 ± 53 a
<i>L. lurida</i>	0,70 ± 0,00 a	0,40 ± 0,04 a	0,73 ± 0,00 a	0,42 ± 0,04 a	1699,4 ± 134 a
<i>C. oblongifolia</i>	0,70 ± 0,00 a	0,30 ± 0,02 b	0,73 ± 0,00 a	0,31 ± 0,03 b	1217,8 ± 116 b
<i>P. rodolphii</i>	0,69 ± 0,00 a	0,35 ± 0,05 b	0,72 ± 0,00 a	0,36 ± 0,05 b	1454,1 ± 212 b
<i>C. guianensis</i>	0,69 ± 0,01 a	0,29 ± 0,01 b	0,72 ± 0,01 a	0,31 ± 0,01 b	1228,5 ± 30 b
<i>C. glabrum</i>	0,69 ± 0,01 a	0,30 ± 0,02 b	0,72 ± 0,01 a	0,31 ± 0,03 b	1254,6 ± 95 b
<i>P. oblanceolata</i>	0,69 ± 0,02 a	0,32 ± 0,03 b	0,72 ± 0,02 a	0,33 ± 0,03 b	1330,8 ± 91 b
<i>Pouteria</i> sp. 1	0,68 ± 0,03 b	0,31 ± 0,02 b	0,70 ± 0,03 b	0,33 ± 0,02 b	1340,2 ± 105 b
<i>E. grandiflora</i>	0,68 ± 0,01 b	0,33 ± 0,02 b	0,70 ± 0,01 b	0,35 ± 0,02 b	1389,2 ± 56 b
<i>V. parviflora</i>	0,67 ± 0,02 b	0,30 ± 0,01 b	0,70 ± 0,02 b	0,31 ± 0,01 b	1264,0 ± 59 b
<i>Pouteria</i> sp. 2	0,67 ± 0,02 b	0,32 ± 0,02 b	0,69 ± 0,02 b	0,33 ± 0,02 b	1345,9 ± 102 b
<i>L. canescens</i>	0,65 ± 0,02 c	0,39 ± 0,04 a	0,67 ± 0,02 c	0,41 ± 0,04 a	1661,6 ± 173 a
CVe (%)	1,81	8,74	1,81	8,74	8,57

CVe = Coeficiente de variação experimental; tep_{ton de carvão vegetal} = tonelada equivalente de petróleo à 1 tonelada de carvão vegetal (tep ton⁻¹); tep_{m³ de carvão vegetal} = tonelada equivalente de petróleo à 1 m³ de carvão vegetal (tep m⁻³); EqVOC1 = Volume de óleo combustível equivalente à 1 tonelada de carvão vegetal (m³ ton⁻¹); EqVOC2 = Volume de óleo combustível equivalente à 1 m³ de carvão vegetal (m³ m⁻³); MCO₂ = Massa de CO₂ retida em 1 m³ de carvão vegetal (Kg m⁻³). As colunas com letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Média ± desvio padrão.

As equivalências energéticas do carvão vegetal dos resíduos estudados são fortemente influenciadas pela densidade energética. Isso explica os resultados apresentados anteriormente e evidencia a necessidade de se priorizar carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal com alta densidade energética para os sistemas de cogeração e alto fornos siderúrgicos.

Entre todas as espécies estudadas, o carvão vegetal de *D. excelsa* apresenta as melhores equivalências energéticas com combustível fóssil. Considerando essa espécie, a utilização de 1 m³ de carvão vegetal, em detrimento de 460 L de óleo combustível ou 0,71 tep, proporcionaria a mitigação da emissão de 1.833 kg de CO₂eq, pois o carvão vegetal de madeira residual é um recurso renovável com emissão neutra em carbono [52]. Adicionalmente, a utilização do carvão vegetal de *L. canescens* pode ter implicações

negativas do ponto de vista econômico oriundo da composição química imediata, mesmo que essa espécie tenha se destacado entre as melhores equivalências (toe_m^3 de carvão vegetal, EqVOC2 e MCO_2).

8.3.8 Agrupamento multivariado das espécies

A análise de componentes principais revelou que duas componentes são suficientes para explicar 72,3% da variância acumulada dos dados. A Tabela 6 discrimina os autovetores das duas primeiras componentes principais. As características do carvão vegetal que mais influenciaram a formação da componente principal 1 foram: CE, RGC, DRA, RCF, DE, RE, IDE, CR, CV, HR e HV. Em contapartida, as variáveis TCz, TCF, C, PCS e PCI tiveram os maiores autovetores e, conseqüentemente, contribuíram mais para a componente principal 2 (Tabela 6).

Tabela 6
Autovetores das duas primeiras componentes principais.

Variável	Componente principal 1	Componente principal 2
Consumo específico de lenha (CE)	0,2323*	-0,0853
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC)	-0,2732*	0,1939
Rendimento em gases não condensáveis (RGNC)	0,1024	-0,2236
Rendimento em líquido pirolenhoso (RLP)	0,1783	0,0273
Densidade relativa aparente (DRA)	-0,2341*	0,2082
Teor de materiais voláteis (TMV)	-0,1517	-0,0025
Teor de cinzas (TCz)	0,1760	0,3588*
Teor de carbono fixo (TCF)	-0,0924	-0,3987*
Rendimento em carbono fixo (RCF)	-0,2954*	0,0054
Carbono (C)	-0,1719	-0,3215*
Nitrogênio (N)	0,0294	-0,0179
Hidrogênio (H)	-0,1373	-0,2347
Poder calorífico superior (PCS)	-0,1387	-0,4014*
Poder calorífico inferior (PCI)	-0,1403	-0,3978*
Densidade energética (DE)	-0,2646*	0,1137
Rendimento energético (RE)	-0,2774*	0,0925
Índice de desempenho energético (IDE)	-0,2727*	-0,1179
Carbono retido (CR)	-0,2782*	0,1445
Carbono volatilizado (CV)	0,2782*	-0,1445
Hidrogênio retido (HR)	-0,2830*	0,0948
Hidrogênio volatilizado (HV)	0,2830*	-0,0948

*Variáveis com contribuição significativa nas principais componentes.

Se analisados os sinais (+ ou -) dos autovetores da componente principal 1, as espécies a serem recomendadas para produção de carvão vegetal devem ter valor elevado para essa componente, pois apresentará os melhores valores para RGC, DRA, RCF, DE, RE, IDE, CR e HR. Em contrapartida, menor valor reportado para a componente principal 2 implicará em carvão vegetal com alto TCF, C, PCS e PCI, bem como baixos níveis de cinzas.

A dispersão das espécies florestais em função dos escores obtidos na análise de componentes principais pode ser observada na Fig. 13. Foram formados 5 grupos distintos de espécies com propriedades de carvão vegetal similares.

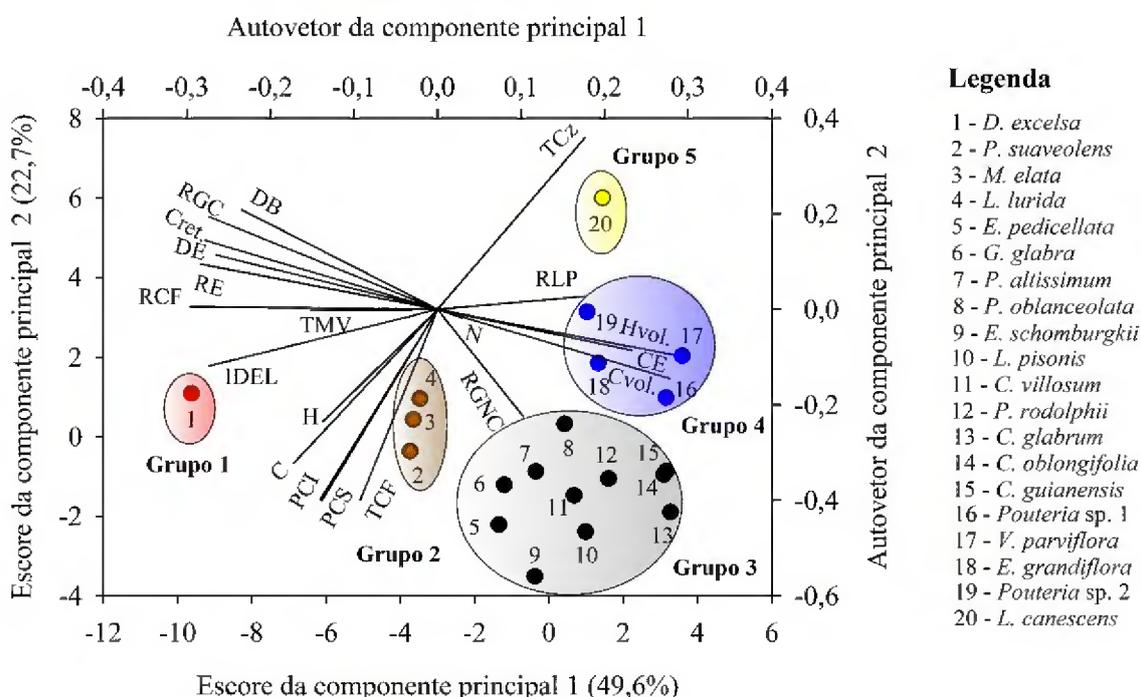


Fig. 13. Agrupamento multivariado de espécies com base nas propriedades do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável no Pará, Brasil.

A Tabela 7 mostra que o grupo 1 (*D. excelsa*) formado pela análise de agrupamento multivariado, apresenta os melhores índices para CE, RGC, RLP, DRA, TCz, TCF, RCF, C, N, PCS, PCI, DE, RE, IDE, CR, CV, HR e HV. Este grupo é o mais promissor para a produção de carvão vegetal e geração de energia, pois apresenta as melhores características de carvão vegetal, bem como de processo. A utilização do carvão vegetal de madeira de *D. excelsa* para finalidade siderúrgica poderá reduzir os custos inerentes a produção de gusa, bem como melhorar a qualidade desse produto.

Os grupos 2 (*P. suaveolens*, *M. elata* e *L. lurida*) e 3 (*E. pedicellata*, *G. glabra*, *P. altissimum*, *P. oblanceolata*, *E. schomburgkii*, *L. pisonis*, *C. villosum*, *P. rodolphii*, *C.*

glabrum, *C. oblongifolia* e *C. guianensis*) também se mostram promissores para a finalidade energética, uma vez que reúnem carvões vegetais com qualidades favoráveis, como $TCF > 72\%$, $DRA \geq 0,47 \text{ g cm}^{-3}$, $TCz < 3\%$, $C > 79\%$, $H \geq 3,5\%$ e $PCS > 30 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Tabela 7). O IDE mostra que os grupos mencionados estão entre os três melhores para bioenergia. Em especial, o grupo 2 apresenta menor média para RGNC e segunda melhor média para CE, RGC, TCz, C, RCF, RE, CR e HR (Tabela 7).

Os grupos 4 (*Pouteria* sp. 1, *V. parviflora*, *E. grandiflora* e *Pouteria* sp. 2) e 5 (*L. canescens*) se mostraram os menos promissores para bioenergia, pois apresentaram os piores índices para CE, TCz, TCF, RCF, C, H, PCS, PCI e IDE (Tabela 7). A utilização de carvão vegetal desses grupos terá implicações negativas na produção de gusa, bem como maior probabilidade de danos aos equipamentos de queima devido aos elevados níveis de cinzas.

1 **Tabela 7**
 2 Médias das variáveis estudadas para cada grupo formado pela análise de componentes principais.

Característica dos resíduos madeireiros	Grupo formado pela análise de componentes principais				
	1	2	3	4	5
Consumo específico de lenha (m ³ de resíduos madeireiros. ton ⁻¹ de carvão)	2,5 ± 0,1	3,1 ± 0,4	3,9 ± 0,7	3,9 ± 0,4	3,1 ± 0,1
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	45,5 ± 0,5	40,3 ± 2,0	36,9 ± 1,5	37,6 ± 1,9	39,5 ± 2,1
Rendimento em gases não condensáveis (%)	16,6 ± 0,4	16,2 ± 1,1	20,3 ± 2,7	18,4 ± 1,4	18,8 ± 0,3
Rendimento em líquido pirolenhoso (%)	37,9 ± 0,5	43,5 ± 2,3	42,9 ± 3,2	44,0 ± 1,5	41,7 ± 1,8
Densidade relativa aparente (g cm ⁻³)	0,6199 ± 0,0	0,5549 ± 0,1	0,4709 ± 0,0	0,4715 ± 0,0	0,6040 ± 0,0
Teor de materiais voláteis (%)	26,4 ± 2,1	26,2 ± 0,9	24,8 ± 1,8	24,8 ± 2,3	23,2 ± 1,7
Teor de cinzas (%)	0,5 ± 0,2	1,5 ± 0,6	2,3 ± 1,2	5,6 ± 2,2	9,6 ± 3,6
Teor de carbono fixo (%)	73,1 ± 2,0	72,3 ± 1,2	73,0 ± 1,9	69,6 ± 2,6	67,2 ± 2,2
Rendimento em carbono fixo (%)	33,2 ± 0,6	29,2 ± 1,4	26,9 ± 1,3	26,2 ± 1,2	26,5 ± 0,6
Carbono (%)	80,7 ± 1,4	80,6 ± 2,2	79,5 ± 1,9	77,2 ± 2,2	74,9 ± 2,4
Nitrogênio (%)	1,3 ± 0,1	1,6 ± 0,3	1,4 ± 0,2	1,4 ± 0,2	1,6 ± 0,2
Hidrogênio(%)	3,5 ± 0,1	3,6 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,4 ± 0,1	3,3 ± 0,2
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	30,4 ± 0,3	30,1 ± 0,3	30,1 ± 0,5	28,9 ± 0,7	27,8 ± 1,0
Poder calorífico inferior (MJ kg ⁻¹)	29,7 ± 0,3	29,4 ± 0,3	29,4 ± 0,5	28,2 ± 0,7	27,1 ± 1,0
Densidade energética (GJ m ⁻³)	18,4 ± 1,1	16,3 ± 1,9	13,8 ± 1,4	13,3 ± 0,8	16,4 ± 1,6
Rendimento energético (%)	70,9 ± 0,7	63,2 ± 2,7	58,4 ± 2,9	58,5 ± 3,0	59,0 ± 1,6
Índice de desempenho energético	3713,0 ± 1194	1232,4 ± 520	865,0 ± 574	292,7 ± 160	193,3 ± 71
Carbono retido (%)	71,0 ± 1,5	63,9 ± 3,8	57,4 ± 2,4	58,2 ± 3,0	59,5 ± 2,1
Carbono volatilizado (%)	29,0 ± 1,5	36,1 ± 3,8	42,6 ± 2,4	41,8 ± 3,0	40,5 ± 2,1
Hidrogênio retido (%)	24,8 ± 0,5	22,5 ± 0,9	20,0 ± 1,2	20,0 ± 1,1	20,8 ± 1,1
Hidrogênio volatilizado (%)	75,2 ± 0,5	77,5 ± 0,9	80,0 ± 1,2	80,0 ± 1,1	79,2 ± 1,1

3

A proposta de segregação de resíduos madeireiros em grupos de espécies pode melhorar a qualidade e rendimento em carvão vegetal em fornos de alvenaria na Amazônia, pois a carbonização dos resíduos madeireiros na região tem sido conduzida sem critérios de segregação. A carbonização desses grupos de espécies também pode reduzir a heterogeneidade das propriedades do carvão vegetal, tornando-o mais adequado a siderúrgica e para geração de energia elétrica. Nos alto fornos siderúrgicos, matéria-prima com propriedades homogêneas permite maior regularidade e eficiência no processo de redução e, conseqüentemente, reduz o consumo específico de carvão vegetal em alto fornos siderúrgicos [16]. Além disso, reflexos positivos do agrupamento de espécies poderão ser observados na qualidade do ferro gusa e na energia gerada em sistemas locais de cogeração.

8. 4 Conclusões

Nosso estudo revelou que existe efeito de espécie nas propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal. Os resultados mostraram que o teor de extrativos na madeira influenciou positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, balanço de massa da carbonização, o poder calorífico e o índice de desempenho energético do carvão vegetal. A densidade relativa aparente, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e em gases não condensáveis, teor de cinzas, rendimento em carbono fixo, densidade energética, rendimento energético e carbono retido foram as variáveis com ampla variação entre as espécies. A análise de componentes principais segregou o carvão vegetal dos resíduos do manejo florestal em 5 grupos. Estes grupos podem ser utilizados na carbonização em fornos de alvenaria na Amazônia visando suprir o Polo Siderúrgico de Carajás e os sistemas de cogeração em comunidades remotas na Amazônia. Finalmente, os resíduos da espécie *D. excelsa* apresentaram as melhores propriedades do carvão vegetal e do processo de carbonização.

Referências

- [1] Bamati N, Raoofi A. Development level and the impact of technological factor on renewable energy production. *Renew Energy* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.098>.

- [2] Jahirul MI, Rasul MG, Chowdhury AA, Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis — a technological review. *Energies* 2012;5:4952–5001. <https://doi.org/10.3390/en5124952>.
- [3] He Z-X, Xu S-C, Li Q-B, Zhao B. Factors that influence renewable energy technological innovation in China: a dynamic panel approach. *Sustainability* 2018;10:124. <https://doi.org/10.3390/su10010124>.
- [4] BEN. Brazilian energy balance 2019: year 2018. Rio de Janeiro: EPE; 2019.
- [5] Russell AE, Kumar BM. Forestry for a low-carbon future: integrating forests and wood products into climate change strategies. *Environ Sci Policy Sustain Dev* 2017;59:16–23. <https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1274580>.
- [6] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. NOTA TÉCNICA PR 04/18: potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050. Rio de Janeiro: MME/EPE; 2018.
- [7] Numazawa CTD, Numazawa S, Pacca S, John VM. 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>.
- [8] Suzuki K, Tsuji N, Shirai Y, Hassan MA, Osaki M. Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass and Bioenergy* 2017;97:149–54. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.023>.
- [9] Brazil. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa MMA no 5 de 11/12/2006. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas. Brazil: 2006.
- [10] Lin J-CM. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. *Fuel Process Technol* 2006;87:487–95. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.07.009>.
- [11] Peláez-Samaniego MR, Garcia-Perez M, Cortez LB, Rosillo-Calle F, Mesa J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12:1063–86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.018>.
- [12] Oliveira AC, Carneiro ACO, Pereira BLC, Vital BR, Carvalho AMML, Trugilho PF, et al. Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures. *Rev Árvore* 2013;37:557–66. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>.

- [13] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira. Rio de Janeiro: MME/EPE; 2018.
- [14] Uhlig A, Goldemberg J, Coelho ST. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. *Rev Bras Energ* 2008;14:67–85.
- [15] Couto AM, Trugilho PF, Napoli A, Lima JT, Silva JRM, Protásio TP. Quality of charcoal from *Corymbia* and *Eucalyptus* produced at different final carbonization temperatures. *Sci For* 2015;43:817–31. <https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.7>.
- [16] Assis MR, Brancheriau L, Napoli A, Trugilho PF. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Sci Technol* 2016;50:519–36. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>.
- [17] Climate-Data.org. Dados climáticos para cidades mundiais [On line]. Oedheim: AM Online Projects; 2017.
- [18] Veloso HP, Rangel Filho ALR, Lima JCA. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE; 1991.
- [19] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: 2003.
- [20] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14853: Madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: 2010.
- [21] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7989: Pasta celulósica e madeira - determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro: 2010.
- [22] Goldschmid O. Ultraviolet spectra. *Lignins Occur. Form. Struct. React.*, New York: Wiley Interscience; 1971, p. 241–66.
- [23] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6923: Carvão vegetal - amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro: 1981.
- [24] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8112: carvão vegetal - análise imediata: método de ensaio. Rio de Janeiro: 1986.
- [25] Cordero T, Marquez F, Rodriguez-Mirasol J, Rodriguez JJ. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* 2001;80:1567–71. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5).
- [26] Bhatt BP, Todaria NP. Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs. *Commonw For Rev* 1992;71:183–5. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(90\)90067-T](https://doi.org/10.1016/0144-4565(90)90067-T).

- [27] BEN. Balanço Energético Nacional. Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE; 2018.
- [28] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. Viena. Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2018. <https://doi.org/10.4236/ojs.2014.49064>.
- [29] Andrade VHF, Machado S do A, Figueiredo Filho A, Botosso PC, Miranda BP, Schongart J. Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. *For Ecol Manage* 2019;438:215–23. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>.
- [30] Moutinho VHP, Tomazello Filho M, Brito JO, Ballarin AW, Andrade FWC. Influence of the wood physical properties on the charcoal physical and mechanical properties. *Sci For* 2016;44:557–61. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.02>.
- [31] Zanuncio AJV, Carvalho AG, Trugilho PF, Monteiro TC. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. *Rev Árvore* 2014;38:369–74. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200018>.
- [32] Moulin JC, Nobre JRC, Castro JP, Trugilho PF, Arantes MDC. Effect of extractives and carbonization temperature on energy characteristics of wood waste in Amazon Rainforest. *Cerne* 2017;23:209–18. <https://doi.org/10.1590/01047760201723022216>.
- [33] Pereira BLC, Carneiro ACO, Carvalho AMML, Colodette JL, Oliveira AC, Fontes MPF. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioResources* 2013;8:4574–92. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4574-4592>.
- [34] Dias Júnior AF, Andrade CR, Protásio TP, Brito JO, Trugilho PF, Oliveira MP, et al. Thermal profile of wood species from the Brazilian Semi-arid region submitted to pyrolysis. *Cerne* 2019;25:44–53. <https://doi.org/10.1590/01047760201925012602>.
- [35] Protásio TP, Trugilho PF, Napoli A, Silva MG, Couto AM. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. *Pesqui Agropecu Bras* 2014;49:189–96. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000300005>.
- [36] Simetti R, Bonduelle GM, Silva DA. Wood quality of five Eucalyptus species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. *J Trop For Sci* 2018;30:175–81. <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.175181>.

- [37] Silva FTM, Ataíde CH. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. *Energy* 2019;172:509–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>.
- [38] Carneiro ACO, Castro AFNM, Castro RVO, Santos RC, Ferreira LP, Damásio RAP, et al. Potential energy of *Eucalyptus* sp. wood according to age and different genetic materials. *Rev Árvore* 2014;38:375–81. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.
- [39] Roy C, Pakdel H, Brouillard D. The role of extractives during vacuum pyrolysis of wood. *J Appl Polym Sci* 1990;41:337–48. <https://doi.org/10.1002/app.1990.070410126>.
- [40] Andrade FWC, Tomazello Filho M, Moutinho VHP. Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. *Floresta e Ambient* 2018;25:e20150176. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017615>.
- [41] Loureiro BA, Vieira TAS, Costa LJ, Silva AB, Assis MR, Trugilho PF. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. *Maderas Cienc y Tecnol* 2019;21:619–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000417>.
- [42] Pereira BLC, Oliveira AC, Carvalho AMML, Carneiro ACO, Santos LC, Vital BR. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. *Int J For Res* 2012;2012:1–8. <https://doi.org/10.1155/2012/523025>.
- [43] Klasnja B, Kopitovic S, Orlovic S. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass and Bioenergy* 2002;23:427–32. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00069-7).
- [44] Hytonen J, Nurmi J. Heating value and ash content of intensively managed stands. *Wood Res* 2015;60:71–82.
- [45] Adamovics A, Platace R, Gulbe I, Ivanovs S. The content of carbon and hydrogen in grass biomass and its influence on heating value. *Eng Rural Dev* 2018;1:1277–81. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N014>.
- [46] Oliveira RS, Silva LFF, Andrade FWC, Trugilho PF, Protásio TP, Goulart SL. Quality of charcoal marketed in southeast Pará for cooking foods. *Rev Ciências Agrárias* 2019;62:1–9. <https://doi.org/10.22491/rca.2019.3017>.
- [47] Mansor AM, Lim JS, Ani FN, Hashim H, Ho WS. Ultimate and proximate analysis of Malaysia pineapple biomass from MD2 cultivar for biofuel application. *Chem Eng Trans* 2018;63:127–32. <https://doi.org/10.3303/CET1863022>.

- [48] Leite ERSi, Protásio TP, Rosado SCS, Trugilho PF, Valle MLA, Siqueira HF. Elemental chemical composition of wood and charcoal from *Coffea arabica* for bioenergy use. *Coffee Sci* 2015;10:537–47. <https://doi.org/10.25186/cs.v10i4.992>.
- [49] Fuwape JA. Charcoal and fuel value of agroforestry tree crops. *Agrofor Syst* 1993;22:175–9. <https://doi.org/10.1007/BF00705232>.
- [50] Ahmad M, Subawi H. New Van Krevelen diagram and its correlation with the heating value of biomass. *Res J Agric Environ Manag* 2013;2:295–301.
- [51] Silva MF, Fortes MM, Sette Junior CR. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. *Floresta e Ambient* 2018;25:e20160350. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>.
- [52] Adrados A, Lopez-Urionabarrenechea A, Acha E, Solar J, Caballero BM, Marco I. Hydrogen rich reducing gases generation in the production of charcoal from woody biomass carbonization. *Energy Convers Manag* 2017;148:352–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.010>.

9 CAPÍTULO 4 – A SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS MADEIREIROS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL MELHORA AS MÉTRICAS DA CARBONIZAÇÃO EM FORNOS DE ALVENARIA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Revista alvo: *Renewable & Sustainable Energy Reviews* (JCR 10,556/Qualis Capes A1)

RESUMO

A segregação dos resíduos do manejo florestal sustentável em grupos com propriedades tecnológicas similares representa um avanço importante em carvoarias na Amazônia, principalmente quando o objetivo é a redução da heterogeneidade da matéria prima enforcada e a otimização da produção de carvão vegetal com características adequadas ao uso siderúrgico. Este estudo focou na carbonização de resíduos do manejo florestal baseando-se na segregação em grupos com propriedades tecnológicas similares. Os resíduos foram separados em 4 grupos, em que foram ao longo da pesquisa comparados com o modelo convencional de carbonização na Amazônia. Foram analisadas as propriedades físicas (umidade, densidades básica e aparente e máximo teor de umidade) dos resíduos de vinte e três espécies manejadas sob regime de Exploração de Impacto Reduzido. Com base nessas propriedades foram calculados os valores de massa seca de madeira enforcada, densidades básica e aparente ponderadas, umidade na base úmida

ponderada. Além disso o estudo apresenta informações de produtividade por fono com madeira segregada e não segregada. A pesquisa revelou que a segregação dos resíduos madeireiros do manejo florestal afetou positivamente o conteúdo de matéria prima enfornada, produtividade dos fornos de alvenaria e rendimentos da carbonização, o que é importante visando elevar a produção e as receitas das carvoarias na Amazônia, além de melhorar a visibilidade da atividade na região. Foi verificado que o agrupamento dos resíduos melhorou as métricas de conversão de lenha em carvão vegetal, mostrando menor consumo de lenha para uma mesma quantidade de carvão vegetal produzido da forma convencional.

Palavras-chave: Energias renováveis, biomassa residual, fornos rabo quente, carvão siderúrgico

9.1 Introdução

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo [1,2]. No ano de 2018, cerca de 98,5% (5,64 milhões de toneladas) da produção total do país foi destinada ao consumo final energético [3], majoritariamente estimulado pelas indústrias de ferro-gusa e aço, que foram responsáveis por consumir cerca de 72,5% da produção nacional. O carvão vegetal também é utilizado para outros fins, tais como: cocção de alimentos, lareiras, termoelétricas, indústria cimenteira, purificação de água e bebidas, indústria farmacêutica, filtros de máscaras contra gases, dentre outros [4].

Os polos siderúrgicos brasileiros são os únicos no mundo que empregam o carvão vegetal no processo de termorredução do minério de ferro nos altos fornos [2,5]. Nesse processo, o carvão vegetal é responsável pelo fornecimento de energia na forma de calor, recomposição do poder redutor do dióxido de carbono, sustentação da carga do minério de ferro e a percolação gasosa pelo leito [6]. A utilização de carvão vegetal como biorredutor siderúrgico melhora a qualidade do ferro-gusa e do aço produzido devido não apresentar enxofre em sua composição química e baixo teor de cinzas, o que o torna menos poluente que o carvão mineral [7,8].

Os polos siderúrgicos de Minas Gerais e o da região do Carajás são os mais importantes situados no território brasileiro [9], juntos somaram no ano de 2018 cerca de 87% da produção nacional de ferro-gusa. O polo siderúrgico de Carajás na Amazônia Legal, localizado entre os estados do Pará e Maranhão é o segundo maior do Brasil, responsável por 9,8% da produção de ferro-gusa nacional em 2018 [10].

No Brasil, a demanda por carvão vegetal tem sido suprida principalmente pelos reflorestamentos e resíduos madeireiros (galhos, restos de troncos e sapopemas) dos planos de manejo florestal sustentável certificados na Amazônia [11]. Os plantios de espécies do gênero *Eucalyptus* são incipientes no Estado do Pará, cerca de 137.866 hectares ou 2,4% da área total plantada dessas espécies no Brasil [12]. Dada a insuficiência de madeira oriunda de reflorestamento, destaca-se que a utilização dos resíduos do manejo florestal certificado para produção de carvão vegetal é promissora e prevista na Instrução Normativa Nº 5, de 11 de dezembro de 2006, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente [13]. Em planos de manejo na Amazônia, estima-se a geração de 2,13 toneladas de resíduos para cada tonelada de madeira comercial extraída de forma sustentável [14]. Portanto, há disponibilidade de madeira residual para o suprimento de carvoarias na região.

A produção de carvão vegetal de resíduos do manejo florestal é majoritariamente realizada em fornos rudimentares de alvenaria do tipo rabo quente [15], que é um modelo convencional de carbonização com baixa eficiência de conversão responsável por cerca de 70% do carvão produzido no Brasil, aderido principalmente pelo baixo custo de implantação, operação e manutenção [7,16–18]. A carbonização nesses fornos é conduzida com base na coloração e quantidade de fumaça e na temperatura da parede do forno percebida pelo tato [19,20]. Como consequência, baixo rendimento gravimétrico (entre 15% e 25%) e qualidade do carvão [21,22], alta quantidade de atíço produzido, maior tempo de resfriamento do forno e elevado teor de gases poluentes [20,23].

A heterogeneidade dos resíduos do manejo dificulta o seu uso como fonte de energia, especialmente para produção de carvão vegetal [24–26]. Entende-se que a segregação dessa biomassa residual em grupos com propriedades tecnológicas similares pode ser um critério importante em carvoarias na Amazônia objetivando a redução da heterogeneidade da matéria prima enforada e da produção de carvão vegetal com características adequadas ao uso siderúrgico. Contudo, há escassez de trabalhos na literatura relacionados as propriedades tecnológicas dos resíduos, critérios de segregação dos toretes e índices de carbonização de resíduos em fornos de alvenaria. Este estudo focou na segregação dos resíduos por meio de técnica multivariada, para identificação dos grupos com as propriedades similares e apresentação dos resíduos do manejo como fonte promissora para carvoarias na Amazônia.

Portanto, a questão científica que norteou a pesquisa foi: (i) Quais as implicações da segregação dos resíduos do manejo florestal sob a massa de resíduos madeireiros do manejo florestal enforados, produtividade dos fornos de alvenaria e rendimentos da

carbonização? Acreditamos que a segregação dos resíduos do manejo florestal influencia positivamente a massa de madeira enforcada, produtividade dos fornos e rendimentos da carbonização. Este artigo tem como objetivo analisar comparativamente os processos de carbonização de resíduos segregados e não segregados (carbonização convencional) em fornos de alvenaria na Amazônia Brasileira.

9.2 Material e métodos

9.2.1 Área de estudo

O presente estudo foi realizado em uma planta de produção de carvão vegetal localizadas na Fazenda Rio Capim ($3^{\circ} 39' 13,40''$ S e $48^{\circ} 50' 16,90''$ O), em Paragominas, Pará (Fig. 1). Esta planta divide-se em duas unidades de produção de carvão vegetal (UPC1 e UPC2), e pertence a empresa florestal Cikel (Comércio e Industrias KEILA) e opera sob licença fornecida pela Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS – PA).

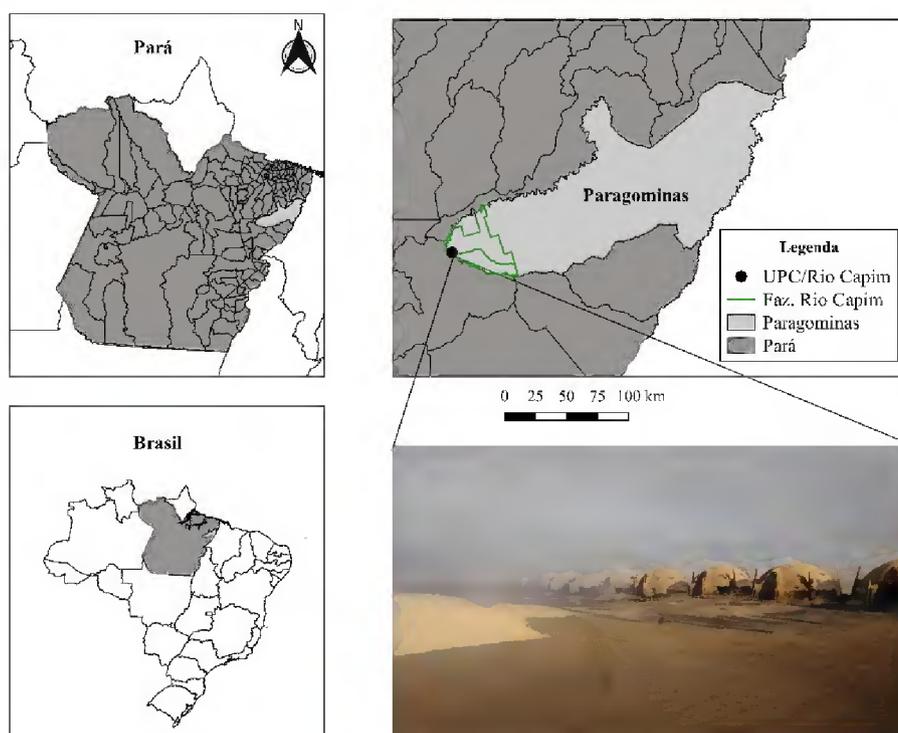


Fig. 1. Localização das Unidades de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

Os resíduos madeireiros a serem carbonizados nessa planta são provenientes do manejo florestal sustentável praticado na Fazenda Rio Capim. Estes resíduos são removidos da floresta após um ano da exploração. Nessa Fazenda, cada unidade de

produção de carvão vegetal dispõe de 300 fornos de alvenaria do tipo rabo quente, totalizando 600 fornos. Para o estudo, foram utilizados 10 fornos de cada UPC, totalizando 20. O carvão vegetal produzido pelas UPC's é comercializado para fins siderúrgicos no Estado do Pará com as empresas SINOBRAS (Siderúrgica Norte Brasil S.A) e Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda, localizadas nas cidades de Marabá e Breu Branco, respectivamente. Estas empresas fazem parte do polo siderúrgico de Carajás.

9.2.2 Segregação dos resíduos do manejo

Os resíduos do manejo foram segregados com auxílio da análise de componentes principais em 4 grupos com base nas propriedades físicas (densidade básica, umidade e máximo teor de umidade), químicas (imediate: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas; e molecular: extrativos totais, lignina solúvel, lignina insolúvel e lignina total), energéticas (poder calorífico superior e densidade energética) e o consumo específico de lenha. Os grupos formados pela análise dos escores das três componentes principais estão dispostos na Fig. 2. Vale ressaltar que as três componentes explicam 77,67% da variabilidade acumulada dos dados.

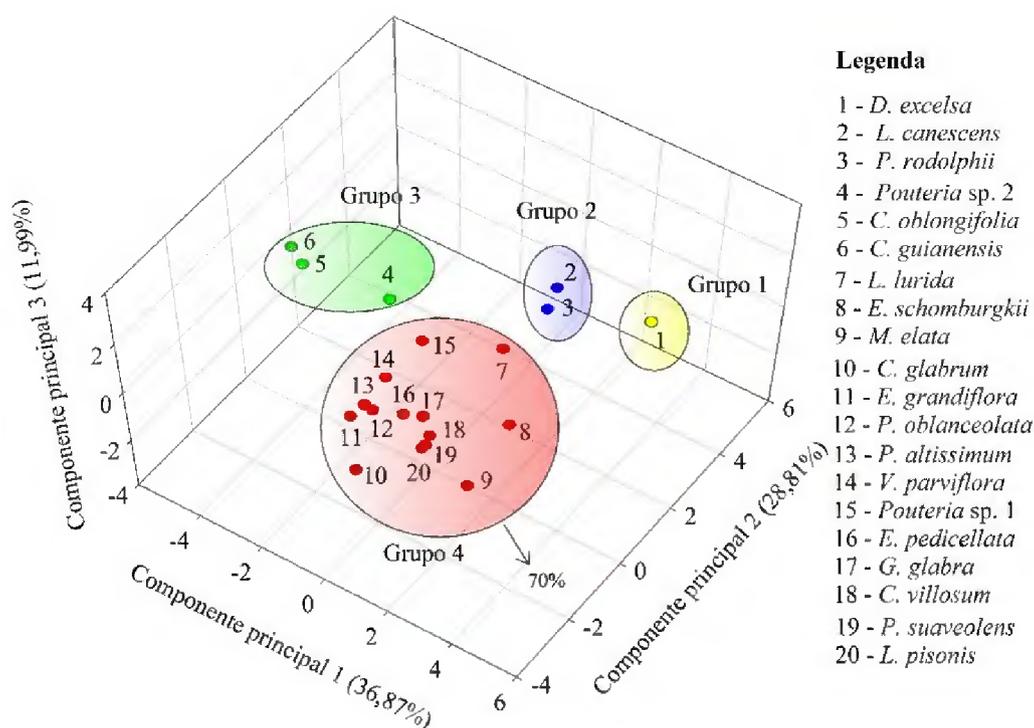


Fig. 2. Agrupamento de espécies florestais baseado na análise de componentes principais para carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

Os grupos de espécies foram considerados como critério de segregação de resíduos nas unidades de produção de carvão vegetal. Inicialmente, as espécies foram identificadas e sinalizadas com fitas nos pátios de estocagens de resíduos das UPC's 1 e 2 por um identificador botânico (Fig. 3A) e separadas por grupos em pilhas por uma carregadeira (Volvo L90 F) (Fig. 3B). Algumas espécies não foram encontradas nos pátios, nesses casos foram substituídas por espécies do mesmo gênero ou com propriedades tecnológicas similares. Em ordem, os resíduos foram traçados por uma escavadeira florestal (CAT 320D FM Sotreq) com garra traçadora acoplada visando à obtenção de toretes com dimensões menores (Fig. 3C), facilitando o trabalho dos colaboradores responsáveis pelo enchimento dos fornos. Posteriormente, os toretes foram pesados na balança comercial da fazenda para o controle da massa úmida real de resíduos enfiados com auxílio de uma caçamba basculante (Iveco, modelo Tector 260E28) (Fig. 3D).

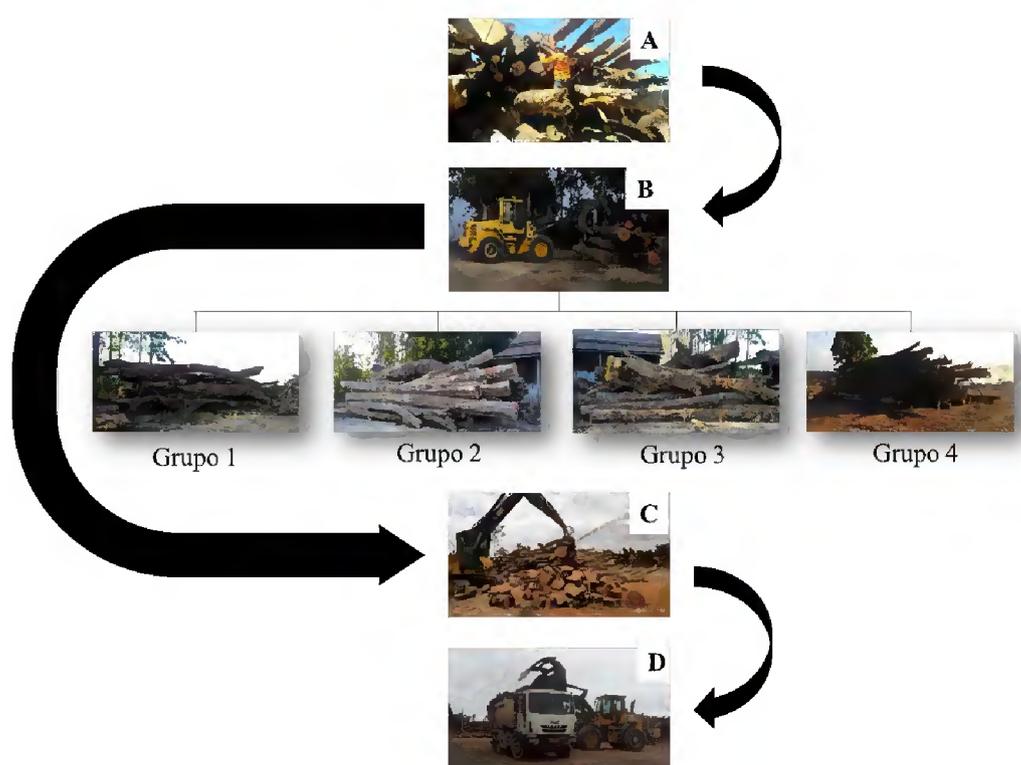


Fig. 3. Metodologia de campo: identificação e sinalização das espécies nas pilhas de resíduos (A), segregação dos resíduos por grupos em novas pilhas (b), traçamento das peças de resíduos em toretes de menores dimensões (C) e carregamento dos toretes para pesagem da massa úmida real em balança comercial (D).

9.2.3 Amostragem e identificação das espécies

Durante o traçamento dos resíduos foi feita a amostragem das madeiras visando subsidiar as análises das propriedades físicas e identificação das espécies. Foram retirados

três discos de madeira das vinte e três espécies florestais. De cada disco foram confeccionados corpos de prova de dimensões 4 cm x 4 cm x 4 cm. Estes corpos de prova foram encaminhados a Xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém, Pará, para a identificação das espécies. Com base no laudo emitido pela Embrapa, as espécies separadas para carbonização estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1

Espécies amostradas para carbonização nos fornos de alvenaria da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

N	Familia	Nome científico	Nome comum
1	Anacardiaceae	<i>Anacardium giganteum</i> W.Hancock ex Engl.	Cajuaçu
2	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu-barrote
3		<i>Protium</i> sp.	Breu-amesclim
4	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana
5		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá
6	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca
7		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau
8	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba
9	Humiriaceae	<i>Vantanea guianensis</i> Aubl.	Uxirana
10	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp. 1	Louro-amarelo
11		<i>Ocotea</i> sp. 2	Louro-preto
12	Lecythidaceae	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco
13		<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	Matamatá-branco
14		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia
15		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana
16	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho
17		<i>Parkia gigantocarpa</i> Ducke	Fava-atanã
18		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana
19		<i>Vatairea sericea</i> (Ducke) Ducke	Angelim-amargoso
20		<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba
21	Sapotaceae	<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana
22		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha
23	Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	Marupá

9.2.4 Propriedades físicas da madeira

Os corpos de prova amostrados na planta produtora de carvão vegetal foram utilizados para as determinações das seguintes propriedades físicas: umidade, densidade aparente e densidade básica da madeira. A umidade das madeiras foi determinada de acordo com ABNT NBR 14929 [27]. A densidade aparente dos corpos de prova foi feita pelo método estereométrico, em que o volume foi determinado pelas medições dos corpos

de prova com paquímetro digital e a massa úmida em balança analítica com capela. A densidade básica desses corpos de prova foi determinada seguindo as diretrizes da NBR 11941 [28].

As espécies foram classificadas em classes de densidade (Muito baixa: 0,200 – 0,300 g cm⁻³; Baixa: 0,300 – 0,500 g cm⁻³; Média: 0,500 – 0,750 g cm⁻³; Alta: 0,750 – 1,000 g cm⁻³; e Muito alta > 1,000 g cm⁻³) de acordo com Csanády et al. [29]. O máximo teor de umidade das madeiras residuais também foi determinado, usando a Equação 1 proposta por Simpson e Tenwolde [30].

$$MTU = \left(\frac{1,54 - DB}{1,54 \times DB} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em que, MTU: Máximo teor de umidade (% base massa seca); 1,54: densidade real da madeira (g cm⁻³); e DB: Densidade básica da madeira (g cm⁻³).

9.2.5 Cubagem rigorosa dos resíduos

Os resíduos foram cubados pelo método de Smalian [31] para a determinação do volume real de madeira sólida enfiada. A Eq. (2) foi utilizada para o cálculo do volume de madeira.

$$V_{\text{torete}} = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{DE1^2 + DE2^2}{2} \right) \times L \quad (2)$$

Em que, V_{torete}: Volume do torete (m³); DE1 e DE2: Diâmetros das extremidades 1 e 2 do torete (m); e L: Comprimento do torete (m).

A cubagem rigorosa foi realizada próximo aos fornos de carbonização (Fig. 4A), concomitantemente ao enchimento dos fornos de alvenaria (Fig. 4B), assim foi reduzida a interferência na produtividade diária dos funcionários da empresa. Os fornos foram fechados após o enchimento (Fig. 4C) e, os toretes que sobraram junto aos restos de cascas e serragens foram novamente pesados para serem descontados da massa úmida enfiada (Fig. 4D).



Fig. 4. Cubagem rigorosa dos toretes (A), enchimento dos fornos (B), fechamento dos fornos (C) e junção dos toretes e restos de cascas e serragens para pesagem (D).

9.2.6 Métricas de resíduos por fornos de alvenaria

As propriedades físicas descritas anteriormente para os corpos de prova foram importantes para os cálculos ponderados de densidade aparente (Eqs. (3) e (4)), densidade básica (Eq. (5)), umidade na base úmida (Eq. (6)) e na base seca (Eq. (7)). Também foram estimadas a massa úmida (Eq. (8)) seca (Eq. (9)) de madeira enformada por forno de alvenaria.

$$DA1 = \frac{V_{E1} DA_{E1} + V_{E2} DA_{E2} + \dots + V_{En} DA_{En}}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (3)$$

Em que, DA1: Densidade aparente ponderada de madeira do forno (ton m^{-3}); V_{E1} : Volume da espécie 1 no forno (m^3); DA_{E1} : Densidade aparente da espécie 1 (ton m^{-3}); $\sum_{i=1}^n V_i$: Volume de madeira enformada (m^3).

$$DA2 = \frac{MUMR}{VME} \quad (4)$$

Em que, DA2: Densidade aparente de madeira do forno (ton m^{-3}); MURM: Massa úmida real de madeira enformada (ton); VME: Volume de madeira enformada (m^3).

$$DBp = \frac{V_{E1} DB_{E1} + V_{E2} DB_{E2} + \dots + V_{En} DB_{En}}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (5)$$

Em que, DBp: Densidade básica ponderada de madeira do forno (ton m^{-3}); V_{E1} : Volume da espécie 1 no forno (m^3); DA_{E1} : Densidade básica da espécie 1 (ton m^{-3}); $\sum_{i=1}^n V_i$: volume de madeira enformada (m^3).

$$U_{\text{bup}} = \frac{V_{E1} U_{\text{bu}E1} + V_{E2} U_{\text{bu}E2} + \dots + V_{En} U_{\text{bu}En}}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (6)$$

Em que, U_{bup} : Umidade ponderada da madeira enformada na base úmida (%); V_{E1} : Volume da espécie 1 no forno (m^3); $U_{\text{bu}E1}$: Umidade na base úmida da espécie 1 (%); $\sum_{i=1}^n V_i$: volume de madeira enformada (m^3).

$$U_{\text{bsp}} = \frac{V_{E1} U_{\text{bs}E1} + V_{E2} U_{\text{bs}E2} + \dots + V_{En} U_{\text{bs}En}}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (7)$$

Em que, U_{bsp} : Umidade ponderada da madeira enformada na base seca (%); V_{E1} : Volume da espécie 1 no forno (m^3); $U_{\text{bs}E1}$: Umidade na base seca da espécie 1 (%); $\sum_{i=1}^n V_i$: volume de madeira enformada (m^3).

$$\text{MUEME} = \text{DAP} \times \text{VME} \quad (8)$$

Em que, MUEME: Massa úmida estimada de madeira enformada (ton); DAP: Densidade aparente ponderada de madeira do forno; VME: Volume de madeira enformada (m^3).

$$\text{MSEME} = \frac{\text{MURME}}{1 + \left(\frac{U_{\text{bsp}}}{100}\right)} \quad (9)$$

Em que, MSEME: Massa seca estimada de madeira enformada (ton); MURME: Massa úmida real de madeira enformada (ton); U_{bsp} : Umidade ponderada na base seca (%).

9.2.7 Esquema de carbonização

A Fig. 5 mostra a divisão dos grupos de resíduos (baseado na análise de componentes principais) com as espécies similares incluídas no estudo (*A. giganteum*, *Ocotea* sp. 1, *Ocotea* sp. 2, *V. sericea*, *E. coriacea*, *P. gigantocarpa*, *Protium* sp., *S. Amara* e *V. guianensis*).

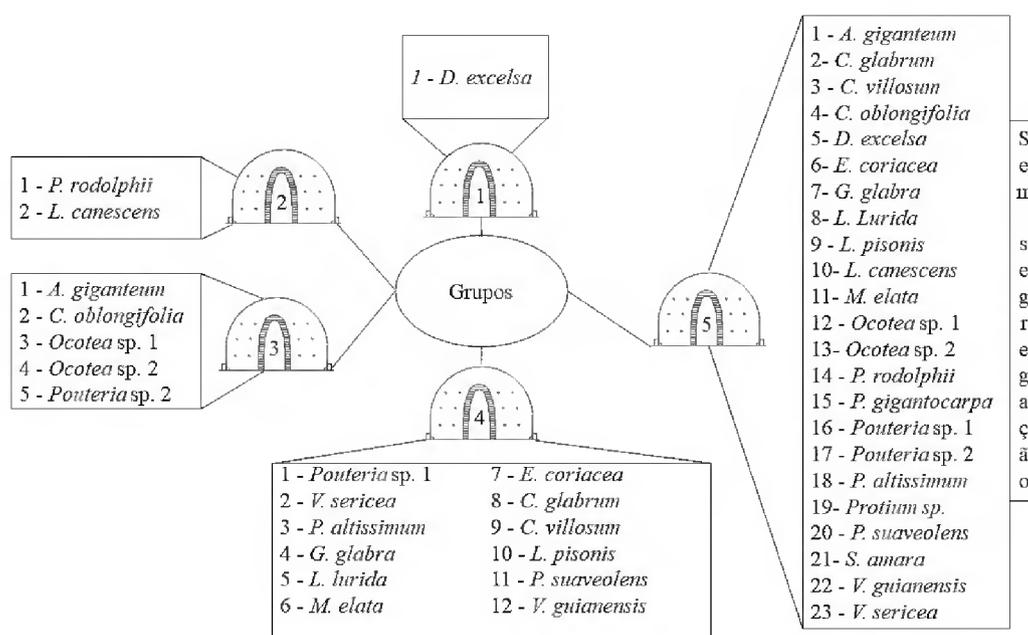


Fig. 5. Grupos de espécies para carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

O experimento foi conduzido em fornos de alvenaria do tipo rabo quente com 6 baianas na parte superior e 6 tatus na base do forno, em média. Além disso, cada forno apresentava uma chaminé para emissão dos gases. Com relação as dimensões, os fornos foram padronizados com diâmetro da base de 3,20 m e altura de 2,5 m. As composições de espécies por forno utilizado na carbonização dos resíduos segregados são descritas na Tabela 2.

Tabela 2

Composição dos fornos de alvenaria por grupos de resíduos segregados para carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

Grupo	Forno	Espécie	Nº de toretes	Dmédio (m)	Lmédio (m)	VRE (m³)	VT (m³)	P (%)
1	1	<i>D. excelsa</i>	188	0,4495	0,3103	8,9514	8,9514	100,0
1	2	<i>D. excelsa</i>	195	0,4399	0,3050	8,4699	8,4699	100,0
1	3	<i>D. excelsa</i>	204	0,3541	0,5223	9,1074	9,1074	100,0
1	4	<i>D. excelsa</i>	157	0,4494	0,4203	8,5654	8,5654	100,0
2	1	<i>L. canescens</i>	54	0,3287	0,4270	2,0107		22,2
2	1	<i>P. rodolphii</i>	157	0,3989	0,3697	7,0552	9,0659	77,8
2	2	<i>L. canescens</i>	224	0,3122	0,4356	7,5714		86,0
2	2	<i>P. rodolphii</i>	25	0,4040	0,4246	1,2377	8,8090	14,0
2	3	<i>L. canescens</i>	184	0,2728	0,5357	5,8294	9,7114	60,0
2	3	<i>P. rodolphii</i>	99	0,3148	0,5697	3,8820		40,0
2	4	<i>L. canescens</i>	98	0,3570	0,4191	3,5036		41,3
2	4	<i>P. rodolphii</i>	114	0,3708	0,4008	4,9760	8,4797	58,7
3	1	<i>A. giganteum</i>	51	0,6343	0,2041	3,5701		36,3
3	1	<i>Pouteria</i> sp. 2	64	0,3765	0,2456	1,8740		19,1
3	1	<i>Ocotea</i> sp. 1	3	0,3692	0,4767	0,1444	9,8222	1,5
3	1	<i>Ocotea</i> sp. 2	22	0,3724	0,4337	0,9802		10,0
3	1	<i>C. oblongifolia</i>	62	0,4407	0,3357	3,2534		33,1
3	2	<i>A. giganteum</i>	19	0,6066	0,3322	1,7581		18,7
3	2	<i>Pouteria</i> sp. 2	65	0,4023	0,2928	2,2702		24,1
3	2	<i>Ocotea</i> sp. 1	9	0,3245	0,5784	0,3742	9,4234	4,0
3	2	<i>Ocotea</i> sp. 2	24	0,3098	0,5521	0,9076		9,6
3	2	<i>C. oblongifolia</i>	80	0,4638	0,3222	4,1134		43,7
3	3	<i>A. giganteum</i>	9	0,5581	0,2556	0,5429		5,8
3	3	<i>Pouteria</i> sp. 2	46	0,3519	0,3011	1,3611	9,4380	14,4
3	3	<i>Ocotea</i> sp. 2	38	0,2653	0,5338	1,2037		12,8
3	3	<i>C. oblongifolia</i>	119	0,4668	0,2968	6,3304		67,1
3	4	<i>A. giganteum</i>	12	0,5903	0,3121	0,9815		10,5
3	4	<i>Pouteria</i> sp. 2	38	0,3124	0,5379	1,5265	9,3287	16,4
3	4	<i>Ocotea</i> sp. 2	26	0,2852	0,5454	1,0221		11,0
3	4	<i>C. oblongifolia</i>	92	0,5019	0,3242	5,7987		62,2
4	1	<i>Pouteria</i> sp. 1	38	0,3534	0,4238	1,4522		16,2
4	1	<i>V. sericeae</i>	21	0,3692	0,4164	0,9830		10,9
4	1	<i>P. altissimim</i>	10	0,3176	0,4670	0,3686		4,1
4	1	<i>G. glabra</i>	20	0,4339	0,2981	0,7674	8,9872	8,5
4	1	<i>L. lurida</i>	25	0,4586	0,2949	1,2408		13,8
4	1	<i>M. elata</i>	26	0,3206	0,5187	1,0863		12,1
4	1	<i>E. coriacea</i>	12	0,3520	0,4535	0,4388		4,9
4	1	<i>C. villosum</i>	12	0,7023	0,3106	1,5049		16,7

Tabela 2
Continuação...

4	1	<i>L. pisonis</i>	4	0,2681	0,5163	0,0840	0,9
4	1	<i>P. suaveolens</i>	12	0,3763	0,3754	0,4207	4,7
4	1	<i>V. guianensis</i>	8	0,5338	0,3428	0,6405	7,1
4	2	<i>Pouteria</i> sp. 1	26	0,3009	0,4565	0,7979	9,1
4	2	<i>V. sericeae</i>	2	0,3144	0,6000	0,0944	1,1
4	2	<i>P. altissimim</i>	14	0,3251	0,4930	0,6037	6,9
4	2	<i>G. glabra</i>	32	0,3948	0,3649	1,2564	14,3
4	2	<i>L. lurida</i>	20	0,3786	0,3845	0,8621	9,8
4	2	<i>M. elata</i>	13	0,3449	0,4675	0,5413	6,1
4	2	<i>E. coriacea</i>	49	0,2789	0,5200	1,4296	16,2
4	2	<i>C. glabrum</i>	7	0,6381	0,2827	0,6871	7,8
4	2	<i>C. villosum</i>	13	0,5359	0,2187	0,6211	7,1
4	2	<i>L. pisonis</i>	9	0,1920	0,8383	0,2083	2,4
4	2	<i>P. suaveolens</i>	10	0,3536	0,4473	0,3341	3,8
4	2	<i>V. guianensis</i>	24	0,4180	0,4358	1,3666	15,5
4	3	<i>Pouteria</i> sp. 1	38	0,3108	0,5329	1,5358	16,9
4	3	<i>V. sericeae</i>	2	0,5138	0,4900	0,2048	2,3
4	3	<i>P. altissimim</i>	17	0,3402	0,5178	0,8042	8,8
4	3	<i>G. glabra</i>	16	0,4934	0,3797	0,9928	10,9
4	3	<i>L. lurida</i>	33	0,3893	0,4280	1,7577	19,3
4	3	<i>M. elata</i>	1	0,1925	0,8800	0,0256	0,3
4	3	<i>E. coriacea</i>	31	0,3155	0,5011	1,1114	12,2
4	3	<i>C. glabrum</i>	24	0,6260	0,2716	1,8568	20,4
4	3	<i>L. pisonis</i>	4	0,3870	0,1875	0,0878	1,0
4	3	<i>P. suaveolens</i>	9	0,4919	0,3520	0,5068	5,6
4	3	<i>V. guianensis</i>	4	0,3676	0,4429	0,2165	2,4
4	4	<i>Pouteria</i> sp. 1	31	0,3256	0,4702	1,1799	13,5
4	4	<i>V. sericeae</i>	16	0,4258	0,4377	0,9235	10,6
4	4	<i>P. altissimim</i>	10	0,1109	0,5250	0,0630	0,7
4	4	<i>G. glabra</i>	24	0,4328	0,3966	1,2507	14,3
4	4	<i>L. lurida</i>	33	0,3002	0,4727	1,3023	14,9
4	4	<i>M. elata</i>	31	0,3188	0,4943	1,1744	13,5
4	4	<i>E. coriacea</i>	3	0,2246	0,5283	0,0612	0,7
4	4	<i>C. glabrum</i>	16	0,5879	0,2709	1,0491	12,0
4	4	<i>P. suaveolens</i>	7	0,5659	0,3589	0,4859	5,6
4	4	<i>V. guianensis</i>	27	0,3525	0,4783	1,2353	14,2
5	1	<i>Pouteria</i> sp. 1	14	0,2291	0,5714	0,3269	3,7
5	1	<i>V. sericeae</i>	3	0,3175	0,3567	0,0767	0,9
5	1	<i>D. excelsa</i>	1	0,3350	0,5200	0,0460	0,5
5	1	<i>P. altissimim</i>	4	0,2594	0,6638	0,1356	1,5
5	1	<i>Protium</i> sp.	4	0,7125	0,2588	0,3584	4,0
5	1	<i>A. giganteum</i>	25	0,5208	0,3038	1,5809	17,7
5	1	<i>L. canescens</i>	33	0,3031	0,4480	1,0800	12,1
5	1	<i>P. rodolphii</i>	1	0,4775	0,2400	0,0430	0,5
5	1	<i>G. glabra</i>	6	0,5050	0,4268	0,4313	4,8
5	1	<i>P. gigantocarpa</i>	14	0,4075	0,3519	0,6479	7,3
5	1	<i>Pouteria</i> sp. 2	12	0,3039	0,4404	0,3384	3,8
5	1	<i>L. lurida</i>	1	0,1225	0,5000	0,0059	0,1
5	1	<i>M. elata</i>	22	0,3258	0,4982	0,8633	9,7
5	1	<i>S. amara</i>	5	0,4813	0,3160	0,2843	3,2
5	1	<i>E. coriacea</i>	15	0,2877	0,5210	0,5479	6,1
5	1	<i>C. glabrum</i>	8	0,7158	0,2747	0,8260	9,3
5	1	<i>C. villosum</i>	1	0,7600	0,1550	0,0703	0,8
5	1	<i>L. pisonis</i>	1	0,4475	0,4200	0,0661	0,7

Tabela 2
Continuação...

5	1	<i>C. oblongifolia</i>	12	0,5113	0,3340	0,8384	9,4	
5	1	<i>V. guianensis</i>	9	0,3875	0,3156	0,3523	3,9	
5	2	<i>Pouteria</i> sp. 1	5	0,3410	0,5690	0,2640	2,8	
5	2	<i>V. sericeae</i>	2	0,6313	0,3188	0,1637	1,7	
5	2	<i>D. excelsa</i>	1	0,5613	0,2700	0,0670	0,7	
5	2	<i>P. altissimim</i>	2	0,4069	0,4675	0,1196	1,2	
5	2	<i>Protium</i> sp.	7	0,4088	0,3314	0,2440	2,5	
5	2	<i>A. giganteum</i>	6	0,6179	0,4188	0,6304	6,6	
5	2	<i>L. canescens</i>	34	0,2968	0,4365	1,0251	10,7	
5	2	<i>G. glabra</i>	5	0,4575	0,3720	0,2140	2,2	
5	2	<i>P. gigantocarpa</i>	20	0,4354	0,3035	0,9227	9,6	
5	2	<i>Pouteria</i> sp. 2	4	0,4692	0,3900	0,2432	2,5	
5	2	<i>L. lurida</i>	20	0,3729	0,4192	0,9058	9,5794	9,5
5	2	<i>Ocotea</i> sp. 1	2	0,2763	0,5075	0,0705	0,7	
5	2	<i>Ocotea</i> sp. 2	1	0,2200	0,3900	0,0149	0,2	
5	2	<i>M. elata</i>	15	0,2878	0,5762	0,5342	5,6	
5	2	<i>S. amara</i>	19	0,4890	0,2046	0,8765	9,1	
5	2	<i>E. coriacea</i>	24	0,2384	0,5223	0,6244	6,5	
5	2	<i>C. glabrum</i>	9	0,6364	0,2589	0,7997	8,3	
5	2	<i>C. villosum</i>	3	0,6367	0,2200	0,2100	2,2	
5	2	<i>L. pisonis</i>	3	0,5929	0,3908	0,2896	3,0	
5	2	<i>C. oblongifolia</i>	17	0,5389	0,2834	1,0964	11,4	
5	2	<i>V. guianensis</i>	8	0,3083	0,3925	0,2638	2,8	
5	3	<i>Pouteria</i> sp. 1	25	0,2622	0,5056	0,6836	8,0	
5	3	<i>V. sericeae</i>	3	0,4233	0,4275	0,1788	2,1	
5	3	<i>D. excelsa</i>	1	0,2000	0,3000	0,0096	0,1	
5	3	<i>P. altissimim</i>	4	0,3381	0,4925	0,1711	2,0	
5	3	<i>Protium</i> sp.	1	0,3000	0,5500	0,0350	0,4	
5	3	<i>A. giganteum</i>	6	0,3692	0,2500	0,1548	1,8	
5	3	<i>L. canescens</i>	18	0,3296	0,4388	0,6891	8,0	
5	3	<i>G. glabra</i>	7	0,5513	0,2375	0,3471	4,0	
5	3	<i>P. gigantocarpa</i>	23	0,5038	0,3003	1,2626	14,7	
5	3	<i>Pouteria</i> sp. 2	10	0,3201	0,3765	0,3251	3,8	
5	3	<i>L. lurida</i>	15	0,3685	0,4073	0,8255	8,5821	9,6
5	3	<i>Ocotea</i> sp. 1	3	0,2583	0,6667	0,1033	1,2	
5	3	<i>Ocotea</i> sp. 2	4	0,2038	0,8163	0,1111	1,3	
5	3	<i>M. elata</i>	10	0,2940	0,5250	0,3420	4,0	
5	3	<i>S. amara</i>	15	0,5497	0,2180	0,9664	11,3	
5	3	<i>E. coriacea</i>	8	0,1877	0,8804	0,1697	2,0	
5	3	<i>C. glabrum</i>	7	0,6163	0,2089	0,4060	4,7	
5	3	<i>C. villosum</i>	9	0,6157	0,2815	0,8145	9,5	
5	3	<i>L. pisonis</i>	2	0,3381	0,4860	0,0848	1,0	
5	3	<i>C. oblongifolia</i>	14	0,4182	0,3702	0,7473	8,7	
5	3	<i>P. suaveolens</i>	1	0,4375	0,3300	0,0410	0,5	
5	3	<i>V. guianensis</i>	5	0,2610	0,4330	0,1134	1,3	
5	4	<i>Pouteria</i> sp. 1	8	0,3161	0,4394	0,2842	3,4	
5	4	<i>D. excelsa</i>	1	0,2338	0,8800	0,0378	0,4	
5	4	<i>P. altissimim</i>	3	0,2742	0,5367	0,0898	1,1	
5	4	<i>A. giganteum</i>	21	0,5926	0,2756	1,6276	19,2	
5	4	<i>L. canescens</i>	1	0,2888	0,4300	0,0282	8,4782	0,3
5	4	<i>G. glabra</i>	15	0,4740	0,3591	0,7752	9,1	
5	4	<i>P. gigantocarpa</i>	12	0,5082	0,3094	0,7396	8,7	
5	4	<i>Pouteria</i> sp. 2	14	0,3703	0,3113	0,4161	4,9	
5	4	<i>L. lurida</i>	15	0,3496	0,4703	0,6047	7,1	

Tabela 2
Continuação...

5	4	<i>Ocotea</i> sp. 2	2	0,2894	0,5455	0,0692	0,8
5	4	<i>M. elata</i>	24	0,3127	0,5049	0,9413	11,1
5	4	<i>S. amara</i>	3	0,4294	0,2917	0,1285	1,5
5	4	<i>E. coriacea</i>	13	0,3601	0,4182	0,5072	6,0
5	4	<i>C. glabrum</i>	4	0,6681	0,1944	0,2895	3,4
5	4	<i>C. villosum</i>	3	0,5767	0,1833	0,1441	1,7
5	4	<i>L. pisonis</i>	3	0,1988	0,6950	0,0700	0,8
5	4	<i>C. oblongifolia</i>	22	0,4782	0,3114	1,3770	16,2
5	4	<i>P. suaveolens</i>	2	0,4319	0,4500	0,1181	1,4
5	4	<i>V. guianensis</i>	4	0,4667	0,3094	0,2302	2,7

Dmédio = Diâmetro médio dos toretes; Lmédio = Comprimento médio dos toretes; VRE = Volume real enformado; VT = Volume total; e P = Proporção da espécie no forno.

O esquema de carbonização adotado na Unidade de Produção de Carvão vegetal dispõe de 5 grupos de espécies. Foram utilizados 4 fornos de alvenaria do tipo rabo quente por grupo de resíduos, totalizando 20. O grupo 5 foi considerado o modelo convencional de carbonização, pois representa o método tradicional de carbonização adotado pela empresa sem segregação de resíduos. Este grupo reúne todas as espécies dos demais grupos, somando outras de menores densidades (*S. amara*, *P. gigantocarpa* e *Protium* sp.). A carbonização dos resíduos do manejo florestal seguiu o esquema apresentado na Fig. 6.

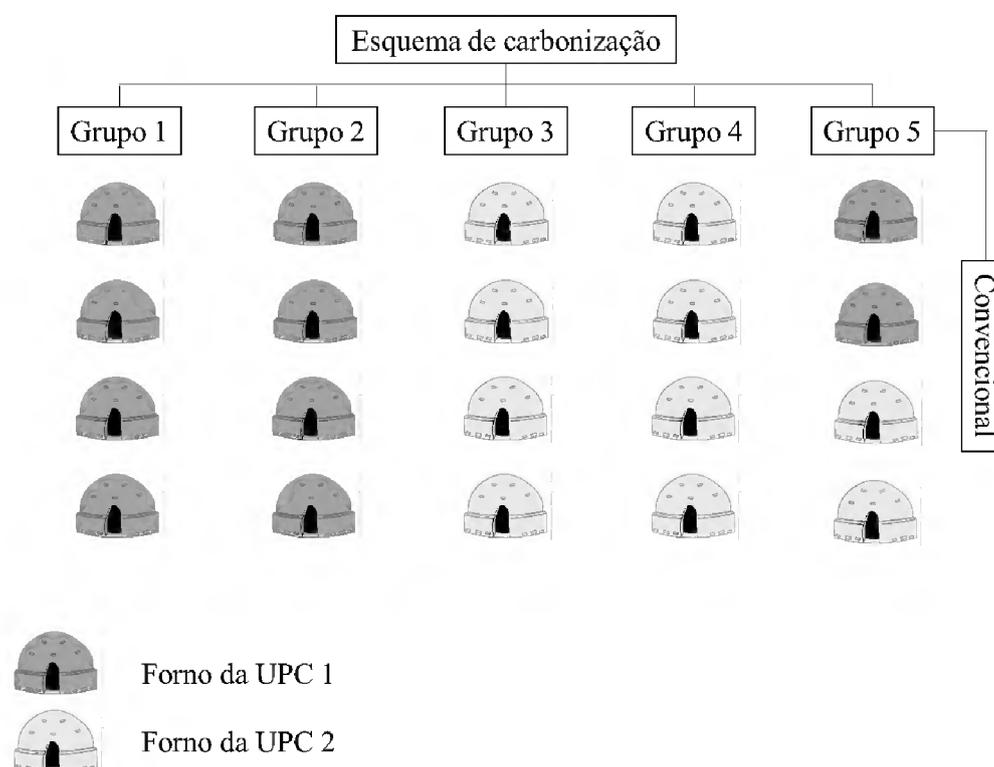


Fig. 6. Esquema de carbonização dos grupos de resíduos nas unidades de produção de carvão vegetal 1 e 2 (UPC 1 e 2) da fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

A ignição dos fornos foi feita por grupo de resíduos, ou seja, após o enchimento de quatro fornos de um determinado grupo. Foram anotadas as datas e horários das ignições dos fornos com vista ao maior controle do ciclo de carbonização.

A condução da carbonização foi feita conforme o protocolo das UPC's, considerando as etapas de enchimento, fechamento de tatus e baianas (aberturas laterais do forno), esfriamento dos fornos com barrelamento (derramamento de argila misturada a água sob os fornos) e abertura dos fornos. Foi considerado um ciclo de carbonização médio de 12 dias (288 h) para cada grupo (Tabela 3), contando da cheia do forno até a abertura. Este período é tradicionalmente utilizado nessas unidades produtoras de carvão vegetal. Assim, o fator tempo foi desconsiderado nesse estudo.

Tabela 3

Ciclo de carbonização dos fornos de alvenaria por grupo de resíduo segregado nas Unidades de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

Grupo	Forno	Ignição		Abertura		Ciclo de carbonização (horas)
		Data	Hora	Data	Hora	
1	1	27/08/2019	14:00	09/09/2019	6:00	304,0
1	2	27/08/2019	14:00	09/09/2019	6:00	304,0
1	3	27/08/2019	14:00	09/09/2019	6:00	304,0
1	4	27/08/2019	14:00	09/09/2019	6:00	304,0
2	1	29/08/2019	8:30	11/09/2019	6:00	309,5
2	2	29/08/2019	8:30	11/09/2019	6:00	309,5
2	3	29/08/2019	8:30	11/09/2019	6:00	309,5
2	4	29/08/2019	8:30	11/09/2019	6:00	309,5
3	1	30/08/2019	16:00	12/09/2019	6:00	302,0
3	2	30/08/2019	16:00	12/09/2019	6:00	302,0
3	3	30/08/2019	16:00	12/09/2019	6:00	302,0
3	4	30/08/2019	16:00	12/09/2019	6:00	302,0
4	1	05/09/2019	15:50	18/09/2019	7:00	303,2
4	2	05/09/2019	15:50	18/09/2019	7:00	303,2
4	3	05/09/2019	15:50	18/09/2019	7:00	303,2
4	4	05/09/2019	15:50	18/09/2019	7:00	303,2
5	1	06/09/2019	16:00	19/09/2019	8:00	304,0
5	2	06/09/2019	16:00	19/09/2019	8:00	304,0
5	3	06/09/2019	16:00	19/09/2019	8:00	304,0
5	4	06/09/2019	16:00	19/09/2019	8:00	304,0

9.2.8 Abertura dos fornos de carbonização

As caixas metálicas destinadas ao acondicionamento do carvão vegetal produzido foram pesadas e cubadas vazias um dia antes da abertura dos fornos, sendo mensuradas com trena a altura, largura e comprimento da caixa. Para cada dimensão foram tiradas três medidas (extremidades e região central). Após a abertura dos fornos (Fig. 7A), o carvão vegetal produzido foi armazenado nas caixas cuja a capacidade volumétrica média é de 9,7 m³ (Fig. 7B). Antes das caixas serem pesadas cheias, foram pregadas tábuas na

região frontal das caixas (Fig. 7C) para que o carvão vegetal não caísse fora da caixa durante o trajeto até a balança (Fig. 7D). As tábuas também facilitaram a cubagem das caixas cheias. Assim foram mensuradas as massas e volumes de carvão vegetal produzidos por forno de alvenaria. Os finos e tiços produzidos por forno foram pesados em balança mecânica modelo Filizola com capacidade de 230 kg (Fig. 7E e 7F). Ao final, as tábuas foram retiradas das caixas metálicas e pesadas para o desconto da massa de carvão vegetal (Fig. 7G).



Fig. 7. Abertura dos fornos após o ciclo de carbonização de 12 dias (A); enchimento das caixas metálicas com carvão vegetal (B); tábuas de madeira pregadas na região frontal das caixas metálicas (C), carregamento das caixas metálicas com carvão vegetal para pesagem (D), pesagem dos finos (E), tiços (F) e tábuas (G) em balança mecânica.

9.2.9 Densidade a granel e rendimentos da carbonização

A densidade a granel do carvão vegetal produzido dos grupos de resíduos foi calculada com base na Eq. (9). As Eqs. (10) (Rendimento em carvão vegetal), (11)

(Rendimento gravimétrico em tiço) e (12) (Rendimento gravimétrico em finos) foram adotadas para calcular os rendimentos das carbonizações.

$$DGC = \frac{Mc}{Vc} \quad (9)$$

Em que, DGC: Densidade a granel do carvão vegetal (ton. mdc⁻¹); Mc: Massa de carvão vegetal (ton); e Vc: Volume de carvão vegetal (mdc).

$$RGC = \left(\frac{Mc}{Mm} \right) \times 100 \quad (10)$$

Em que, RGC: Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Mc: Massa de carvão vegetal (kg); e Mm: Massa de madeira na base úmida (base de trabalho) (kg).

$$RGF = \left(\frac{Mf}{Mm} \right) \times 100 \quad (11)$$

Em que, RGF: Rendimento gravimétrico em finos (%); Mf: Massa de finos (kg); e Mm: Massa de madeira na base úmida (base de trabalho) (kg).

$$RGT = \left(\frac{Mat}{Mm} \right) \times 100 \quad (12)$$

Em que: RGT: rendimento gravimétrico em tiço (%); Mat: Massa de tiço (kg); e Mm: Massa de madeira na base úmida (base de trabalho) (kg).

9.2.10 Consumo específico e coeficiente de rendimento volumétrico

O consumo específico de lenha real e o coeficiente de rendimento volumétrico dos grupos de resíduos foram calculados conforme as Equações 13 e 14.

$$CE = \frac{VME}{MC} \quad (13)$$

Em que, CE: Consumo específico de lenha (m³ de lenha. ton⁻¹ de carvão vegetal); VME: Volume de madeira enfiada (m³); e MC: Massa de carvão vegetal (ton).

$$CCV = \frac{VME}{VC} \quad (14)$$

Em que, CRV: Coeficiente de conversão volumétrico (m³ de lenha. mdc⁻¹); VME: Volume de madeira enfiada (m³); e VC: Volume de carvão vegetal (mdc).

9.2.11 Análises estatísticas

Foram realizadas análises estatísticas descritivas (média e desvio padrão) para comparação dos grupos de resíduos. O teste *t* pareado ($p \leq 0,05$) foi utilizado para verificar similaridade estatística entre os grupos para as variáveis: massa úmida real de madeira enfiada (MURME) x massa úmida estimada de madeira enfiada (MUEME)

e umidade na base úmida (Ubu) x máximo teor de umidade na base úmida (MTUbu). Foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson para verificar a existência de associação entre as variáveis. Foram ajustados modelos de regressão polinomiais lineares para verificar o grau de associação entre as variáveis. Todas as análises estatísticas foram realizadas em Linguagem R [32].

9.3 Resultados e discussão

9.3.1 Caracterização física dos resíduos madeireiros

A densidade aparente (DA) dos resíduos madeireiros do manejo florestal variou de 0,466 g cm⁻³ (*S. amara*) a 1,194 g cm⁻³ (*D. excelsa*) (Fig. 8). Já a umidade na base úmida (Ubu) apresentou variação de 23,1% (*D. excelsa*) a 67,1% (*S. amara*) (Fig. 8). As duas variáveis mencionadas apresentaram correlação negativa ($r = -0,83$; p -valor < 0,0001), evenciando que as espécies florestais com alta densidade aparente apresentaram baixa Ubu (*D. excelsa*, *L. pisonis*, *M. elata* e *L. lurida*).

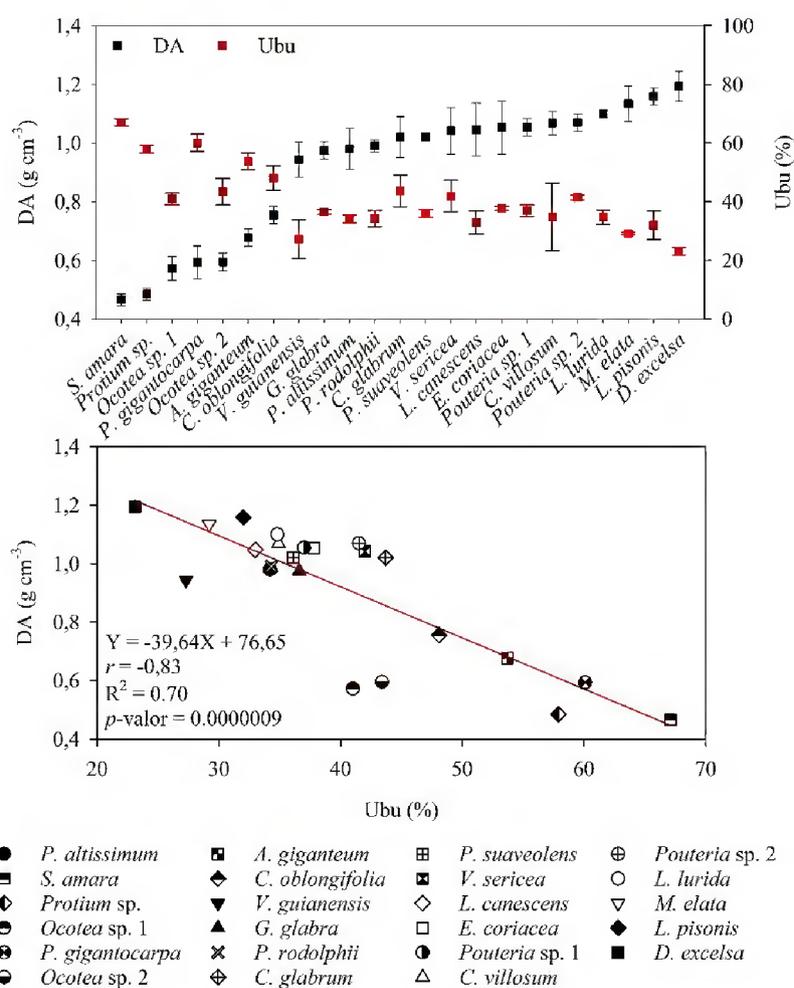


Fig. 8. Densidade aparente (DA) e umidade na base úmida (Ubu) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.

Conforme Brand et al. [33], madeiras destinadas a carbonização deve ter Ubu inferior a 30%, pois a umidade pode promover implicações negativas sobre a carbonização, como aumento do consumo específico de lenha e redução do rendimento gravimétrico em carvão vegetal [34]. Apenas os resíduos de *D. excelsa* (23,1%), *V. guianensis* (27,3%) e *M. elata* (29,2%) estavam com umidade adequada para carbonização. Os elevados valores de Ubu das demais espécies são explicados pelas condições nas quais as madeiras residuais foram estocadas, em pilhas ao ar livre sem proteção contra as chuvas. A carbonização de madeiras umidas pode promover uma taxa de aquecimento do forno mais lenta, temperatura máxima média do forno inconstante devido ao excesso de vapor de água liberado e, maior tempo de ignição e de carbonização [19].

Com relação a densidade básica dos resíduos, foi verificada variação de 0,367 g cm⁻³ (*S. amara*) a 0,993 g cm⁻³ (*D. excelsa*) (Fig. 9). As espécies analisadas foram classificadas como de densidade baixa (26,1%), média (30,4%) e alta (43,5%), conforme Csánady et al. [29].

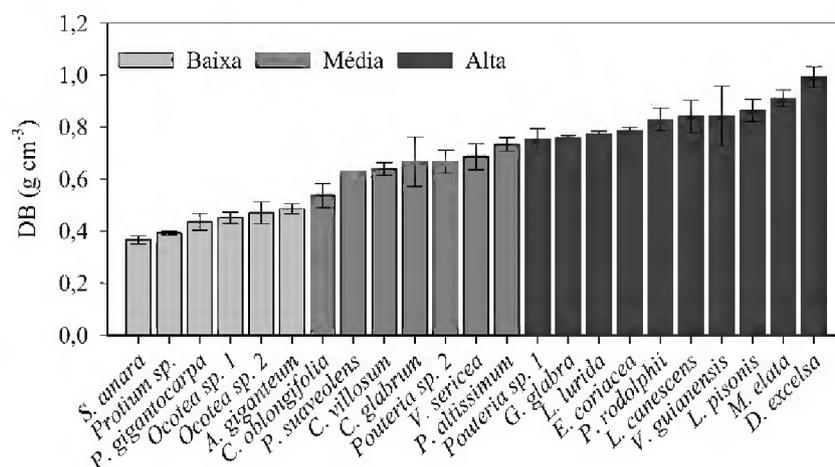


Fig. 9. Densidade básica (DB) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.

Espécies de média e alta densidade básica ($\geq 0,5$ g cm⁻³) são recomendadas para carbonização cujo o objetivo seja carvão vegetal com alta densidade relativa aparente. Nesse caso, o carvão vegetal pode ser comercializado com base na massa, pois é mais denso. Carvão vegetal oriundo de espécies de baixa densidade são menos densos, porém podem ser comercializados com base no volume. Dessa forma, a segregação de resíduos torna-se essencial para o controle da qualidade do carvão vegetal produzido para fins comerciais e, se torna uma alternativa para aumentar as receitas das UPC's.

Relação negativa também foi reportada para as variáveis DB x Ubu (Fig. 10). Correlação similar já foi evidenciada na literatura (-0,944) [35]. Assim, espécies com densidade básica classificada como baixa (*S. amara*, *Protium* sp. e *P. gigantocarpa*) apresentam altos valores de umidade (67,1%, 57,9% e 60,1%), pois possuem maior volume de espaços vazios em seu interior que podem ser preenchidos com água livre ou de capilaridade, o que resulta em alta umidade [36]. Dessa forma, destaca-se a necessidade de pré-tratamento dos resíduos do manejo antes da carbonização, como a submissão a secagem e a proteção contra as chuvas.

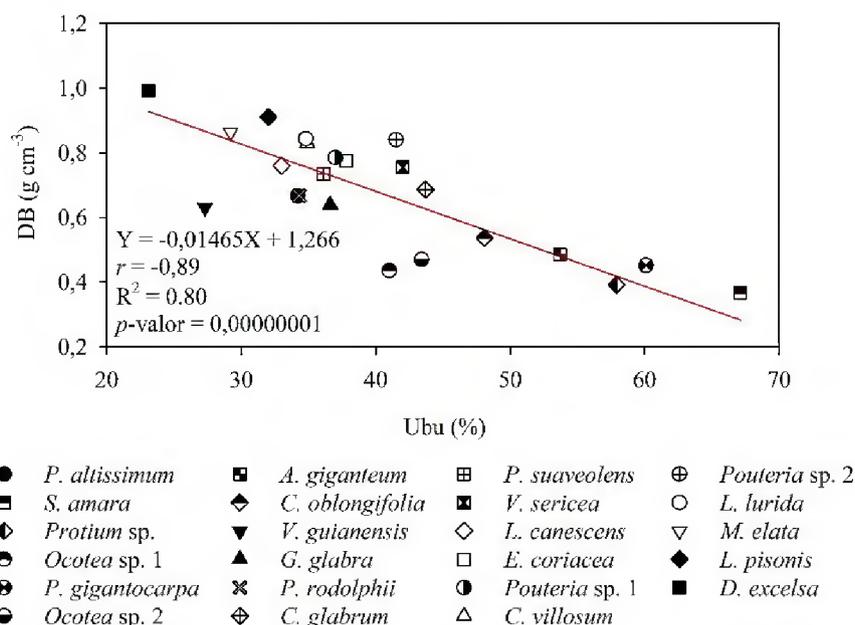


Fig. 10. Densidade básica (DB) e umidade na base úmida (Ubu) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.

A exposição dos resíduos do manejo as chuvas nos pátios de estocagem é um dos grandes gargalos nas unidades produtoras de carvão vegetal, pois promovem perdas energéticas e aumento do consumo de lenha na carbonização. Os novos estudos devem abordar metodologias para redução da umidade dos resíduos para maximização energética e financeira da unidade produtora de carvão vegetal.

A Fig. 11 apresenta os valores de umidade (Ubu) e máximo teor de umidade na base úmida (MTUbu) dos resíduos madeireiros do manejo florestal. Percebe-se que as espécies tiveram a Ubu próxima ao MTUbu, com exceção de *V. guianensis*, *P. altissimum*, *C. villosum*, *P. suaveolens*, *Ocotea* sp. 1 e *Ocotea* sp. 2. Os valores de MTUbu dessas espécies explicaram o resultado obtido pelo teste *t* pareado, em que as médias de Ubu e MTUbu são diferentes estatisticamente (*p*-valor = 0,00003). Contudo, reforçam a

necessidade de redução da umidade dos resíduos visando melhor eficiência de conversão de madeira em carvão vegetal.

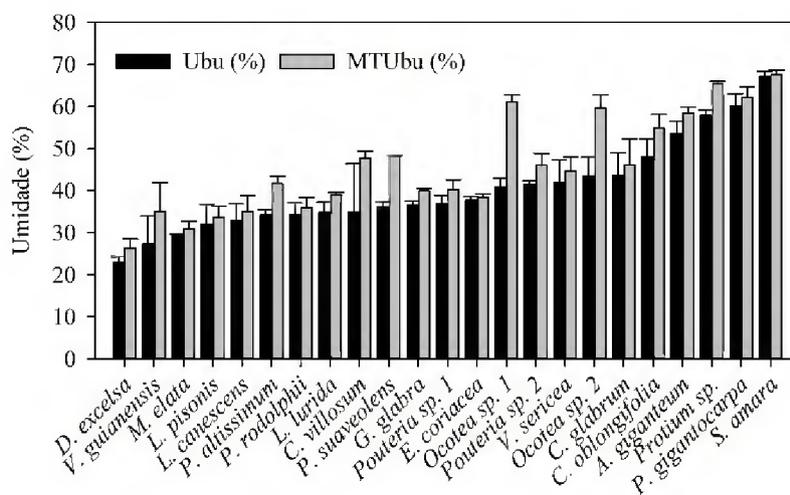


Fig. 11. Umidade na base úmida (Ubu) e máximo teor de umidade na base úmida (MTUbu) dos resíduos de vinte e três espécies tropicais exploradas em um plano de manejo florestal na Amazônia brasileira.

9.3.2 Volume, massa, densidade e umidade dos resíduos madeiros por forno de carbonização

Os resultados de volume de madeira enforada (VME), massa úmida real de madeira enforada (MURME), massa úmida estimada de madeira enforada (MUEME), massa seca estimada de madeira enforada (MSEME), umidade ponderada na base úmida (Ubu_p), densidade básica ponderada (DB_p), densidade aparente ponderada (DA1) e densidade aparente (DA2) por forno de carbonização dos grupos de resíduos segregados estão evidenciados na tabela 4. Os grupos 2 e 3 apresentaram os maiores valores para o VME, em ordem 9,117 m³ e 9,500 m³. As melhores médias de MURME, MUEME, MSEME, Ubu_p, DB_p, DA1 e DA2 foram reportadas para os grupos 1, 2 e 4, sendo superiores ao grupo 5 (modelo convencional).

Tabela 4

Métricas de volume e massa de madeira enformada, umidade e densidade ponderadas por forno de alvenaria.

Grupo	Forno	VME (m ³)	MURME (ton)	MUEME (ton)	MSEME (ton)	U _{bup} (%)	DB _p (ton m ⁻³)	DA _{1p} (ton m ⁻³)	DA ₂ (ton m ⁻³)
1	1	8,951	10,70	10,69	8,89	23,1	0,993	1,194	1,195
1	2	8,470	11,10	10,12	8,41	23,1	0,993	1,194	1,311
1	3	9,107	10,40	10,88	9,04	23,1	0,993	1,194	1,142
1	4	8,565	10,45	10,23	8,50	23,1	0,993	1,194	1,220
x	-	8,774	10,66	10,48	8,71	23,1	0,993	1,194	1,217
S	-	0,305	0,32	0,36	0,30	0,00	0,000	0,000	0,070
2	1	9,066	9,55	9,09	7,54	34,0	0,832	1,003	1,053
2	2	8,809	10,85	9,15	7,39	33,2	0,839	1,039	1,232
2	3	9,711	10,25	9,95	8,12	33,6	0,836	1,024	1,055
2	4	8,880	9,80	8,60	7,07	32,3	0,797	0,968	1,104
x	-	9,117	10,11	9,20	7,53	33,3	0,826	1,009	1,111
S	-	0,411	0,57	0,56	0,44	0,75	0,020	0,031	0,084
3	1	9,822	7,20	7,55	5,26	48,3	0,535	0,769	0,733
3	2	9,423	6,85	7,48	5,17	46,8	0,549	0,794	0,727
3	3	9,438	7,00	7,32	5,14	46,9	0,544	0,776	0,742
3	4	9,329	6,80	7,29	5,09	47,1	0,545	0,781	0,729
x	-	9,500	6,96	7,41	5,16	47,3	0,543	0,780	0,733
S	-	0,218	0,18	0,13	0,07	0,69	0,006	0,011	0,007
4	1	8,987	9,35	9,46	6,76	35,1	0,752	1,053	1,040
4	2	8,803	9,00	9,06	6,75	34,9	0,767	1,029	1,022
4	3	9,100	9,40	9,44	6,72	37,5	0,739	1,037	1,033
4	4	8,725	8,80	9,05	6,70	35,5	0,768	1,037	1,009
x	-	8,904	9,14	9,25	6,73	35,7	0,756	1,039	1,026
S	-	0,171	0,29	0,23	0,03	1,19	0,014	0,010	0,014
5	1	8,920	8,05	7,87	5,87	40,7	0,658	0,883	0,903
5	2	9,579	9,20	8,44	6,21	44,2	0,648	0,882	0,960
5	3	8,582	8,40	7,55	5,42	43,6	0,631	0,880	0,979
5	4	8,478	7,60	7,51	5,49	40,3	0,647	0,885	0,896
x	-	8,890	8,31	7,84	5,74	42,2	0,646	0,882	0,935
S	-	0,497	0,68	0,43	0,37	1,98	0,011	0,002	0,041

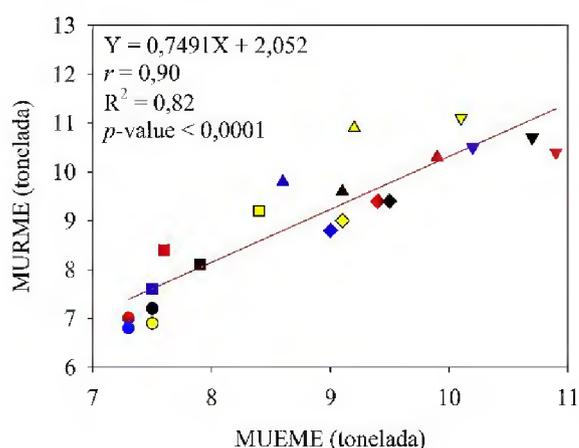
x = Média; S = Desvio padrão; VME = Volume de madeira enformada; MURME = Massa úmida real de madeira enformada; MUEME = Massa úmida estimada de madeira enformada; U_{bup} = Umidade ponderada por forno na base seca; DB_p = Densidade básica ponderada da madeira; DA_{1p} = Densidade aparente ponderada da madeira enformada; e DA₂ = Densidade aparente da madeira enformada.

Os maiores valores de MURME, MUEME, MSEME verificados para os grupos 1, 2 e 4, são respostas positivas da segregação dos resíduos. Estes grupos reúnem espécies com densidade básica média e alta, o que interferiu positivamente na massa de madeira enformada e no aproveitamento do espaço interno do forno. Além disso, influenciaram os valores ponderados de U_{bup} e DB_p dos fornos. Fortaleza et al. [34] reportaram que madeiras com maior DB influenciam positivamente a produção de carvão vegetal. A não

segregação de resíduos resultou em implicações negativas na média de massa de madeira enfiada, visto agregar espécies com ampla magnitude de densidade. Maior heterogeneidade de massa ou volume de madeira por forno de alvenaria, resultou na heterogeneidade da DBp por forno para os resíduos do Grupo 5.

As variáveis VME, MURME e Udup tiveram os desvios mais superiores para os resíduos do grupo 5, o que evidencia a heterogeneidade gravimétrica e volumétrica de madeiras utilizadas na carbonização convencional devido a não segregação. Isso dificulta o controle do estoque de madeira residual e o planejamento de produção mensal e anual de carvão vegetal de uma UPC, afetando negativamente as receitas.

As variáveis MURME e MUEME apresentam correlação forte positiva (Fig. 12). Além disso, o teste *t* pareado mostrou que as médias de MURME e MUEME são iguais estatisticamente (p -valor = 0,1288). Estes resultados nos mostram que carvoarias onde não haja balança comercial para pesar os resíduos para carbonização podem utilizar o modelo ajustado ($MURME = 0,7491 * MUEME + 2,052$) para estimar a massa úmida de madeira, e assim ter o controle do rendimento do processo. Vale ressaltar que a massa úmida foi estimada em função da DAp e VME.

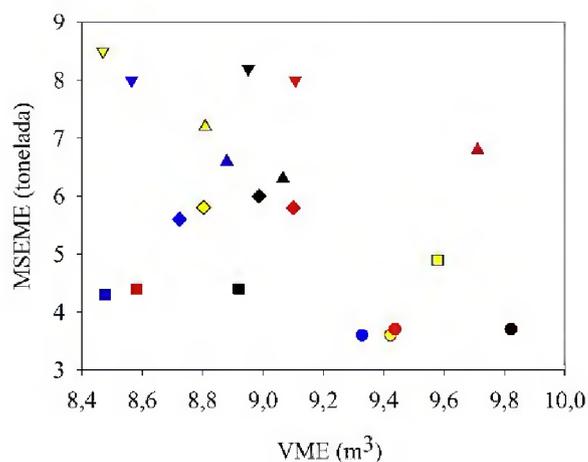


Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5 (Convencional)
▼ Forno 1	▲ Forno 1	● Forno 1	◆ Forno 1	■ Forno 1
▼ Forno 2	▲ Forno 2	● Forno 2	◆ Forno 2	■ Forno 2
▼ Forno 3	▲ Forno 3	● Forno 3	◆ Forno 3	■ Forno 3
▼ Forno 4	▲ Forno 4	● Forno 4	◆ Forno 4	■ Forno 4

Fig. 12. Massa úmida real de madeira enfiada (MURME) e Massa úmida estimada de madeira enfiada (MUEME) dos resíduos nos fornos de alvenaria.

Observa-se na Fig. 13 a disposição da MSEM em função do VME. Percebe-se maior variação na massa seca estimada de resíduos enfiados (5,16 - 8,71 ton) do que no volume de resíduos enfiados (8,774 - 9,500 m³). Não foi evidenciada relação entre

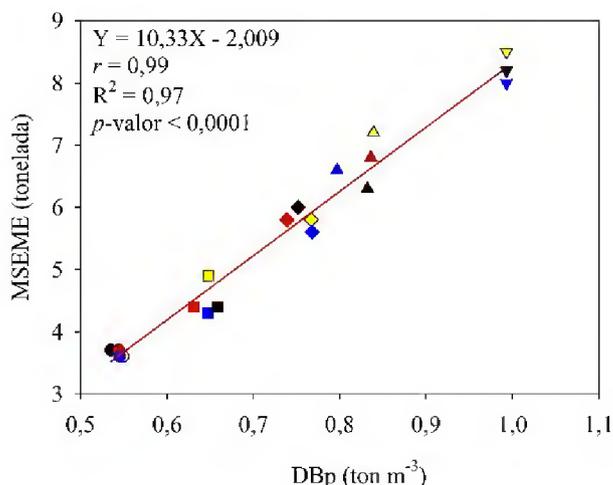
essas duas variáveis. Mesmo o grupo 1 apresentando o menor volume enforado, apresentou a maior média em massa seca estimada de madeira enforada. Estes resultados são influenciados pela densidade básica dos resíduos enforados. Devido a não segregação, o grupo 5 apresentou os fornos com maior variação de massa e volume por forno de alvenaria se comparado aos grupos 1, 2, 3 e 4.



Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5 (Convencional)
▼ Forno 1	▲ Forno 1	● Forno 1	◆ Forno 1	■ Forno 1
▽ Forno 2	△ Forno 2	○ Forno 2	◇ Forno 2	□ Forno 2
▼ Forno 3	▲ Forno 3	● Forno 3	◆ Forno 3	■ Forno 3
▼ Forno 4	▲ Forno 4	● Forno 4	◆ Forno 4	■ Forno 4

Fig. 13. Massa seca estimada de madeira enforada (MSEM) e Volume de madeira enforada (VME) dos grupos de resíduos segregados e convencional.

Observa-se na Fig. 14 que quanto maior o valor de MSEM maior será a DBp do forno, o que foi consequência da segregação dos resíduos. Os Grupos 1, 2 e 4 apresentaram maior DBp que os grupos 3 e 5. Menor DBp do grupo 3 é explicada pela menor densidade média das madeiras contidas no grupo. O grupo 5 teve influencia negativa da ampla variação de densidade das espécies.



Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5 (Convencional)
▼ Forno 1	▲ Forno 1	● Forno 1	◆ Forno 1	■ Forno 1
▽ Forno 2	△ Forno 2	● Forno 2	◆ Forno 2	■ Forno 2
▼ Forno 3	▲ Forno 3	● Forno 3	◆ Forno 3	■ Forno 3
▼ Forno 4	▲ Forno 4	● Forno 4	◆ Forno 4	■ Forno 4

Fig. 14. Massa seca estimada de madeira enformada (MSME) e Densidade básica ponderada da madeira (DBp) dos grupos de resíduos segregados e convencional nos fornos de alvenaria.

9.3.3 Produtividade dos fornos de carbonização

Os grupos de resíduos 1, 2, 3 e 4 apresentaram maiores médias de volume de carvão (VC) produzido (Tabela 5), se comparado ao modelo convencional de carbonização (grupo 5). As maiores médias de massa de carvão (MC) foram observadas para os grupos 1, 2 e 4 (Tabela 5). Como consequência da segregação, o maior rendimento gravimétrico foram reportados para os grupos 1 (27,3%), 2 (24,5%) e 4 (21,9%) (Tabela 5). O RGTbu foi mais expressivo para os grupos 3 (3,2%) e 5 (0,9%), sendo observado que todos os fornos desses grupos tiveram produção de tiços. O RGFbu se manteve semelhante para todos os grupos de resíduos. A DGC do modelo convencional (grupo 5) só foi superior ao grupo 3, conseqüentemente, inferior aos grupos 1, 2 e 4.

Tabela 5

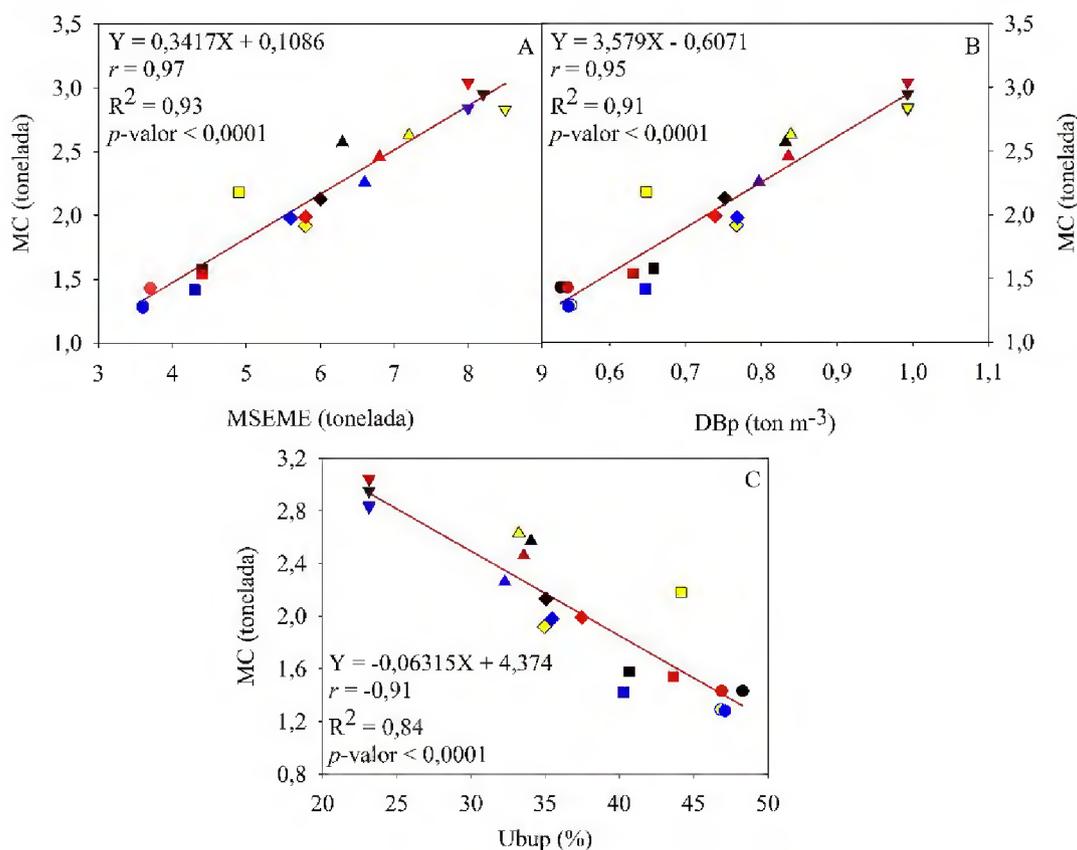
Produtividade dos fornos de alvenaria com grupos de resíduos segregados na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

Grupo	Forno	VC (mdc)	MC (ton)	RGCbU (%)	RGTbu (%)	RGFbu (%)	DGC (ton mdc ⁻¹)
1	1	8,04	2,9	27,5	0,6	0,7	0,366
1	2	7,70	2,8	25,5	0,1	0,7	0,368
1	3	7,99	3,0	29,2	0,0	0,7	0,380
1	4	7,63	2,8	27,1	0,0	0,8	0,372
x	-	7,84	2,9	27,3	0,2	0,7	0,372
S	-	0,21	0,10	1,51	0,29	0,07	0,006
2	1	6,74	2,6	26,9	1,5	1,0	0,381
2	2	7,81	2,6	24,2	0,0	0,9	0,337
2	3	7,47	2,5	24,0	0,6	0,7	0,329
2	4	7,29	2,3	23,0	0,8	0,6	0,310
x	-	7,33	2,5	24,5	0,7	0,8	0,339
S	-	0,44	0,16	1,66	0,60	0,19	0,030
3	1	7,00	1,4	19,9	0,6	0,8	0,205
3	2	6,16	1,3	18,8	5,0	0,4	0,209
3	3	6,98	1,4	20,4	2,0	0,8	0,204
3	4	5,58	1,3	18,9	5,3	0,5	0,230
x	-	6,43	1,4	19,5	3,2	0,6	0,212
S	-	0,69	0,08	0,76	2,31	0,18	0,012
4	1	6,10	2,1	22,7	1,6	0,7	0,349
4	2	6,79	1,9	21,4	0,0	1,0	0,283
4	3	6,69	2,0	21,1	0,0	0,5	0,297
4	4	6,87	2,0	22,5	1,2	0,6	0,289
x	-	6,61	2,0	21,9	0,7	0,7	0,304
S	-	0,35	0,09	0,80	0,85	0,21	0,030
5	1	6,22	1,6	19,7	0,9	0,5	0,255
5	2	6,50	2,2	23,7	0,7	0,7	0,335
5	3	5,72	1,5	18,3	0,9	0,3	0,269
5	4	5,66	1,4	18,7	1,2	0,4	0,251
x	-	6,02	1,7	20,1	0,9	0,5	0,278
S	-	0,41	0,34	2,47	0,23	0,16	0,039

x = Média; S = Desvio padrão; RGCbu = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal na base úmida; RGTbu = Rendimento gravimétrico em tiço na base úmida; RGFbu = Rendimento gravimétrico em finos na base úmida; e DG = Densidade a granel do carvão vegetal.

A segregação dos resíduos do manejo em grupos para carbonização apresentou implicações importantes do ponto de vista de rendimento e mercado, pois a segregação evidenciou ganhos em volume e em massa de carvão. Sob essa ótica, corrobora-se que o carvão vegetal produzido nos fornos dos grupos 1, 2 e 4 pode ser negociado com base na massa, enquanto que o grupo 3, com base no volume. De qualquer forma, o modelo convencional apresentou valores de massa e volume inferiores aos grupos segregados.

Os resultados encontrados para MC pode ser explicado pela MSME, DPp e Udup. Em nosso estudo, os fornos de alvenaria com maiores massas de carvão vegetal tiveram as maiores MSEM (Fig. 15A) e DBp (Fig. 15B). Além disso, os fornos com menores valores de Udup, produziram mais carvão vegetal (Fig. 15C).



Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5 (Convencional)
▼ Forno 1	▲ Forno 1	● Forno 1	◆ Forno 1	■ Forno 1
▽ Forno 2	△ Forno 2	● Forno 2	◇ Forno 2	■ Forno 2
▼ Forno 3	▲ Forno 3	● Forno 3	◆ Forno 3	■ Forno 3
▽ Forno 4	△ Forno 4	● Forno 4	◇ Forno 4	■ Forno 4

Fig. 15. Massa de carvão vegetal (MC) por forno de alvenaria em função da massa seca estimada de madeira enforcada (MSEM), densidade básica ponderada (DBp) e umidade ponderada na base úmida (Udup).

De modo geral, apenas o grupo 1 apresentou RGCBu maior que a média nacional em fornos de alvenaria do tipo rabo quente (25%) [37,20]. Contudo, os valores reportados para os grupos 1, 2 e 4 foram satisfatórios considerando o modelo tradicional (Grupo 5), mostrando ganhos reais em MC promovidos pela segregação dos resíduos. Maior RGCBu dos grupos mencionados indica que houve maior eficiência de conversão de madeira com propriedades tecnológicas similares em carvão vegetal. Vale destacar que o aumento do rendimento em carvão vegetal pode melhorar a lucratividade das UPC's em função da

redução do custo de produção, pois será produzido mais massa de carvão vegetal com a mesma quantidade de matéria prima [8].

Estudo conduzido por Canal et al. [38] evidenciou que a carbonização de madeiras de *Eucalyptus* sp. aos sete anos de idade com umidade elevada ($> 30\%$, base seca) apresentou redução no rendimento gravimétrico em carvão vegetal e aumento na emissão de gases condensáveis. Isso explica os resultados de RGCbu obtidos pelos grupos 3 e 5.

O RGCbu reportado para o grupo 5 é maior que o grupo 3 devido ao desempenho do forno 2. Em termos de composição, os fornos do grupo 5 apresentaram as seguintes composições (Tabela 2): 1 - 32,2% de espécies de baixa densidade, 25,7% de espécies de média densidade e 42,1% de espécies de alta densidade; 2 - 28,1% de espécies de baixa densidade, 27,3% de espécies de média densidade e 43,8% de espécies de alta densidade; 3 - 30,7% de espécies de baixa densidade, 31,3% de espécies de média densidade e 38,0% de espécies de alta densidade; e 4 - 30,2% de espécies de baixa densidade, 28,7% de espécies de média densidade e 40,9% de espécies de alta densidade. Portanto, o forno 2 desse grupo apresentou maiores percentuais de espécies de média e alta densidade, do que de baixa densidade, quando comparado aos demais fornos do grupo, o que culminou no aumento do RGCbu do grupo 5. Se desconsiderado o forno 2, o RGCbu do grupo será de 18,9%. Esse é o rendimento considerado convencional, o que é inferior a todos os valores encontrados para os demais grupos.

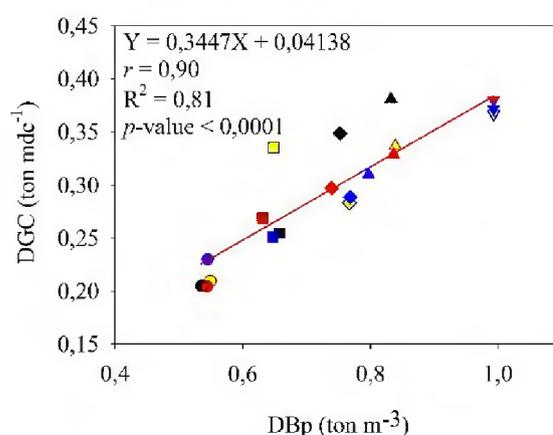
O Grupo 3 apresentou maior produção de tiços que todos os outros grupos. Especificamente os fornos 2 e 4 (Fig. 16) elevaram a média de tiços do grupo. Esse resultado promoveu implicações negativas na massa e volume de carvão vegetal produzido pelo grupo 3 e, conseqüentemente, no RGCbu. Se desconsiderarmos os fornos 2 e 4, o grupo 3 teria o RGCbu de 20,1%, que é semelhante ao modelo convencional. Além disso, haveria ganhos em volume de carvão, com média de 6,99 mdc, o que fortaleceria o argumento de negociação do carvão vegetal desse grupo baseando-se no volume.



Fig. 16. Produção de tiços nos fornos 2 (A) e 4 (B) do grupo 3 na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

A maior produção de tiços se deve a carbonização de peças de resíduos com diâmetros muito distintos, como pode ser visualizado na Fig. 16, e pelo empirismo no controle da carbonização. Figueroa e Moraes [39] destacaram que as taxas de carbonização de madeiras é fortemente influenciada por diversos fatores, dentre eles, as dimensões das peças. Jesus et al. [40] estudaram toretes de madeira com diâmetros distintos (6 cm, 10 cm e 14 cm) para carbonização oriundos de *Eucalyptus* sp. aos 7 anos de idade cultivados em espaçamento de 3 x 2 m simulando unidades industriais de produção de carvão vegetal. Os autores verificaram que o perfil térmico na madeira varia em função do diâmetro e que a transferência de calor no sentido superfície-centro da peça foram diferentes nos três tratamentos diamétricos testados. Com base nisso, sugere-se maior controle do diâmetro das peças de resíduos a serem carbonizados, visando maior homogeneidade nas fases teóricas da carbonização, menor produção de tiços e maior produção de carvão vegetal.

A segregação dos resíduos elevou a DGC dos grupos 1, 2 e 4, pois a utilização de madeiras com propriedades similares culminaram em maior controle na produção de carvão vegetal. A DGC obtida pode ser explicada pela DBp dos fornos, em que os fornos com maior DBp apresentaram maior DGC, evidenciando uma correlação linear positiva entre as duas variáveis (Fig. 17).



Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5 (Convencional)
▼ Forno 1	▲ Forno 1	● Forno 1	◆ Forno 1	■ Forno 1
▽ Forno 2	△ Forno 2	● Forno 2	◆ Forno 2	■ Forno 2
▼ Forno 3	△ Forno 3	● Forno 3	◆ Forno 3	■ Forno 3
▼ Forno 4	▲ Forno 4	● Forno 4	◆ Forno 4	■ Forno 4

Fig. 17. Densidade a granel do carvão vegetal (DGC) por forno de carbonização em função da densidade básica ponderada (DBp).

Maior DGC implica em maior densidade energética do carvão vegetal [41], ou seja, maior conteúdo energético estocado por unidade de volume. Além disso, os custos relacionados ao transporte e armazenamento do carvão vegetal são reduzidos, o que é mais um ponto positivo promovido pela segregação dos resíduos. Os resultados de DGC dos grupos 1, 2 e 4 foram superiores aos reportados por Silva et al. [42] carbonizando resíduos de serraria das espécies *Manilkara amazonica* ($0,231 \text{ ton m}^{-3}$), *Lecythis pisonis* ($0,195 \text{ ton m}^{-3}$) e *Piptadenia suaveolens* ($0,180 \text{ ton m}^{-3}$) separadamente em fornos de alvenaria do tipo rabo quente com ciclo de carbonização de dez dias. Figueiró et al. [43] reportaram DGC ($0,206 \text{ ton m}^{-3}$ e $0,181 \text{ ton m}^{-3}$) para *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 7 anos de idade em dois fornos retangulares industriais inferiores aos grupos de resíduos segregados nesse estudo, evidenciando que os resíduos do manejo florestal são promissores para produção de carvão vegetal com características adequadas ao uso siderúrgico.

9.3.4 Coeficientes de conversão de resíduos madeireiros em carvão vegetal

O Consumo específico de Lenha (CE) e o coeficiente de conversão volumétrica (CCV) dos grupos são observados na Fig. 18. Para ambas as variáveis, os grupos 1, 2 e 4 apresentaram os melhores resultados. Para produzir uma tonelada de carvão vegetal, foram necessários 3,0 (grupo 1), 3,7 (grupo 2) e 4,4 (grupo 4) m^3 de lenha dos grupos mencionados (Fig. 18A). Com relação ao CCV, foram necessários 1,1 (grupo 1), 1,2 (grupo 2) e 1,3 (grupo 4) m^3 de lenha para produzir um mdc (Fig. 18B), que em comparação ao modelo convencional (1,5) foram melhores. O grupo 3 apresentou a pior performance nos dois índices em função da massa e do volume de carvão vegetal produzido.

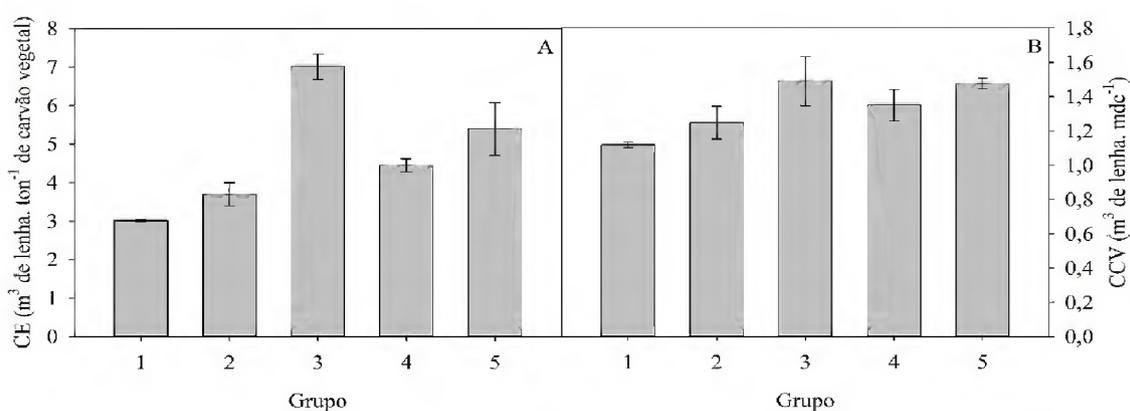


Fig. 18. Consumo específico real (CE) (A) e Coeficiente de conversão volumétrico (CCV) (B) dos grupos de resíduos segregados.

Os resultados verificados para CE e CCV foram influenciados pela MSEM e DBp dos fornos. Quanto maior a massa de resíduos enforados, maior a DBp por forno de alvenaria, conseqüentemente, menores os índices CE e CCV. Os grupos de resíduos do presente estudo apresentaram CCV inferior ou igual ao considerado para *Eucalyptus* sp. (1,5 m³ de lenha: 1 mdc) por Cordeiro et al. (2018). Em uma unidade produtora de carvão vegetal é requerido baixos valores de CE e CVV, pois indica a maximização da massa e volume de carvão vegetal em função da utilização de menor volume de matéria prima. Esse resultado é importante, e se mostrou possível após a segregação dessa biomassa em grupos com propriedades tecnológicas similares. Assim, a perspectiva de utilização dos grupos em carvoarias que tem como matéria prima os resíduos do manejo florestal é positiva, visto os ganhos em produtividade e rendimento em carvão vegetal provados nesse estudo.

9.4 Conclusões

Este estudo revelou que a segregação dos resíduos madeireiros do manejo florestal afetou positivamente o conteúdo de matéria prima enforada, produtividade dos fornos de alvenaria e rendimentos da carbonização, o que é importante visando elevar a produção e as receitas das carvoarias na Amazônia, além de melhorar a visibilidade da atividade na região. O agrupamento dos resíduos mostrou ser um critério promissor na carbonização, especialmente para dar suporte as negociações de carvão vegetal com base no volume (mdc) e na massa (tonelada), pois os resultados mostram ganhos reais na gravimetria e na volumetria de carvão vegetal.

Em condições industriais em que não haja a disponibilidade de balança para a pesagem dos resíduos, o modelo $MURME = 0,7491 * MUEME + 2,052$ pode ser utilizado. Foi verificado que o agrupamento dos resíduos melhorou as métricas de conversão de lenha em carvão vegetal, mostrando menor consumo de lenha para uma mesma quantidade de carvão vegetal produzido da forma convencional. Novos estudos devem abordar os pré-tratamentos dos resíduos do manejo florestal para a redução da umidade, viabilidade econômica da segregação dos resíduos e controle diamétrico dos toretes no enchimento dos fornos.

Referências

- [1] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Forestry production and trade. 2017.
- [2] Leme MMV, Venturini OJ, Lora EES, Rocha MH, Luz FC, Almeida W. Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: technical and economic analysis. *J Clean Prod* 2018;194:219–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.101>.
- [3] BEN. Brazilian energy balance 2019: year 2018. Rio de Janeiro: EPE; 2019.
- [4] Souza ND, Amodei JB, Xavier CN, Dias Júnior AF, Carvalho AM. Case study of a carbonization plant: evaluation of features and quality of charcoal aiming steel use. *Floresta e Ambient* 2016;23:270–7. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.106114>.
- [5] Carvalho PSL, Mesquita PPD, Araújo EDG. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética e competitividade. *BNDES Setorial* 2015;41:181–236.
- [6] Couto AM, Trugilho PF, Napoli A, Lima JT, Silva JRM, Protásio TP. Quality of charcoal from *Corymbia* and *Eucalyptus* produced at different final carbonization temperatures. *Sci For* 2015;43:817–31. <https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.7>.
- [7] Rodrigues T, Braghini Junior A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. *J Anal Appl Pyrolysis* 2019;143:104670. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>.
- [8] Rodrigues T, Braghini Junior A. Technological prospecting in the production of charcoal: a patent study. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;111:170–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.080>.
- [9] Uhlig A, Goldemberg J, Coelho ST. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. *Rev Bras Energ* 2008;14:67–85.
- [10] SINDIFER. Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário estatístico Ano-Base 2018. Minas Gerais: SINDIFER; 2019.
- [11] Vital MHF, Pinto MAC. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. *BNDES Setorial* 2009;30:237–97.
- [12] IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. Report 2019. São Paulo: IBÁ; 2019.
- [13] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução normativa MMA no 5 de 11/12/2006. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação,

execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas. Brasil: 2006.

- [14] Numazawa CTD, Numazawa S, Pacca S, John VM. 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>.
- [15] Cardoso MT, Damásio RAP, Carneiro ACO, Jacovine LAG, Vital BR, Barcelos DC. Construction of a gas burning system resulting from carbonization to reduce pollutants emissions. *Cerne* 2010;16:115–24.
- [16] Pinheiro PCC, Rezende MEA, Sampaio RS. A produção de carvão vegetal: teoria e prática. Belo Horizonte: 2006.
- [17] Minette LJ, Pimenta AS, Faria MM, Souza AP, Silva EP, Fiedler NC. Evaluation of the physical work load and biomechanical analysis of workers at wood carbonization in hot tail charcoal kilns. *Rev Árvore* 2007;31:853–8.
- [18] Santos SFOM, Hatakeyama K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. *Produção* 2012;22:309–21. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132012005000010>.
- [19] Arruda TPM, Pimenta AS, Vital BR, Lucia RM Della, Acosta FC. Evaluation of two carbonization routines in rectangular kilns. *Rev Árvore* 2011;35:949–55. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500020>.
- [20] Oliveira AC, Carneiro ACO, Pereira BLC, Vital BR, Carvalho AMML, Trugilho PF, et al. Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures. *Rev Árvore* 2013;37:557–66. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>.
- [21] Lin J-CM. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system. *Fuel Process Technol* 2006;87:487–95. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.07.009>.
- [22] Peláez-Samaniego MR, Garcia-Perez M, Cortez LB, Rosillo-Calle F, Mesa J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12:1063–86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.018>.
- [23] Bustos-Vanegas JD, Martins MA, Carneiro ACO, Freitas AG, Barbosa RC. Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns. *Fuel* 2018;226:508–15. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.024>.

- [24] Nascimento SM, Dutra RIJP, Numazawa S. Residue of wood industry: characterization, consequences about environment and alternative. *Holos Environ* 2006;6:08–21. <https://doi.org/10.14295/holos.v6i1.177>.
- [25] Rousset P, Figueiredo C, Souza M, Quirino W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. *Fuel Process Technol* 2011;92:1890–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.005>.
- [26] Juizo CGF, Lima MR, Silva DA. Quality of the bark and wood of nine *Eucalyptus* species for the charcoal production. *Rev Bras Ciências Agrárias* 2017;12:386–90. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5461>.
- [27] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: 2017.
- [28] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: 2003.
- [29] Csanády E, Magoss E, Tolvaj L. *Quality of Machined Wood Surfaces*. New York City: Springer International Publishing; 2015.
- [30] Simpson W, TenWolde A. *Physical properties and moisture relations of wood*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI, p. 4-2.; 2010.
- [31] Husch B, Miller CI, Beers TW. *Forest Mensuration*. New York: Ronald Press; 1972.
- [32] R Core Team. *R: a language and environment for statistical computing*. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2018. <https://doi.org/10.4236/ojs.2014.49064>.
- [33] Brand MA, Cunha AB, Carvalho AF, Brehmer DR, Küster LC. Analysis of the quality of wood and charcoal produced from the species *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) in family farming, in Biguaçu, Santa Catarina, Brazil. *Sci For* 2013;41:401–10.
- [34] Fortaleza AP, Nascimento Filho JJP, Ceretta RPS, Barros DS, Silva SS. Forest species biomass for the production of charcoal. *Ciência Florest* 2019;29:1436–51. <https://doi.org/10.5902/1980509831639>.
- [35] Zanuncio AJV, Lima JT, Monteiro TC, Carvalho AG, Trugilho PF. Drying logs of *Eucalyptus* and *Corymbia* for energy purposes. *Sci For* 2013;41:353–60.

- [36] Oliveira JTS, Hellmeister JC, Tomazello Filho M. Variation of the moisture content and specific gravity in the wood of seven eucalypt species. *Rev Árvore* 2005;29:115–27. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013>.
- [37] Belchior IB, Sabbag OJ, Polini DMSS, Pereira VGFM, Pacheco A. Costs and economic viability in charcoal production in the state of Mato Grosso do Sul. *Ciência da Madeira* 2017;8:168–76. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p168-176>.
- [38] Canal WD, Carvalho AMML, Carneiro ACO, Vital BR, Pereira BLC, Donato DB. Effect of wood moisture on greenhouse gases emission from carbonization process. *Sci For* 2016;44:831–40. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n112.05>.
- [39] Figueroa MJM, Moraes PD. Wood behavior at high temperatures Manuel. *Ambient Construído* 2009;9:157–74.
- [40] Jesus MS, Carneiro ACO, Martinez CLM, Vital BR, Carneiro APS, Assis MR. Thermal decomposition fundamentals in large-diameter wooden logs during slow pyrolysis. *Wood Sci Technol* 2019;53:1353–1372. <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01133-9>.
- [41] Pinheiro GF, Rendeiro G, Pinho JT. Energy density of plant residues. *Biomassa Energ* 2005;2:113–23.
- [42] Silva MG, Numazawa S, Araujo MM, Nagaishi TYR, Galvão GR. Charcoal from timber industry residues of three tree species logged in the municipality of Paragominas, PA. *Acta Amaz* 2007;37:61–70. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672007000100007>.
- [43] Figueiró CG, Carneiro ACO, Santos GR, Carneiro APS, Fialho LF, Magalhães MA. Characterization of charcoal produced in industrial rectangular furnaces. *Rev Bras Ciências Agrárias* 2019;14:e5659. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5659>.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica colorimétrica se mostrou promissora na segregação dos resíduos madeireiros, pois separou madeiras residuais com maiores níveis de pigmentação vermelha (a^*) como mais adequadas, devido a maior densidade básica e densidade energética.

Madeiras nativas tem sua performance energética mais influenciada pelos extrativos totais, pois afetam positivamente o poder calorífico das madeiras. Além disso, os extrativos das madeiras nativas apresentaram maior variação interespecífica, se

comparada a lignina total. Estes constituintes químicos influenciaram positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o balanço de massa da carbonização, dessa forma, resíduos madeireiros com alto teor de extrativos totais devem ser priorizados para bioenergia na Amazônia.

Esse estudo revelou que os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável devem ser qualificados antes de serem utilizados para objetivos energéticos, pois a utilização de madeiras residuais com propriedades similares otimiza a geração de energia nos sistemas energéticos na Amazônia. Nessa perspectiva, o agrupamento de resíduos com base na análise de componentes principais mostrou ser promissor para bioenergia.

A segregação dos resíduos para carbonização com base na técnica multivariada promoveu ganhos reais em massa e volume de carvão vegetal em fornos de alvenaria. Os índices de conversão foram satisfatórios para os resíduos segregados, o que culminou em menor conteúdo de madeira residual enfiada para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal. Estes resultados são relevantes para auxiliar a negociação do carvão vegetal, pois os resíduos agrupados produziram carvão vegetal para serem comercializados com base na massa e volume.

A segregação da madeira residual mostrou ganhos relevantes na produtividade dos fornos de alvenaria na Amazônia. Os novos estudos devem abordar: (i) pré-tratamentos dos resíduos do manejo florestal para a redução da umidade; (ii) viabilidade econômica da segregação dos resíduos; (iii) redução do empirismo na condução da carbonização dos resíduos nos fornos de alvenaria por meio do controle de temperatura; (iv) qualidade do carvão vegetal dos resíduos madeireiros segregados em fornos de alvenaria; e (v) estudos térmicos (cinética de degradação térmica das madeiras residuais) dos resíduos. Esses são os próximos passos visando a maximização da produção energética na Amazônia em função da segregação dos resíduos do manejo florestal sustentável.