

VARIABILIDADE DA DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO VEGETAL EM CLONES DE EUCALIPTO

Henrique Rocha Lima¹; Dalton Longue Júnior²; Rafaella Dias Ramos³; João Vitor Morais da Silva⁴; Anna Júlia Leite de Oliveira⁵

¹Graduando em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (henlima18@gmail.com); ²Professor Titular, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (dalton@uesb.edu.br); ³Mestranda em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (ra.fadias@hotmail.com); ⁴Mestrando em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (joamoraisart@gmail.com); ⁵Graduanda em Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA (annajulialeiteuesb@gmail.com).

RESUMO

O carvão vegetal é um insumo importante para a indústria brasileira e a sua qualidade é influenciada por diversas propriedades tecnológicas da madeira e das variáveis do processo de carbonização. A densidade aparente do carvão se destaca como uma das mais importantes para avaliar sua qualidade, especialmente na sua utilização como biorredutor na siderurgia. Desta forma, compreender a variação da densidade aparente do carvão vegetal é essencial para aprimorar os processos industriais, pois essa propriedade afeta diretamente a resistência mecânica e o rendimento energético do carvão, além de influenciar sua distribuição no alto-forno de forma uniforme. O objetivo deste trabalho foi determinar a variabilidade da análise de densidade aparente do carvão vegetal de clones de eucalipto (I-144, 1404, 1296, Seminal, 1249 e VM058). Foram realizadas carbonizações em um forno elétrico (mufla) com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (licor pirolenhoso) com temperatura final de carbonização de 450 °C e taxa de aquecimento de 1,7 °C/min. A densidade aparente do carvão vegetal foi determinada de acordo com a norma NBR 11941. Os resultados indicaram que, entre os clones testados, o clone 1249 apresentou a maior média de densidade aparente do carvão vegetal (446 kg/m³) e a menor variabilidade interna (1,2%). Por outro lado, o clone I-144 apresentou a maior variabilidade interna (CV = 12,2%). Essas informações destacam a boa homogeneidade do carvão produzido pelo clone 1249 em termos de densidade aparente, tornando-o mais adequado para aplicações em processos industriais.

Palavras-chave: Clones; Energia da Biomassa; Propriedade Física; Qualidade do Carvão.

INTRODUÇÃO

O carvão vegetal possui diversas aplicações industriais e a biomassa florestal se destaca entre as fontes de biomassa utilizadas com destaque no setor (NEDEL *et al.*, 2018). O setor siderúrgico é o principal consumidor de carvão vegetal no Brasil, utilizado na produção de ferro-gusa e aço, com cerca de 85% da produção brasileira de carvão vegetal (BORGES, 2012).

O Brasil é o país que mais utiliza carvão vegetal em larga escala em sua matriz energética (ANATER, 2022). De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2017), a produção de ferro-gusa no Brasil utiliza cerca de 3 m³ de carvão vegetal por tonelada de gusa produzido,

representando aproximadamente 40% do custo de produção da gusa. A qualidade do carvão vegetal é determinada por várias propriedades, como densidade aparente, poder calorífico, resistência mecânica ou friabilidade, umidade e composição química (GUIMARÃES, 2021). Entre essas, a densidade relativa aparente destaca-se como a principal característica a ser analisada para determinar a qualidade do carvão vegetal, visto sua importância na aplicabilidade do carvão vegetal como biorredutor na siderurgia, pois uma maior densidade relativa aparente indica maior resistência à compressão e melhor desempenho na ocupação do alto-forno siderúrgico (PROTÁSIO *et al.*, 2021).

A problemática da heterogeneidade do carvão vegetal utilizado na siderurgia pode ser atribuída às variações nas propriedades da madeira utilizada como origem da matéria-prima, bem como aos diferentes parâmetros aplicados no processo de carbonização (TAROCCO *et al.*, 2021). Nesse contexto, estudar a variabilidade da densidade aparente do carvão vegetal é essencial para a otimização dos processos industriais, pois essa propriedade influencia diretamente a resistência mecânica e a eficiência energética do carvão vegetal, além de afetar a capacidade de ocupar o volume do alto-forno de maneira uniforme. Além disso, uma maior compreensão dessa variabilidade permite o desenvolvimento de técnicas de produção mais controladas, assegurando um produto de alta qualidade que atenda às exigências industriais. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi determinar a variabilidade da análise de densidade aparente do carvão vegetal em dois clones de eucaliptos, I-144 e 1249, cultivados na região Sudoeste da Bahia em simulação de laboratório.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área e amostragem da madeira

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), campus de Vitória da Conquista, BA. Foram utilizadas seis árvores de *Eucalyptus spp.*, incluindo cinco clones híbridos reproduzidos por via clonal e um *Eucalyptus urophylla* reproduzido por via seminal: I-144 (*Eucalyptus urophylla*), Seminal (*Eucalyptus urophylla*), 1404 (*Eucalyptus urophylla*), 1296 (*E. urophylla x E. grandis*), 1249 (*E. urophylla x E. grandis*) e VM058 (*E. camaldulensis x E. tereticornis*). As árvores, com 7 anos de idade e espaçamento de 3,0 m x 4,0 m, estavam localizadas no distrito de Pradoso, no município de Vitória da Conquista, Bahia (FIGURA 1). Durante a coleta, foram retirados três discos de madeira do tronco de cada árvore.

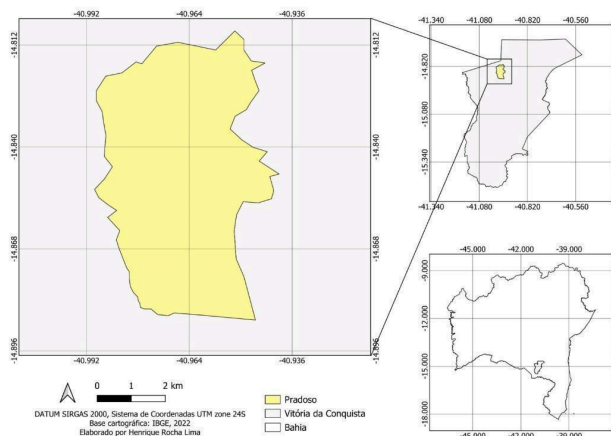


Figura 1 – Localização do cultivo de eucalipto em Vitória da Conquista – BA utilizado neste

estudo.

Carbonização da madeira

Foram realizadas carbonizações em um forno elétrico tipo mufla com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (licor pirolenhoso), com temperatura final de carbonização de 450 °C e taxa de aquecimento de 1,7 °C/min (ou 100 °C/h). Cerca de 350 g de amostras de madeira foram previamente secas em estufa (103 ± 2 °C) e a temperatura inicial do ensaio foi de 100 °C. Cada carbonização foi realizada com três repetições.

Caracterização física do carvão vegetal

A densidade aparente do carvão vegetal foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003), pelo método da imersão das amostras de carvão em água. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa 103 ± 2 °C por 24 horas e, após secas, retiradas da estufa e pesadas em balança analítica, conforme Figura 2. Foram realizadas cinco repetições de cada análise. A densidade aparente (0% umidade) foi calculada a partir da relação entre a massa seca da amostra de carvão vegetal (g) e o volume seco da amostra de carvão vegetal (cm³), conforme Equação 1.



Figura 2 – Ilustração da determinação da densidade aparente do carvão vegetal.

$$DRA = \frac{M_s}{V_s} \text{ Equação 1}$$

Sendo: DRA = densidade aparente da amostra do carvão vegetal (g/cm³); Ms = massa seca da amostra de carvão vegetal (g); e Vs = volume seco da amostra de carvão vegetal (cm³).

Análise estatística

A análise dos dados foi realizada por meio de estatística descritiva, utilizando como dados de saída para fins de avaliação, a média, o desvio padrão, coeficiente de variação, valor máximo e valor mínimo. As médias foram discutidas conforme Carneiro *et al.* (2013), que define padrão mínimo de qualidade para carvão vegetal, densidade aparente acima de 400 kg/m³.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da densidade aparente do carvão vegetal estão apresentados na Tabela 1. O clone 1296 apresentou a maior média de densidade aparente (432,3 kg/m³), indicando uma maior concentração de massa por volume. Por outro lado, o clone I-144 apresentou menor média de densidade aparente (381,1 kg/m³), indicando uma estrutura de carvão mais porosa. Segundo Silva

(2023), madeiras de menor densidade poderão apresentar maior conteúdo de umidade e, conseqüentemente, maior tempo na fase de secagem dos processos energéticos.

Tabela 1 – Análise estatística descritiva da densidade aparente dos carvões vegetais produzidos a partir de clones de eucaliptos cultivados na região Sudoeste da Bahia.

Clone	DENSIDADE APARENTE DO CARVÃO VEGETAL				
	Média (kg/m ³)	DP (%)	CV (%)	Max (kg/m ³)	Min (kg/m ³)
I-144	381,1	46,6	12,2	418,4	328,9
1404	408,4	13,3	3,3	420,2	394,0
1296	432,3	40,1	9,3	463,4	387,0
Seminal	374,1	8,5	2,3	380,6	364,4
1249	446,4	5,4	1,2	450,1	440,2
VM058	374,2	8,7	2,3	380,6	364,4

Em que: DP (desvio padrão), CV (coeficiente de variação), Max (valor máximo) e Min (valor mínimo).

Na Figura 3 é possível observar a variabilidade da densidade aparente do carvão vegetal para diferentes clones de *Eucalyptus*. Os clones 1404, Seminal, 1249 e VM058 apresentaram menores variabilidades da densidade aparente do carvão vegetal, com valores variando entre 394 kg/m³ e 420 kg/m³ (CV = 3,3%), entre 364 kg/m³ e 380 kg/m³ (CV = 2,3%), entre 440 kg/m³ e 450 kg/m³ (CV = 1,2%) e entre 364 kg/m³ e 380 kg/m³ (CV = 2,3%), respectivamente. Dentre estes, o clone 1249 apresentou menor variabilidade interna (mínimo de 440 kg/m³ e máximo de 450 kg/m³) e a maior média (446 kg/m³) da densidade aparente do carvão vegetal, indicando uma maior homogeneidade do material na produção do carvão vegetal.

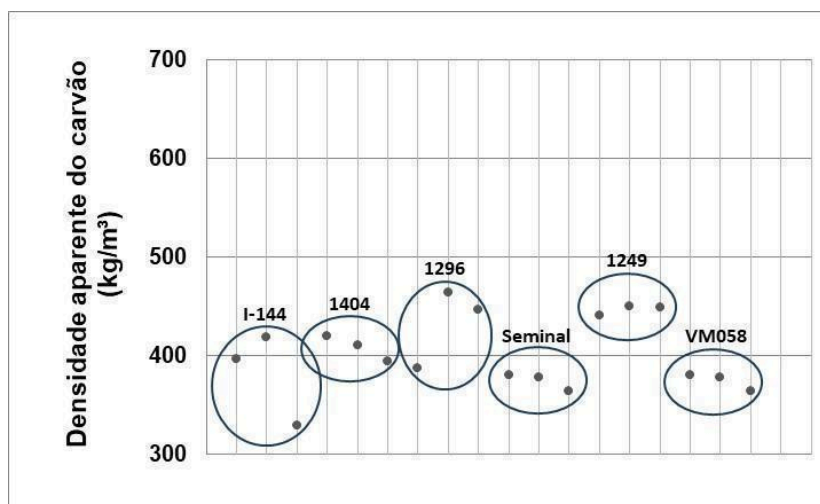


Figura 3 – Variação da densidade aparente do carvão vegetal de sete clones de *Eucalyptus*.

Segundo Santos (2008), é desejável que a densidade aparente do carvão vegetal não seja inferior a 400 kg/m³, para uso siderúrgico. Assim, o carvão vegetal proveniente dos clones 1404, 1296 e 1249 apresentaram valores médios satisfatórios. Os clones I-144 e 1296 apresentaram maior variabilidade da densidade aparente do carvão vegetal, variando entre 328 kg/m³ e 418 kg/m³ (CV 46,6%) e entre 387 kg/m³ e 463 kg/m³ (CV = 9,3%), sugerindo que as amostras de carvão destes clones podem apresentar características mais heterogêneas. As diferenças na densidade aparente do

carvão vegetal dos clones estudados podem ser atribuídas principalmente à densidade básica da madeira. Isso se deve ao fato de que, quanto maior a densidade básica da madeira, maior será a densidade aparente do carvão vegetal resultante (PEREIRA *et al.*, 2016). Também foi observado por Santos (2010) e Frederico (2009) que encontraram maiores valores de densidade aparente do carvão vegetal para os clones que apresentaram maior densidade básica da madeira.

A variação nos valores médios de densidade aparente do carvão vegetal variou entre 328 kg/m³ e 463 kg/m³. Valores próximos foram constatados por Ramos *et al.* (2023), que avaliaram a qualidade do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* e obteve uma variação de densidade aparente do carvão vegetal de 356 a 458 kg/m³. A densidade aparente média do carvão obtida neste trabalho (402 kg/m³) foi alta e superior ao citado por Pereira *et al.* (2016), que em 6 clones de *Eucalyptus* encontraram o valor médio de 383 kg/m³.

Cabe salientar que, a avaliação da densidade aparente assegura a utilização eficiente e adequada do carvão vegetal em diversos processos metalúrgicos e, desde que não impacte negativamente nas demais propriedades, é desejável que a densidade seja a maior possível (RAMOS *et al.*, 2023). Ademais, fatores como as condições de crescimento das árvores e os parâmetros da carbonização devem ser considerados na determinação da densidade aparente do carvão vegetal.

CONCLUSÃO

Dessa forma, foi possível concluir que existe variabilidade da densidade aparente do carvão vegetal nos clones estudados. O clone 1249 apresentou menor variabilidade e a maior média da densidade aparente, indicando maior homogeneidade das amostras e desejável para sua utilização em processos industriais, onde a uniformidade do carvão vegetal é essencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANATER, M. J. N. **Desempenho ambiental e energético da produção de carvão vegetal para uso doméstico no Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Normas Técnicas. **NBR 11941**, densidade básica da madeira, 6p, Rio de Janeiro, 2003.

BORGES, M. A. *et al.* **Ferro-gusa: valor desagregado**. Agência Pública, 27 nov. 2012.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. **In: Bioenergia & Biorrefinaria – Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais**. SANTOS, F.; COLLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Ed.). Viçosa: Os editores, p. 429-458, 2013.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GUIMARÃES, L. K. **Carbonização de mix de resíduos de exploração de plano de manejo florestal e análises qualitativas do carvão**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Perfil do Ferro-Gusa. Brasília: MME, 2017.

NEDEL, T. *et al.* Energias renováveis: uma revisão sobre o potencial de utilização da biomassa florestal no Brasil. In: **Congresso Internacional de Bioamassa–CIBIO**. Curitiba, PR, 2018.

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, n.2, p.545-557, 2016.

PROTÁSIO, P. T. *et al.* Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando à produção de carvão vegetal siderúrgico. In: I Workshop Online Florestais de *Tachigali vulgaris*, 2021, Colombo. **Anais** [...]. Colombo, p. 114-124.

RAMOS, D. C. *et al.* Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, n.1, p.1-27, 2023.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 2008, Belo Horizonte: UFMG. **Anais**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clone de *Eucalyptus***. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SILVA, E. R. **Produção e qualidade de carvão vegetal oriundo dos resíduos do manejo florestal sustentável**. 2023. 40 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, PA, 2023.

TAROCCO, H. A. *et al.* Resíduos da indústria madeireira como alternativa bioenergética no sul do Tocantins. **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**, v. 2, n.1, p.56-71, 2021.