

Combustibilidade de carvões vegetais oriundos de resíduos do manejo florestal na Amazônia

Thiago de Paula Protásio¹; Elvis Vieira dos Santos¹; Eidy Regina Oliveira da Silva²; Eliana Martins de Sousa²; Carine Setter¹; Paulo Fernando Trugilho¹

¹ Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil; ² Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Parauapebas/PA, Brasil – thiago.protasio@ufla.br

Resumo: Este estudo avaliou a combustibilidade de carvões produzidos a partir de resíduos do manejo florestal na Amazônia, comparando-os ao carvão de *Eucalyptus*. Foram avaliadas as propriedades químicas, densidade energética e os parâmetros de combustibilidade do carvão de resíduos do manejo florestal na região do Pará, Brasil. A espécie com maior tempo de combustão foi *Parkia* spp. (91,67 min \pm 12,66 min), seguida por *Dinizia excelsa* (84,67 min \pm 11,37 min). Nos primeiros 20 minutos, o carvão de *Eucalyptus* apresentou perda de massa de cerca de 40,60% (\pm 7,24%). *Dinizia excelsa* obteve valores próximos (40,67% \pm 2,25%) no mesmo período. O carvão da espécie *Dinizia excelsa* apresentou parâmetros de combustibilidade mais semelhantes ao carvão comercial de *Eucalyptus* spp., com alto tempo de combustão e temperaturas máximas. Os materiais voláteis e a densidade energética do carvão vegetal influenciam aspectos importantes para a combustibilidade dos carvões vegetais provenientes de resíduos do manejo florestal.

Palavras-chave: Combustibilidade, Carvão vegetal, Energia da biomassa.

Combustibility of charcoal derived from forest management residues in the Amazonia

Abstract: This study evaluated the combustibility of charcoal produced from forest management residues in the Amazon, comparing them to *Eucalyptus* charcoal. The chemical properties, energy density, and combustibility parameters of species selected in the Pará region of Brazil were analyzed. The species with the longest combustion time was *Parkia* spp. (91.67 min \pm 12.66 min), followed by *Dinizia excelsa* (84.67 min \pm 11.37 min). In the first 20 minutes, the *Eucalyptus* charcoal showed a mass loss of approximately 40.60% (\pm 7.24%). *Dinizia excelsa* exhibited similar values (40.67% \pm 2.25%) during the same period. Charcoal from *Dinizia excelsa* displayed combustibility parameters most similar to commercial *Eucalyptus* spp. charcoal, with a long combustion time and high maximum temperatures. Volatile materials and energy density influence key aspects of the combustibility of charcoal derived from forest management residues.

Keywords: Combustibility, Charcoal, Biomass Energy.

1. INTRODUÇÃO

A produção de madeira para fins energéticos se destaca devido à demanda por carvão vegetal pela indústria siderúrgica nacional e à necessidade de fornecimento de lenha e cavacos, em nível industrial, nas diversas regiões do Brasil (IBÁ, 2019).

As espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas nos reflorestamentos energéticos do Brasil, devido às propriedades tecnológicas da madeira, comprovadamente recomendadas para a produção de energia, aliado às suas características de crescimento (Protásio *et al.*, 2014). No entanto, estes plantios não fornecem madeira para regiões com características edafoclimáticas específicas, como a região amazônica, que necessita de carvão vegetal para fornecimento de redutor nas siderurgias e uso domésticos. Contudo, a região amazônica apresenta grande quantidade de biomassas oriundos do manejo florestal.

No estado do Pará, cerca de 3.805.056 ha foram autorizados para planos de manejo florestal sustentável (PMFS) de agosto de 2016 a julho de 2017, totalizando uma extração de 2.732.296 m³ de madeira (BRASIL, 2019). Algumas estimativas de geração de resíduos do manejo florestal (BRASIL, 2018) utilizam que, para cada m³ de madeira extraída são gerados 1 metro cúbico de resíduos lenhosos. Dessa forma, é possível estimar uma alta quantidade de resíduos do manejo florestal disponíveis. No entanto, estes resíduos apresentam alta variabilidade (Lima *et al.*, 2020) e há a necessidade de estudos que esclareçam, mais profundamente, suas propriedades energéticas, subsidiando seu uso adequado nos processos industriais.

A combustibilidade do carvão é um fator importante que se relaciona com a reatividade do carvão à oxidação e liberação de energia (Girolamo *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2021). Essa característica é pouco conhecida para o carvão oriundo de biomassas residuais na Amazônia. Nesse sentido, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a combustibilidade de carvões produzidos a partir dos resíduos do manejo florestal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo, coleta do material e carbonizações

O estudo foi realizado em uma área de manejo florestal no estado do Pará, complexo Rio capim, área devidamente licenciada do Grupo Keilla. A empresa realiza

manejo florestal sustentável em áreas de floresta amazônica, possuindo selo FSC®, que certifica a legalidade e sustentabilidade dos procedimentos de extração de madeira. Atualmente, mais de 60% da área de manejo florestal administrada pela empresa, possui certificação florestal. Além da extração de madeira para serraria, a empresa utiliza resíduos do manejo florestal para produção de carvão vegetal.

A coleta do material para a presente pesquisa foi realizada no pátio de estocagem dos resíduos. Foram selecionados material residual lenhoso de 3 espécies florestais. Além disso, foi realizada uma comparação com o carvão vegetal de *Eucalyptus* comprado na cidade de Lavras-MG. A Tabela 1 mostra as espécies analisadas.

Tabela 1. Resíduos das espécies estudadas para análise da combustibilidade do carvão vegetal.

Nome científico	Família	Nome comercial
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Fabaceae	Angelim Vermelho
<i>Parkia</i> spp.	Fabaceae	Faveira
<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	Fabaceae	Melancieira
<i>Eucalyptus</i> sp.	Myrtaceae	Eucalipto

Destes resíduos, foram amostrados toretes de aproximadamente 30 cm, visando a carbonização. Para cada espécie foram amostrados 6 toretes, visando a carbonização de 1 torete por forno, ou seja, foram utilizados 6 fornos. Para a identificação do material das espécies depois da carbonização, os toretes foram cobertos em grades de aço galvanizado.

2.2 Análise da química imediata e poder calorífico do carvão vegetal

A química imediata foi obtida por meio do procedimento descrito na norma D1762-84 (ASTM, 2007). O carbono fixo é obtido conforme a equação 1:

$$TCF = 100 - (TMV + TCz) \quad (1)$$

Obteve-se o poder calorífico superior através de uma bomba calorimétrica conforme a norma E711-87 (ASTM, 2013). A partir do poder calorífico superior foi obtido o poder calorífico líquido (PCL) considerando 3% de umidade e percentual de hidrogênio 3,49% (Equação 2).

$$PCL (kcal/g) = \frac{PCS - 600 \times 3,49}{100} \times (1 - 0,03) - 600 \times 0,03 \quad (2)$$

A partir do produto entre PCL e taxa de perda de massa, foi possível estimar a energia liberada ao longo da combustão do carvão vegetal das espécies.

2.3 Densidade relativa aparente e densidade energética

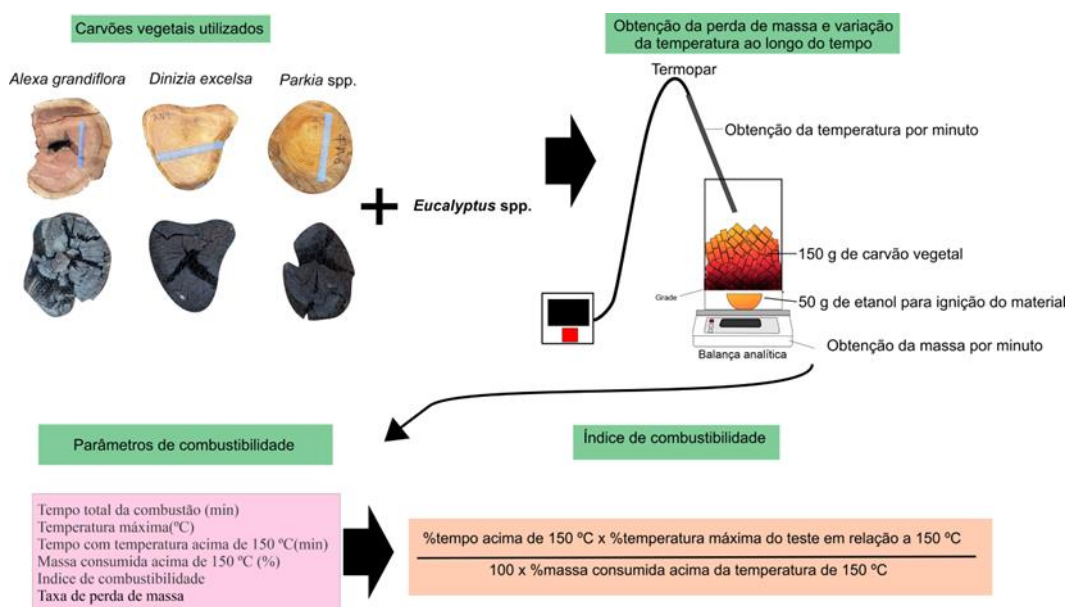
A densidade relativa aparente (DRA) foi obtida por meio do método de imersão. A partir do produto da PCL e DRA foi obtida a densidade energética do carvão vegetal (Equação 3).

$$\text{Densidade energética} = \text{PCL} \times \text{DRA} \quad (3)$$

2.4 Combustibilidade dos carvões

Foram realizadas análises de combustibilidade do carvão vegetal das espécies por meio da adaptação dos procedimentos descritos por Quirino (1991). Para essas análises foram realizadas um agrupamento do material obtido nos seis fornos por espécie. O procedimento para análise de combustibilidade é descrito na Figura 1.

Figura 1. Análise de combustibilidade dos carvões oriundos dos resíduos do manejo florestal.



Para as análises foram utilizados cerca de 150 g de material por espécie. As amostras de carvão foram colocadas em um recipiente de metal sob uma balança analítica com precisão de 2 casas decimais. Para mensuração da temperatura, foi utilizado um termopar. A temperatura foi mensurada a cada 1 minuto.

2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância, com seus devidos pressupostos, além da realização de correlações entre as características do carvão vegetal e os parâmetros de combustibilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de combustibilidade do carvão vegetal de resíduos do manejo florestal e uma comparação com o carvão de *Eucalyptus*. Houve diferenças estatísticas entre as espécies para o tempo total de combustão, temperatura máxima e ICOM. A espécie com maior tempo de combustão foi *Parkia* spp. (91,67 min \pm 12,66 min) seguido de *Dinizia excelsa* (84,67 min \pm 11,37 min).

Tabela 2. Parâmetros de combustibilidade do carvão de resíduos do manejo florestal e carvão de *Eucalyptus* comercial.

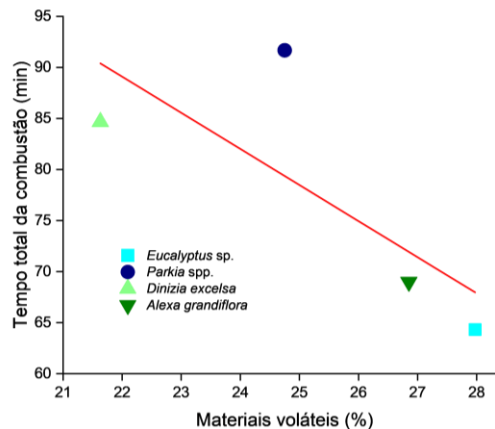
Espécie	Tempo total da combustão (min)	Temperatura máxima (°C)	Tempo com temperatura acima de 150 °C (min)	Massa consumida acima de 150 °C (%)	ICOM
<i>Dinizia excelsa</i>	84,67 (11,37)b	337,33 (73,53)a	29,00 (13,53)a	70,44 (16,20)a	0,64 (0,40)a
<i>Alexa grandiflora</i>	69,00 (16,64)c	360,00a (45,08)a	19,33 (10,79)a	67,45 (22,79)a	0,54 (0,21)a
<i>Parkia</i> spp.	91,67 (12,66)a	203,67 (56,41)b	8,00 (6,56)a	30,32 (21,43)a	0,09 (0,08)b
<i>Eucalyptus</i> comercial	64,33 (4,04)c	357,67 (52,08)a	24,67 (7,57)a	62,55 (15,30)a	0,85 (0,27)a

Letras iguais representam o mesmo grupo pelo teste de scott knott. Números entre parênteses são o desvio padrão. ICOM: índice de combustibilidade

Para uso doméstico e comercial, é ideal que o carvão vegetal apresente alto tempo de combustão e gere altas temperaturas. Apesar de *Parkia* spp. apresentar os maiores tempo de combustibilidade entre as espécies estudadas, ela apresentou as menores temperaturas máximas (203,67°C \pm 56,41°C) e menor tempo com temperaturas acima de 150 °C (8,00 min \pm 6,56 min), resultando em um menor índice de combustibilidade 0,09 \pm 0,08). As variações do tempo de combustão nas espécies parecem estar relacionadas ao percentual dos materiais voláteis nestes carvões, como mostra a Figura 2. A correlação foi de -0,76. A correlação com carbono fixo foi de apenas 0,18, contrariando estudos que sugerem que o percentual de

carbono fixo está associado maior tempo de combustão (Li *et al.*, 2018). Esta divergência parece estar associada ao teor de cinzas, que também apresentou correlação com o tempo de combustão. Um modelo considerando o teor cinzas e materiais voláteis para explicar o tempo de combustão, tem coeficiente de determinação de 0,98.

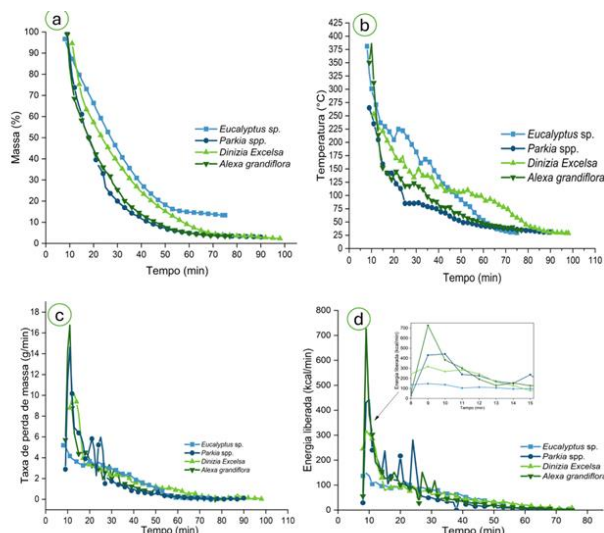
Figura 2: Correlação entre materiais voláteis e tempo de combustão.



A Figura 3 mostra a perda de massa, variação da temperatura, taxa de perda de massa e energia liberada em razão do tempo de combustão. Os primeiros 10 minutos são referentes a ignição do carvão por meio da queima de etanol, por isso não são mostrados no gráfico.

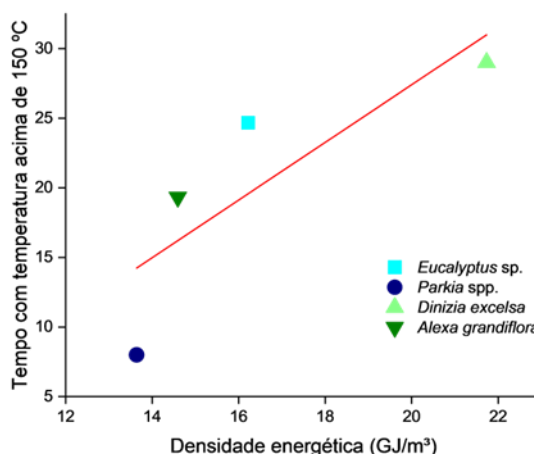
Nos primeiros 20 minutos, o carvão de *Eucalyptus* apresentou perda de massa de cerca de 40,60% ($\pm 7,24\%$). *Dinizia Excelsa* obteve valores próximos (40,67% $\pm 2,25\%$) no mesmo tempo. A perda de massa do carvão de *Parkia spp.* e *Alexa grandiflora* foram de 52,15% ($\pm 3,69\%$) e 57,43% ($\pm 5,09\%$), respectivamente. A temperatura de *Dinizia Excelsa* e *Eucalyptus* se manteve maior por mais tempo.

Figura 3. Perda de massa, variação da temperatura, taxa de perda de massa e energia liberada em razão do tempo de combustão



Entre 10 e 20 minutos, a taxa de perda de massa chega a até 16 g/min para o carvão de *Alexa grandiflora* e a apenas 5,8 g/min para *Eucalyptus*. Nas primeiras fases da combustão do carvão, após a ignição, há um aumento das taxas de perda de massa devido a formação e queima dos materiais voláteis (Massuque *et al.*, 2023). Nesse período também há as maiores liberações de energia durante a combustão (Fig. 3d). A densidade energética está relacionada a variações da liberação de energia entre as espécies como apresentado na Figura 4. As maiores quantidades de energia por unidade de volume facilitam essa maior liberação energética.

Figura 4. Correlação entre densidade energética e tempo com temperatura acima de 150°C.



4. CONCLUSÃO

O carvão da espécie *Dinizia excelsa* apresentou os parâmetros de combustibilidade mais semelhantes ao carvão comercial de *Eucalyptus spp.*, apresentando alto tempo de combustão e temperaturas máximas.

Os materiais voláteis e a densidade energética do carvão vegetal influenciam em aspectos importantes para a combustibilidade dos carvões vegetais de resíduos do manejo florestal.

Agradecimentos

Agradecemos à UFRA, UFLA, Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia de Biomassa (LAMBE) – UFLA, CAPES e CNPq. Essa pesquisa está sendo financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - processos n.º 406053/2022-7, 304165/2022-0 e 305109/2023-5).

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials **ASTM E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. ASTM International, Philadelphia: ASTM, 2013.

American Society for Testing Materials **ASTM D1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International, Philadelphia: ASTM, 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil em resumo: 2019**. Relatório técnico. Brasília: MAPA/SFB, 2019. 207 p. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/publicacoes/1737-florestas-do-brasil-em-resumo-2019>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira**. Nota técnica EPE 17/18. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/estudo-potencial-energetico-de-residuos-florestais-do-manejo-sustentavel-e-de-residuos-da-industrializacao-da-madeira>

GIROLAMO, A.; GRUFAS, A.; LYAMIN, I. *et al.* Ignitability and Combustibility of Yallourn Pyrolysis Char Blended with Pulverized Coal Injection Coal under Simulated Blast Furnace Conditions. **Energy & Fuels**, v. 30, n. 3, p. 1858–1868, 2016.

IBÁ – Industria brasileira de árvores. IBÁ Relatório anual 2019. São Paulo. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>

LI, Y.-H.; LIN, H.-T.; XIAO, K.-L. *et al.* Combustion behavior of coal pellets blended with Miscanthus biochar. **Energy**, v. 163, p. 180–190, 2018.

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

MASSUQUE, J.; MATAVEL, C. E.; PROTÁSIO, T. P. *et al.* Combustion performance of charcoal: a comparative study on Miombo woodland native species and *Eucalyptus grandis*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 17, p. 15789–15798, 2023.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A. *et al.* Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 42, n. 101, p. 113–127, 2014.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília, Brazil: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M. *et al.* Reactivity assessment of charcoal for use in silicon production. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 3, p. 537–546, 2021.