

## **Influência da taxa de aquecimento e temperatura na carbonização de eucalipto cultivado no norte da Bahia**

Rafaella D. Ramos<sup>1</sup>, Dalton L. Junior<sup>1</sup>, Laura da S. Rocha<sup>1</sup>, João V. M. da Silva<sup>1</sup>,  
Mara L. A. Valle<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, <sup>2</sup> Universidade Federal do Sul da Bahia  
ra.fadiaz@hotmail.com

**Resumo:** O carvão vegetal de cultivos florestais é um recurso energético renovável e sustentável, sendo uma alternativa ao carvão mineral na indústria siderúrgica. No entanto, o processo de carbonização da madeira é complexo, influenciado por variáveis como temperatura final, tempo e taxa de aquecimento, que afetam o desempenho e a qualidade do carvão produzido. Este estudo avaliou o efeito da temperatura final e da taxa de aquecimento da carbonização de madeiras de eucalipto cultivadas na região Norte da Bahia no rendimento do processo. Foram realizadas carbonizações em um forno elétrico com condensador e coletor de gases condensáveis, em cinco temperaturas finais (280, 330, 380, 430, 480 °C) e duas taxas de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min). Os resultados mostraram que o aumento da temperatura proporcionou uma redução do rendimento gravimétrico em carvão e um aumento no rendimento dos gases não condensáveis, intensificado pelo uso de menor taxa de aquecimento.

**Palavras-chave:** Carvão vegetal, Gases não condensáveis, Licor Pirolenhoso.

## **Influence of heating rate and temperature on eucalypt carbonization cultivated in the north of Bahia**

**Abstract:** Charcoal from cultivated forests is a renewable and sustainable energy resource, serving as an alternative to mineral coal in the steel industry. However, the wood carbonization process is complex, influenced by variables such as final temperature, total time, and heating rate, which affect the performance and quality of the produced charcoal. This study evaluated the effect of the final carbonization temperature and heating rate on eucalyptus wood cultivated in the north region of Bahia on the process yield. Carbonizations were performed in an electric furnace with a water-cooled condenser and condensable gas collector, at five final temperatures (280, 330, 380, 430, 480 °C) and two heating rates (0.84 °C/min and 1.74 °C/min). The results showed that the increasing temperature provided a reduction on gravimetric yield of charcoal and increasing on the non-condensable gases yield, intensified by the use of low heating rate.

**Keywords:** Charcoal, Non-condensable gases, Pyroligneous extract.

### **1. INTRODUÇÃO**

O Brasil é um dos principais produtores e consumidores de carvão vegetal no mundo, com potencial para aumentar ainda mais sua produção devido a sustentabilidade atingida pela substituição do carvão mineral. Isso se deve ao fato de

que a siderurgia brasileira utiliza o carvão vegetal como uma matéria-prima importante, devido ao seu excelente desempenho como combustível e agente redutor (Loureiro, 2021). Este carvão vegetal é essencial para várias cadeias produtivas, tornando o Brasil destaque com 7,0 milhões de toneladas fabricadas em 2022 (Ibá, 2023).

A carbonização da madeira é um processo termoquímico de transformação da madeira em carvão vegetal através da ação do calor em temperaturas muito elevadas, entre 300 e 500 °C. Durante esse processo, os líquidos presentes na madeira são volatilizados em temperaturas mais baixas, e os demais compostos sólidos pertencentes a parede celular são decompostos em gases em temperaturas mais elevadas, resultando ao final do processo em um sólido formado quase exclusivamente por carbono fixo. Esse material sólido final é conhecido como carvão vegetal (Machado, 2014).

No Brasil, a maioria dos fornos para produção de carvão vegetal é projetada para aproveitar apenas o carvão vegetal, liberando os líquidos pirolenhosos e os gases não condensáveis, na forma de gases totais, diretamente na atmosfera. Isso não só representa um grande desperdício dos subprodutos da madeira, mas também causa um significativo impacto ambiental devido à liberação de gases do efeito estufa na atmosfera (Monteiro, 2006).

Vale ressaltar que, hoje em dia, os processos de carbonização são realizados com maior nível de controle, mas ainda existe dificuldade no domínio do processo, principalmente devido às variáveis como temperatura final e taxa de aquecimento, que influenciam no desempenho energético do processo e na qualidade do carvão vegetal produzido (Abreu Neto *et al.*, 2020).

Portanto, o estudo da temperatura final de carbonização não deve ser visto apenas para obter um produto com bom rendimento e melhor qualidade, mas também por influenciar nas emissões gasosas na atmosfera.

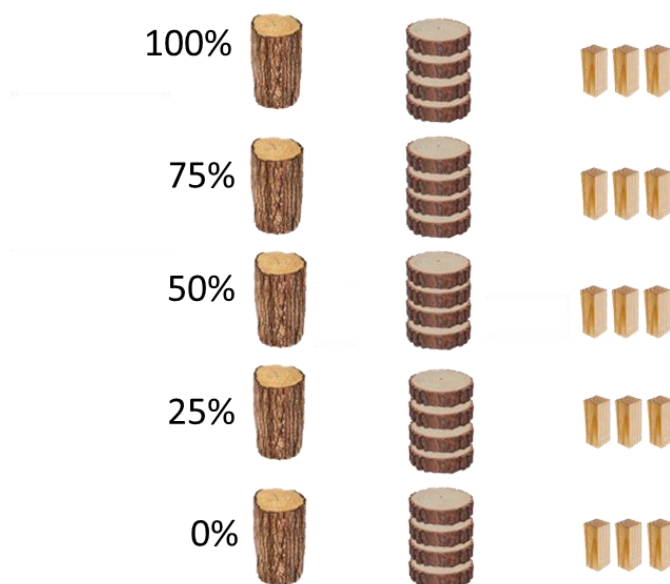
Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura final e da taxa de aquecimento no processo de carbonização de madeiras de eucalipto cultivadas na região Norte da Bahia.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 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), no campus de Vitória da Conquista, BA. Foram coletadas cinco árvores de *Eucalyptus* spp. com 6,2 anos, espaçamento de 4,0 x 1,92 m e densidade de 519 kg/m<sup>3</sup>, localizado na região Litoral Norte da Bahia. Durante a coleta, discos de madeira foram retirados em diferentes posições do tronco: a 1,3 m (DAP), e os outros a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo = 8 cm), conforme Figura 1.

**Figura 1.** Método de amostragem empregado para o fracionamento do tronco.



Os discos foram fragmentados em amostras com dimensões de aproximadamente 2,0 cm x 2,7 cm x 4,3 cm (altura x largura x comprimento) e misturados para homogeneização de todo o material (*mix* de madeira). Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de carbonização.

### 2.2 Carbonização da madeira

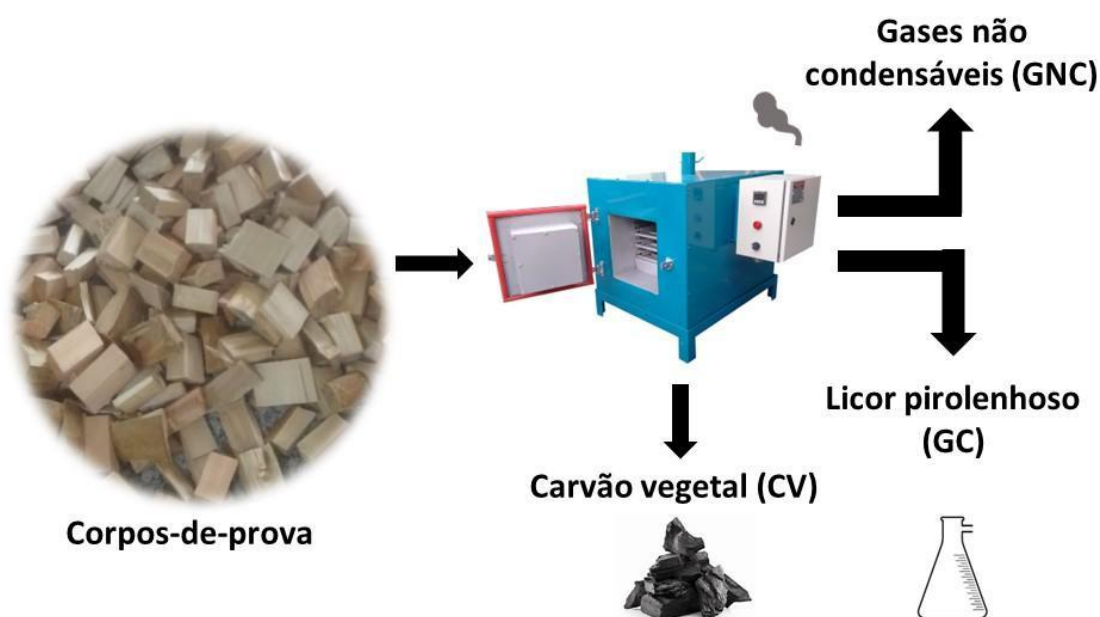
Foram realizadas carbonizações em um forno elétrico tipo mufla com cerca de 335 g de madeira secas em estufa ( $103 \pm 2$  °C), com temperatura inicial do ensaio de 100 °C e em cinco temperaturas finais de carbonização (280, 330, 380, 430, 480 °C) com taxa de aquecimento de 50 °C/h (0,8 °C/min) e 100 °C/h (1,7 °C/min). Ao sistema foi acoplado um condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (licor

pirolenhoso), e cada carbonização foi realizada com três repetições.

### 2.3 Avaliação dos processos de carbonização e da qualidade do carvão vegetal

Os processos de carbonização da madeira (Figura 2) foram avaliados pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal (CV), conforme Equação 1; rendimento gravimétrico em gases condensáveis (GC), conforme Equação 2; e rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (GNC), conforme Equação 3.

**Figura 2.** Processo de carbonização da madeira e seus produtos/resíduos finais.



$$CV = \frac{M_{cv}}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Sendo: CV = rendimento gravimétrico de carvão vegetal (%);  $M_{cv}$  = massa do carvão (g);  $M_m$  = massa da madeira (g).

$$GC = \frac{M_{GC}}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Sendo: GC = rendimento gravimétrico de gases condensáveis (%);  $M_{GC}$  = massa de gases condensáveis (g);  $M_m$  = massa da madeira (g).

$$GNC = 100 - (CV + GC) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo: GNC = rendimento gravimétrico de gases não condensáveis (%); CV = rendimento gravimétrico de carvão vegetal (%); GC = rendimento gravimétrico de gases condensáveis (%).

## 2.4 Análise estatística

A análise dos dados foi realizada por meio de estatística descritiva, com ajustes de modelo de regressão com a utilização do software Microsoft Office EXCEL (2007).

Os modelos de regressão foram comparados pelo Teste de Identidade de Modelos, de acordo com Regazzi (2003), para testar a igualdade das taxas de aquecimento. Em caso de igualdade, um modelo comum foi utilizado para representar toda a variação das taxas de aquecimento.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

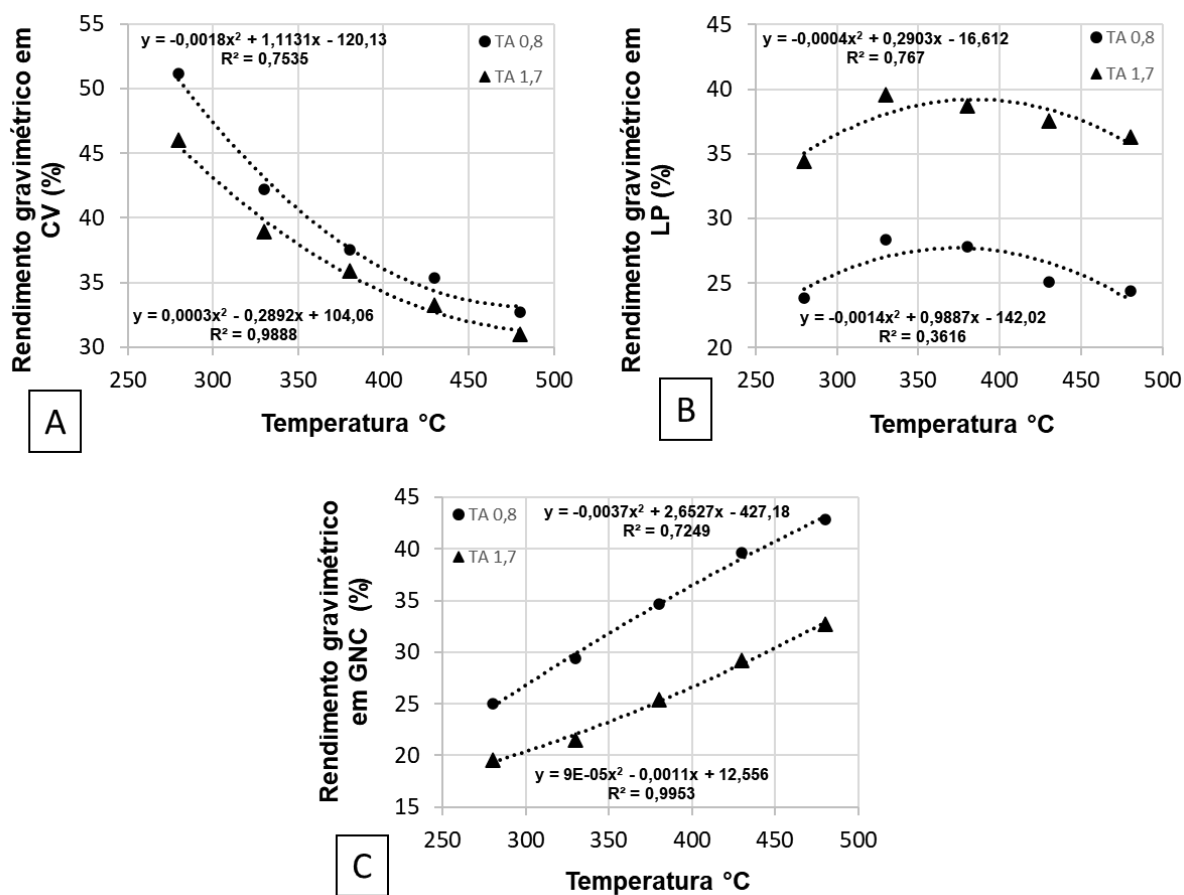
Com base neste estudo, observou-se que o rendimento gravimétrico do carvão vegetal apresentou uma tendência de diminuição com o aumento da temperatura final de carbonização para ambas as taxas de aquecimento testadas. Para uma taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, o rendimento variou de 51,2% a 32,7% para uma variação de temperatura final de 280 °C para 480 °C, e para uma taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, uma variação de 46,0% a 31,0% na mesma faixa de temperatura, conforme ilustrado na Figura 3A.

O valor do coeficiente de determinação para taxa de aquecimento de 1,7 °C/min ( $R^2 = 0,99$ ) indicou uma boa correlação entre os dados, ou seja, 98,8% da variação apresentada pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi explicada pela variação da temperatura final de carbonização, através do ajuste de um modelo polinomial de segundo grau, embora existam outros fatores que também influenciam o rendimento gravimétrico.

Esse comportamento corrobora com o que foi relatado por Pereira (2021) em seu estudo sobre a relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp, e pode ser explicado pela aceleração e intensificação dos processos de gaseificação e volatilização dos compostos de madeira em decorrência da elevação de temperatura, levando a uma menor quantidade de carvão sólido (Assis, 2016).

**Figura 2.** Influência da taxa de aquecimento (0,8 e 1,7 °C/min) e da temperatura final de carbonização (280 a 480 °C) no rendimento gravimétrico do carvão (A); rendimento gravimétrico em gases condensáveis (licor pirolenhoso) (B) e rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (C).





Com relação ao rendimento em gases condensáveis (licor pirolenhoso - GC), observou-se uma tendência de aumento nas menores temperatura, estabilidade em temperaturas medianas e decréscimo em elevadas temperaturas de carbonização. Para uma taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, o rendimento variou em uma menor escala entre 24,0% e 24,5%, e para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, o rendimento variou em uma maior escala entre 34,4% e 36,3%, conforme Figura 3B.

O valor do coeficiente de determinação para os modelos de ambas as taxas foi considerado bom, mostrando que a variação da temperatura sozinha tem uma menor relação no rendimento em licor pirolenhoso. Essa mesma tendência foi encontrada por Assis (2016) em que o rendimento em licor pirolenhoso se manteve parcialmente estável entre 300 e 450 °C.

Por fim, o rendimento em gases não condensáveis (GNC) mostrou uma tendência de aumento com o aumento da temperatura final de carbonização. Para uma taxa de aquecimento de 0,8 °C/min, o rendimento variou em uma maior escala entre 25,0% e 42,8%, e para a taxa de aquecimento de 1,7 °C/min, o rendimento variou em uma menor escala entre 19,6% e 32,7%, conforme a Figura 3C.

Esse mesmo comportamento foi observado por Costa *et al.* (2020), em que o

aumento da temperatura final até 700 °C proporcionou a diminuição do CV e aumentos do GC e GNC. Isto pode ser justificado pela maior decomposição térmica dos constituintes da madeira em maiores temperaturas, resultando numa maior liberação dos gases na atmosfera (Pereira *et al.*, 2013).

O Teste de Identidade de Modelos indicou que os modelos ajustados para cada taxa de aquecimento (0,8 °C/min e 1,7 °C/min) não foram significativamente iguais, o que implica que as taxas de aquecimento têm um efeito significativo nos resultados do processo de carbonização. Essa diferença pode ser notada no rendimento gravimétrico do carvão vegetal, em que na taxa de 0,8 °C/min apresentou um CV sempre superior, para todas as temperaturas testadas. Isso indica que a velocidade de aquecimento da carbonização também afeta a quantidade de carvão produzido.

É importante ressaltar que o aumento dos gases não condensáveis devido ao aumento da temperatura final de carbonização apresenta implicações ambientais e de reaproveitamento da madeira negativas, uma vez que esses gases são compostos por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), entre outros, que são lançados na atmosfera e não recuperados para reuso.

Assim, aumentar a temperatura da carbonização não deve ser considerada apenas como uma solução rápida para obter um produto com alto teor de carbono fixo, mas também uma forma de gerenciar a qualidade ambiental. É essencial encontrar um equilíbrio na temperatura e na taxa de aquecimento para produzir um material que atenda às exigências do setor siderúrgico, mantendo a produtividade dos fornos e minimizando os impactos negativos ao meio ambiente.

#### 4. CONCLUSÃO

O aumento da temperatura final de carbonização influenciou na redução do rendimento gravimétrico em carvão e contribuiu para o aumento do rendimento do licor pirolenhoso.

Uma menor taxa de aquecimento (0,8 °C/min) proporcionou um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, entretanto uma maior liberação de gases na atmosfera.

#### 5. REFERÊNCIAS

ABREU NETO, R.; ASSIS, A. A.; BALLARIN, A. W. *et al.* Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. **SN Applied Sciences**. v. 2, n. 6, p. 1–9, 2020.

ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A. *et al.* Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**. v. 50 n. 3, p. 519-536, 2016.

COSTA, J. M. F. N.; CARNEIRO, A. C. O.; LADEIRA, A. M. M. *et al.* Influência da temperatura da pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v. 11, n. 1, 2020.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F. *et al.* Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2007. 37 p., ISSN 1517-5111.

IBÁ – Indústria Brasileira de Produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2023 ano base 2022**. Brasília: 2023. 91 p.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A. *et al.* Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**. v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021.

MACHADO, G. O.; VOGEL, F.; SILVA, M. M. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência**. v. 10, n. 1, p. 83-96, 2014.

MONTEIRO, M. A. Em busca de carvão vegetal barato: O deslocamento de siderúrgicas para a Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**. v. 9, n. 2, p. 55-97, 2006. UFPA - Acre-PA ISBN 1516-6481.

PEREIRA, A. K. S. **Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus spp.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2021.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L. *et al.* Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**. v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. **Revista Ceres**. v 50, n 287, 2003.