

Artigos

Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses

Wood and charcoal quality of four *Eucalyptus* clones at 108 and 120 months

Diego Correa Ramos¹ , Angélica de Cássia Oliveira Carneiro¹ ,
Humberto Fauller de Siqueira¹ , Aylson Costa Oliveira^{II} ,
Bárbara Luísa Corradi Pereira^{II} 

¹Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

^{II}Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil

RESUMO

Cenários de instabilidade econômica e redução do consumo de carvão vegetal, como as ocorridas em 2009 e 2016, afetam a produção deste insumo, resultando na manutenção das florestas de eucalipto e aumento da idade de corte. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da madeira de quatro clones de *Eucalyptus* (clones 1, 2, 3 e 4) com idades entre 108 e 120 meses e do carvão vegetal produzido em forno retangular. Para caracterização da madeira, foram avaliadas a relação cerne/alburno, densidade básica, massa seca por hectare.ano e composição química. As carbonizações foram realizadas em forno retangular, com capacidade de 210 m³ de madeira, e determinaram-se o rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal: densidade do carvão vegetal, granulometria e porcentagem de finos, índice de friabilidade, análise imediata, além da massa de carvão produzida por hectare.ano. Verificou-se efeito significativo dos clones na densidade básica e massa seca, com valores de 494 a 589 kg m⁻³ e 12,47 a 23,34 ton.ha⁻¹, respectivamente. O rendimento médio em carvão vegetal não diferiu entre os clones e foi igual a 34,1%, enquanto o rendimento em atíço variou de 3,2% para o clone 4 a 10,7% para o clone 3. Os clones 1 e 3 apresentaram em média 65% do volume de carvão vegetal na maior faixa granulométrica (>30 mm), enquanto os clones 2 e 4 tiveram 49,5% nessa granulometria. O carvão vegetal dos quatro clones foi de média resistência e a densidade aparente variou de 356 a 458 kg.m⁻³, com maior valor para o clone 3. Os clones 1 e 2 apresentaram a maior produção de carvão vegetal, 7,5 toneladas por hectare.ano. O carbono fixo não variou entre os clones, apresentando média igual a 76,92%. Os clones de *Eucalyptus* nas idades de 108 e 120 meses apresentam propriedades da madeira adequadas para a produção de carvão vegetal, alcançando rendimento gravimétrico e qualidade satisfatórios para uso metalúrgico, destacando-se os clones 1 (híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*) e 3 (híbrido de *E. urophylla* x *E. camaldulensis*).

Palavras-chave: Forno retangular; Idade de corte; Densidade



ABSTRACT

Economic instability scenarios and reduction in charcoal consumption, such as those that occurred in 2009 and 2016, affect production and result in the maintenance of eucalyptus forests and an increase in the rotation age. The objective of this work was to evaluate the quality of wood from four Eucalyptus clones (clones 1, 2, 3, and 4) at the ages of 108 and 120 months and the charcoal produced in a rectangular kiln. We evaluated the heart/sapwood ratio, basic density, dry mass per hectare.year, and chemical composition. The carbonizations were performed in a rectangular kiln (210 m³ of wood). We determined the gravimetric yield and the charcoal properties: density, particle size and percentage of fines, friability index, proximate analysis, and mass of charcoal produced per hectare.year. We verified the significant effect of clones on basic density and dry mass, whose variations were from 494 to 589 kg m⁻³ and 12.47 to 23.34 ton.ha⁻¹, respectively. The charcoal yield did not differ among clones (34.1%), while the yield of semicarbonized wood varied from 3.2% (clone 4) to 10.7% (clone 3). The particle size of 65% of the charcoal volume of clones 1 and 3 was greater than 30 mm, and 49.5% of clones 2 and 4. We found medium mechanical resistance for charcoal from all four clones. The apparent density ranged from 356 to 458 kg.m⁻³, with the highest average value for clone 3. We found the highest charcoal production for clones 1 and 2, 7.5 tons per hectare.year. The fixed carbon did not vary among clones (76.92%). The wood properties of the Eucalyptus clones at ages 108 and 120 months are suitable for charcoal production for metallurgical use. Clones 1 (a hybrid of *E. urophylla* x *E. grandis*) and 3 (a hybrid of *E. urophylla* x *E. camaldulensis*) stood out from the others.

Keywords: Rectangular kiln; Rotation age; Density

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de carvão vegetal em 2020 foi de 4,45 milhões de toneladas, 12% do total mundial, e 94% desse total foi proveniente de plantações florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* (IBÁ, 2021). Sabe-se que o Brasil é o único país que produz carvão vegetal em larga escala para ser utilizado na indústria, destinado majoritariamente ao setor metalúrgico, como termorreduzidor para fabricação de ferro-gusa, aço, ferro-ligas e silício metálico (RODRIGUES; BRAGHINI JÚNIOR, 2019), enquanto nos demais países predomina-se a utilização de carvão mineral. O uso de carvão vegetal na indústria metalúrgica reduz drasticamente as emissões de SO₂ e tem um grande potencial para reduzir o impacto ambiental de emissões de CO₂, o que contribui para a sustentabilidade ambiental de toda a cadeia produtiva.

As principais indústrias produtoras de carvão vegetal do Brasil têm utilizado os fornos retangulares para o processo de carbonização. Os fornos retangulares são



construídos em alvenaria e possuem grande capacidade volumétrica, entre 150 a 550 metros cúbicos (m³) de madeira, o que possibilita a mecanização das atividades de carregamento e descarregamento; além disso, os rendimentos gravimétricos em carvão considerados satisfatórios, entre 30 a 35% (RODRIGUES; BRAGHINI JÚNIOR, 2019). No entanto, verifica-se, nesses fornos variação na taxa de aquecimento, distribuição dos gases e temperatura de carbonização, devido, principalmente, às suas grandes dimensões, que podem influenciar além do rendimento, a qualidade do carvão vegetal produzido.

Além das variações dos parâmetros do processo de carbonização, as propriedades da madeira utilizada como matéria prima podem influenciar no rendimento e na qualidade do carvão vegetal e, conseqüentemente, em sua aplicação. Nesse contexto, visando a redução da heterogeneidade da matéria-prima, redução de custos, melhoria da qualidade do carvão vegetal para uso metalúrgico, a madeira adequada para a produção de carvão vegetal deve apresentar elevados valores de densidade básica e poder calorífico, baixo teor de minerais, baixa relação cerne/alburno, alto teor de lignina e baixa relação siringil/guaiacil (S/G) (COSTA *et al.*, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2016). Ressalta-se que é importante que essas características estejam presentes nos materiais genéticos mais produtivos, que geram maior volume de madeira destinada à carbonização.

A produtividade e propriedades da madeira se diferenciam em função da espécie e da idade, e, por conseguinte, acarretam em variação na qualidade do carvão vegetal. Vários estudos têm sido realizados em árvores de *Eucalyptus*, em idades de 5 a 7 anos (60 - 84 meses), correspondentes à idade de corte adotada pelas empresas florestais (CASTRO *et al.*, 2016; PROTÁSIO *et al.*, 2015; CARNEIRO *et al.*, 2014). No entanto, em cenários de instabilidade, por razões econômicas e mercadológicas, ocorre considerável oscilação no preço do carvão vegetal no Brasil. Por consequência da desvalorização do produto, pode ocorrer uma redução na produção, ocasionando a redução do consumo de madeira e conseqüente manutenção das florestas de eucalipto, elevando a idade



de corte. Nesse sentido, torna-se importante a realização de estudos de caracterização tecnológica da madeira e do carvão de clones de *Eucalyptus* em idades avançadas para verificar se o aumento do ciclo de corte promoverá alterações, seja no rendimento ou na qualidade do carvão vegetal produzido.

Em razão das alterações nas propriedades da madeira decorrente do aumento do ciclo de corte e da influência da qualidade da madeira na carbonização e da heterogeneidade dos aspectos de controle da carbonização em fornos retangulares, tornam-se necessários estudos que avaliem conjuntamente esses dois fatores. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da madeira de quatro clones de *Eucalyptus*, com idades entre 108 e 120 meses, determinar o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido em um forno retangular de alvenaria.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material biológico e amostragem

Foram utilizadas madeiras de quatro materiais genéticos do gênero *Eucalyptus*, com idade entre 108 e 120 meses (Tabela 1), provenientes de plantios comerciais com espaçamento de 3,0 x 3,0 m, localizados na região norte do estado de Minas Gerais.

Tabela 1 - Identificação dos clones de *Eucalyptus* e valores médios de produção volumétrica

Clone	Cruzamento	Idade (meses)	Volsc* (m ³ .ha ⁻¹)	IMA (m ³ . ha ⁻¹ ano ⁻¹)
1	Híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	108	361,4	40,15
2	Híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	108	425,1	47,23
3	Híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>	120	211,5	21,15
4	Híbrido <i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	120	344,1	34,41

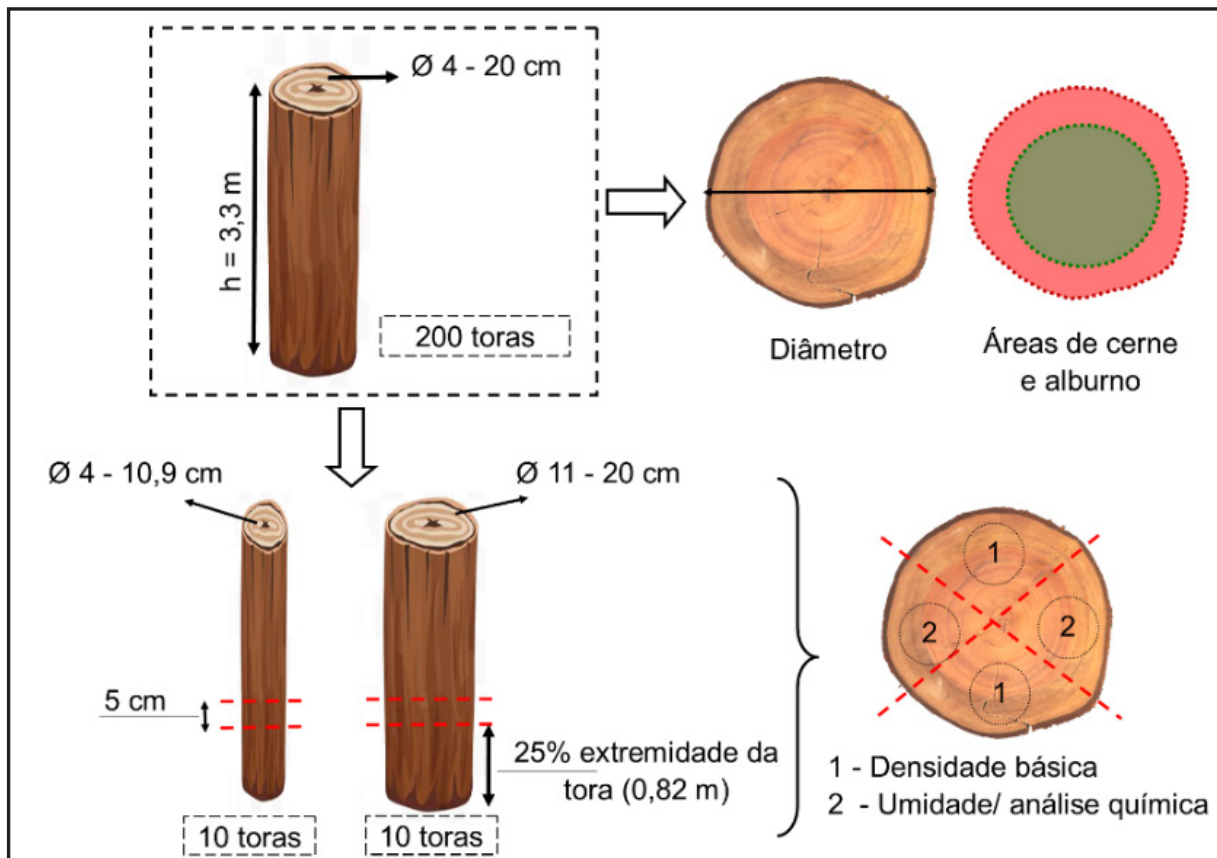
Fonte: Autores (2022)

Em que: Volsc = Volume médio por hectare sem casca; IMA = Incremento Médio Anual.



Foram selecionadas toras com diâmetros entre 4 e 20 cm e comprimento de 3,30 m, destinadas para produção de carvão vegetal (Figura 1). Anteriormente à carbonização, selecionaram-se aleatoriamente 200 toras de cada material genético, nas quais foram mensuradas as áreas de cerne, albarno e diâmetro (Figura 1). Em seguida, selecionaram-se 20 toras de madeira, representativas da variação de diâmetro (4-10,9 cm; 11-20 cm), das quais foram retirados discos com 5 cm de espessura, na posição correspondente à 25% da extremidade da tora (0,82 m), conforme a Figura 1. Os discos foram seccionados em quatro cunhas, passando pela medula, sendo duas cunhas opostas utilizadas para a determinação da densidade básica e as demais utilizadas para determinação de umidade e análise química (Figura 1).

Figura 1 – Metodologia de amostragem para análises da madeira dos clones de *Eucalyptus*



Fonte: Autores (2022)



2.2 Caracterização da madeira

O procedimento utilizado para determinar as porcentagens de cerne e alburno foi por meio de medições diretas, com régua graduada, em cada tora. Identificou-se a região limite entre cerne e alburno, observando-se a alteração na cor dessas duas regiões e obstruções por tilos, com auxílio de uma lupa com aumento de 10x. Em uma das extremidades da tora, na seção transversal, traçaram-se duas retas perpendiculares, passando pela medula. Foram feitas as medições do diâmetro total e diâmetro do cerne, com uma régua de precisão igual a 0,1cm. Posteriormente, foram calculadas as porcentagens de cerne e alburno de cada tora e a relação entre elas (relação cerne/ alburno).

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método hidrostático, por meio de imersão das amostras em água, conforme descrito pela norma NBR 11941 (ABNT, 2003). A massa seca de madeira sem casca dos clones avaliados foi obtida pelo produto do incremento médio anual ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$) da madeira sem casca (Tabela 1) pela densidade básica da madeira ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Para a quantificação dos extrativos totais da madeira, foram consideradas as metodologias previstas nas normas técnicas NBR 14853 (ABNT, 2010) e NBR 14577 (ABNT, 2017). Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holoceluloses foi calculado por diferença, diminuindo-se de 100 a percentagem de lignina e extrativos totais.

2.3 Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

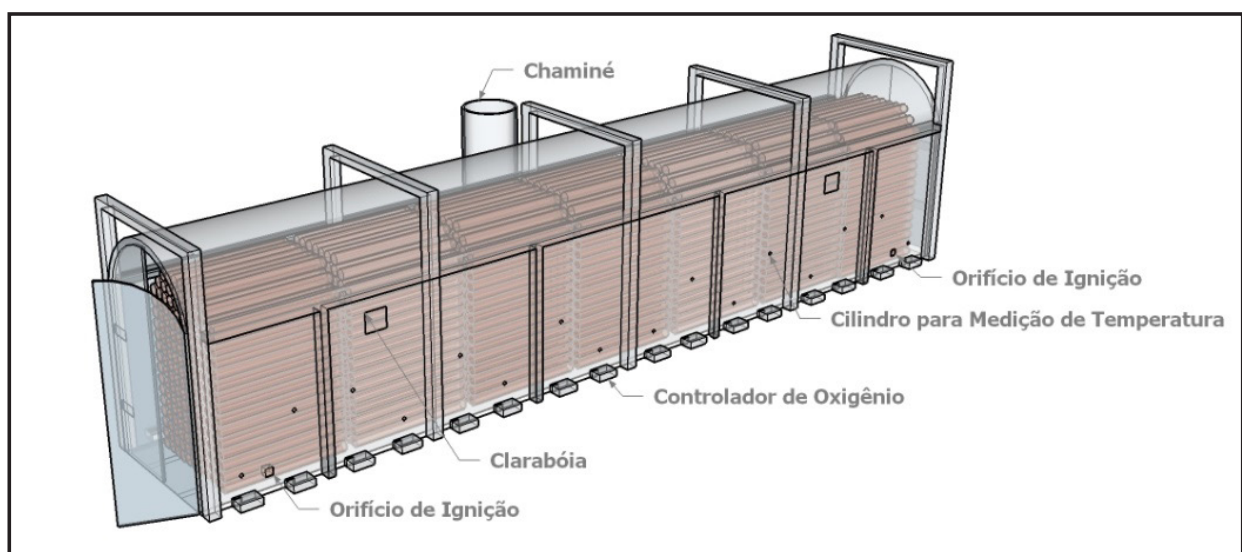
As carbonizações foram realizadas em um forno retangular de alvenaria, denominado RAC220, com dimensões de 26 m x 4 m x 4,5+1,5 m (largura, comprimento,



altura da parede e copa), conforme a Figura 2. Em cada carbonização, realizou-se o enchimento do forno com 210 m³ de madeira, seca em campo por cerca de 90 dias, com umidade média de 32,4 %, variando de 23,9 % a 43,0 %. Foram realizadas 20 carbonizações, cinco para cada material genético.

O aquecimento interno foi utilizado para iniciar a carbonização e manter as temperaturas durante o processo. A temperatura foi monitorada durante as etapas de carbonização e de resfriamento do forno através de 30 cilindros metálicos, distribuídos ao longo da parede do forno. A temperatura foi mensurada a cada 3 horas, durante a carbonização, e a cada 24 horas durante o resfriamento. Para medição de temperatura e armazenamento das informações, foi utilizado aparelho medidor de temperatura infravermelho, modelo FLUKE 568. O controle de temperatura do processo de carbonização foi realizado de acordo com um modelo teórico pré-estabelecido e através da abertura/fechamento dos controladores de oxigênio. O pico da temperatura de carbonização foi de cerca de 380°C e o tempo médio de carbonização e resfriamento foram de 4 e 11 dias, respectivamente.

Figura 2 – Forno retangular utilizado nas carbonizações



Fonte: Autores (2022)



Após cada carbonização, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi determinado por meio da relação entre a massa de carvão vegetal seco produzido e a massa de lenha seca. Para determinação do rendimento gravimétrico em aticho (madeira semicarbonizada), utilizou-se a mesma metodologia, apenas com substituição da massa de carvão pela massa de aticho. A massa de carvão vegetal, dada em $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, foi calculada multiplicando-se a massa seca de madeira pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Em seguida, o carvão vegetal foi amostrado no momento da movimentação do carvão da pilha industrial para a carreta de transporte. Para amostragem do carvão, foram retiradas, de forma aleatória, 20 amostras de 10 L de carvão proveniente do ponto de queda na carreta, totalizando uma amostra composta de 200 L de carvão em cada carbonização, as quais foram homogeneizadas e quarteadas, para proceder as análises físicas e químicas do carvão vegetal.

A densidade a granel (DG) foi determinada de acordo com EN 15103 (DIN, 2010). A densidade aparente do carvão vegetal (DA) foi determinada pelo método hidrostático, no qual as amostras foram imersas em mercúrio.

A granulometria foi determinada de acordo com a norma NBR 7402 (ABNT, 1982). Toda a massa de cada amostra de carvão vegetal foi colocada em um conjunto de peneiras vibratórias que ficou em agitação por cinco minutos. O carvão vegetal retido em cada peneira foi recolhido e a massa foi determinada para quantificação de material com dimensões superiores a 31,5 mm e a fração de finos, com dimensões abaixo de 9,5 mm. O cálculo para quantificação do carvão vegetal com granulometria superior a 30 mm foi realizado conforme a Equação (1):

$$> 30\text{mm}(\%) = \frac{Pt - Pp}{Pt} * 100 \quad (1)$$

Em que: >30 mm = porcentagem de amostra com dimensão maior que 30 mm; Pt = peso total da amostra (kg); Pp = peso após peneiramento (kg).

A quantificação da fração de finos seguiu o mesmo procedimento da Equação 1, porém com a devida alteração para porcentagem da amostra com dimensão menor que 9,5 mm.



Para determinação do índice de friabilidade do carvão vegetal, utilizou-se o método do tamboramento, conforme metodologia do Centro Tecnológico de Minas Gerais (OLIVEIRA *et al.*, 1982). Foram utilizadas amostras de carvão que passaram pela peneira de 60 mm e ficaram retidos na peneira de 30 mm. Amostras de aproximadamente 500 g de carvão foram levadas a um tambor rotatório por 16 minutos a 30 rotações por minuto (rpm). Após esse período, o carvão vegetal foi novamente peneirado, determinando-se a massa que ficou retida na peneira de 30 mm e, então, calculado o índice de friabilidade conforme a Equação (2):

$$\text{Friabilidade (\%)} = \frac{TA - TP}{TA} \quad (2)$$

Em que: TP = Peso de carvão entre 30 mm e 60 mm após tamboramento (g); TA = Peso de carvão entre 30 mm e 60 mm amostrado (g).

A análise imediata do carvão vegetal foi realizada de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986) para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O estoque em carbono fixo (ECF) no carvão vegetal por unidade de volume foi calculado multiplicando-se a densidade aparente pelo teor de carbono fixo no carvão vegetal. Além disso, foi calculado o rendimento em carbono fixo (RCF) por meio do produto entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e teor de carbono fixo.

2.4 Análise Estatística

Na avaliação do experimento, utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (clones) e repetições variando para os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk, para testar a normalidade dos erros, e de Bartlett, para testar a homogeneidade das variâncias. Para os dados que não apresentaram distribuição normal e homogeneidade da variância, realizaram-se o teste estatístico não paramétrico de Kruskal Wallis e o teste de comparação múltipla de Dunn em nível



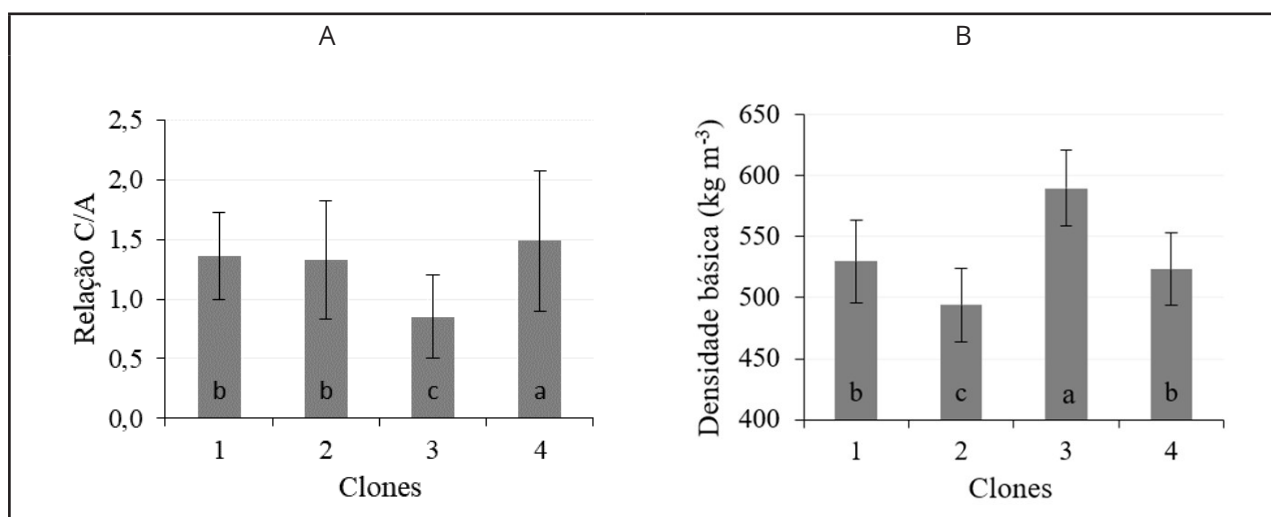
de 5% de significância. Em seguida, os resultados que atenderam a normalidade e homogeneidade foram submetidos à análise de variância (ANOVA), para verificação das diferenças entre os tratamentos avaliados. Quando estabelecidas as diferenças significativas entre eles, aplicou-se o teste de Tukey em nível de 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas no programa RStudio versão 4.2.1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades da madeira

Na Figura 3, verifica-se que houve efeito significativo ($p < 0,05$) do clone de *Eucalyptus* sobre a relação cerne/alburno (C/A) com valores médios variando de 0,85 a 1,49 e para a densidade básica da madeira, com valores médios variando de 494 a 589 kg m^{-3} .

Figura 3 – (A) Relação cerne/alburno (C/A) e (B) densidade básica da madeira (kg.m^{-3}) dos clones de *Eucalyptus*



Fonte: Autores (2022)

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância. Barras de erro indicam o desvio padrão.



Verifica-se na Figura 3A que a relação C/A do clone 4 foi estatisticamente superior (1,5) aos demais, seguidas pelos clones 1 e 2, que não apresentaram diferença significativa entre si, e pelo clone 3, que diferiu estatisticamente dos demais, com valor igual a 0,85. As relações C/A acima de 1,0, exceto para o clone 3, indicam maior proporção de madeira de cerne em relação ao alburno, consequência da maior idade dos materiais avaliados, que sofrem maior cernificação. Árvores mais novas possuem menores proporções de cerne, por exemplo, no trabalho de Pereira *et al.* (2013), ao avaliarem seis clones de *Eucalyptus* (com idade de 90 meses), encontraram valores médios de relação C/A variando de 0,49 a 1,01.

O clone 3 foi o material com menor relação C/A, ou seja, apresentou maior proporção de madeira de alburno, sendo o mais indicado para carbonização, pois de acordo com Costa *et al.* (2017), para a produção de carvão vegetal são recomendados baixos valores de relação C/A. O baixo valor é desejado, já que no cerne os vasos geralmente são obstruídos por tilos que levam à baixa permeabilidade dessa região da madeira (PEREIRA *et al.*, 2013). Na produção de carvão vegetal, a impermeabilidade do cerne dificulta o transporte da água da parte interna da madeira para a parte externa na fase inicial da carbonização, aumentando a pressão de vapor dos gases dentro dos elementos anatômicos, promovendo o rompimento das células, levando à formação de fissuras e fendas internas no carvão, elevando a tendência a formar finos (PEREIRA *et al.*, 2016).

Além da impermeabilidade, a região do cerne dos materiais genéticos de *Eucalyptus*, normalmente plantados no Brasil, apresenta densidade básica da madeira menor que do alburno (COSTA *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2013). Dessa forma, a carbonização de materiais com maiores proporções de cerne ocasiona menores rendimentos em carvão vegetal e carvão menos denso. Neste estudo, verificou-se que os clones com menores relações C/A apresentaram maiores densidades básicas da madeira (Figura 3B), enquanto as menores densidades básicas da madeira foram obtidas para os clones com maiores relações C/A. Tal fato pode ser explicado pelo



aumento da espessura da parede das fibras e diminuição do tamanho dos poros da região do cerne para a região do alburno. Esse aumento de densidade é caracterizado pela formação da madeira juvenil na região central, região próxima à medula, e madeira adulta, região próxima à casca (VIDAURRE *et al.*, 2011).

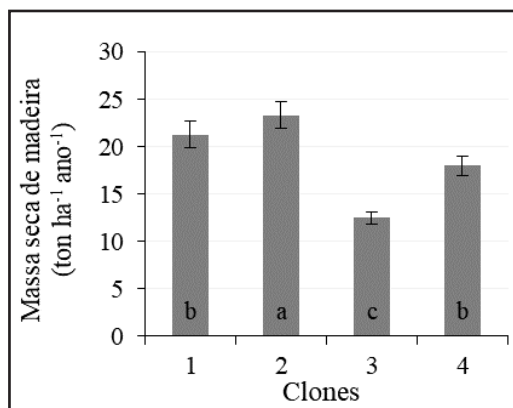
Conforme observado na Figura 3B, houve diferença entre os materiais genéticos avaliados. O efeito do material genético na densidade básica da madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* é constatado por diversos autores (SILVA *et al.*, 2018; ANDRADE *et al.*, 2018; CARNEIRO *et al.*, 2014). As alterações das características físicas da madeira ocorrem geralmente na fase juvenil, em que a taxa de incorporação de biomassa é crescente, tendendo a se estabilizar, quando a árvore atinge a fase adulta, mas que pode ser influenciada por fatores genéticos, edáficos e climáticos (VIDAURRE *et al.*, 2011).

A densidade básica do clone 3 foi 13% superior ao verificado para os demais clones avaliados, enquanto o clone 2 apresentou o menor valor médio (Figura 3B). Densidade básica da madeira em torno de 500 kg m⁻³ é recomendada para a produção de carvão vegetal, visto que, quando se carboniza a madeira, cerca de 65% de sua massa é convertida em produtos secundários do processo, como gases não condensáveis (CO, CO₂, CH₄, etc.) e gases passíveis de serem condensados via sistema de coleta. Consequentemente, quanto maior a densidade da madeira, maior a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume, reduzindo os custos de produção e aumentando a produtividade das unidades de produção de carvão. Além disso, a densidade da madeira mais elevada resulta em maiores densidades do carvão e, de maneira geral, maior resistência mecânica e menor geração de finos (PEREIRA *et al.*, 2016). Assim, os valores de densidade básica verificados para os clones avaliados com idade de 108 e 120 meses são adequados para carbonização, indicando que materiais em idades superiores às usuais para produção de carvão vegetal, que variam de 60 a 84 meses (5 a 7 anos), podem ser destinados à produção. Isso porque para a madeira de eucalipto nessas idades, os valores de densidade básica variam entre 0,44 e 0,56 (SILVA *et al.*, 2018; CARNEIRO *et al.*, 2014), próximos aos valores encontrados para os materiais genéticos avaliados neste estudo.



A Figura 4 apresenta os valores médios de massa seca de madeira ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) sem casca dos clones avaliados.

Figura 4 – Massa seca de madeira ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) dos clones de *Eucalyptus*



Fonte: Autores (2022)

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância. Barras de erro indicam o desvio padrão.

Dentre os clones avaliados, o clone 2 apresentou a maior massa de matéria seca de madeira (Figura 4), em razão do maior incremento médio anual, $47,23\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ (Tabela 1), apesar deste material ter apresentado a menor densidade básica da madeira (Figura 3B). Já o clone 3, cuja densidade básica da madeira foi maior, apresentou a menor produção de massa seca devido a menor produtividade (Tabela 1). Os valores encontrados foram próximos ao verificado para três clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* aos 72 meses, em estudo de Santos *et al.* (2012), indicando o baixo efeito da idade neste parâmetro.

A produtividade de massa seca é um importante parâmetro na avaliação de um empreendimento florestal, pois exerce forte impacto nos custos de logística, transporte e armazenamento de madeira e, por conseguinte, na produção do carvão vegetal. Vale ressaltar que o custo da madeira corresponde ao principal custo da produção de carvão vegetal, juntamente com a construção dos sistemas, manutenção e custos de mão de obra. Considerando os materiais genéticos com maior massa de madeira,



como o clone 2, se a carbonização for conduzida adequadamente, principalmente com controle de temperatura, resultarão em maior quantidade de carvão vegetal produzida por forno, fato importante, uma vez que o tempo total de carbonização e resfriamento em fornos retangulares duram em média 15 dias.

Os teores de lignina, holoceluloses e extrativos totais dos clones avaliados não diferiram estatisticamente, conforme observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química da madeira dos clones de *Eucalyptus*

Clones	Lignina (%)	Holoceluloses (%)	Extrativos (%)
1	29,4 ±0,9	64,1 ±0,14	6,4 ±0,21
2	30,6 ±0,4	62,3 ±0,05	7,1 ±0,08
3	31,4 ±1,3	62,1 ±0,05	6,5 ±0,06
4	28,2 ±1,6	65,0 ±0,01	6,8 ±0,03
Média Geral	29,9	63,4	6,7

Fonte: Autores (2022)

Em que: Média ± Desvio padrão.

De acordo com os teores de lignina encontrados (Tabela 2), os clones nas idades de 108 e 120 meses são indicados para a produção de carvão, pois de acordo com Pereira *et al.* (2013), para fins industriais, um teor mínimo de lignina de 28% é necessário para a produção satisfatória, acima de 30% de rendimento de carvão vegetal. Os valores encontrados foram semelhantes aos teores de lignina, que variam entre 27 e 34% encontrados para espécies e clones de *Eucalyptus*, com idade de 72 a 84 meses (6 a 7 anos), destinados à produção de carvão vegetal (CASTRO *et al.*, 2016). O teor de lignina na madeira é um importante parâmetro a ser analisado em *Eucalyptus* destinados à produção do carvão vegetal, pois, dentre os elementos químicos moleculares da madeira, a lignina, por se tratar de uma macromolécula com alto nível de aromaticidade, é a que apresenta maior resistência à degradação térmica (PEREIRA *et al.*, 2013) e, conseqüentemente, influencia positivamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.



Assim como verificado neste trabalho, Protásio *et al.* (2014), avaliando clones de *Eucalyptus* de diferentes idades, verificaram que não houve efeito do material genético (clone) sobre a composição química da madeira, encontrando valor médio de 66% para o percentual de holoceluloses, enquanto que Castro *et al.* (2016) obtiveram valores variando de 62 a 65% para diferentes clones de eucalipto aos 84 meses de idade. Ressalta-se que, para a produção de carvão vegetal, menores percentuais de holoceluloses na madeira são desejáveis, pois a celulose e as hemiceluloses apresentam baixa resistência térmica, com baixa contribuição no rendimento em carvão vegetal (PEREIRA *et al.*, 2013).

Os percentuais de extrativos encontrados neste estudo (Tabela 2) foram superiores ao verificado por Castro *et al.* (2016) ao avaliarem três clones de eucalipto em diferentes idades, valores variando de 2,9 a 4,3%, com maiores valores observados na idade de sete anos. O maior valor observado está relacionado a maior idade e consequente processo de cernificação dos materiais clonais avaliados. O teor de extrativos pode aumentar ou diminuir o rendimento gravimétrico de carvão, dependendo da sua composição, especialmente das relações O/C e H/C, que influenciam na estabilidade térmica do material (PEREIRA *et al.*, 2013). De modo geral, os extrativos são componentes altamente voláteis e são degradados, durante a pirólise, em temperaturas de 150 a 600°C, gerando principalmente água, CO e CO₂ (GUO *et al.*, 2010). No entanto, no presente estudo não foi verificada relação entre o teor de extrativos e o rendimento em carvão vegetal.

3.2 Rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal

As análises de variância indicaram diferenças entre os clones somente para o rendimento gravimétrico em atijo, enquanto para os rendimentos em carvão vegetal e carbono fixo não houve diferença significativa (Tabela 3).



Tabela 3 – Rendimentos gravimétricos das carbonizações dos clones de *Eucalyptus* em forno retangular

Clones	Rendimento (%)			Teor de umidade madeira (%bs)
	Carvão	Carbono fixo	Atiço	
1	34,8 ±2,1 a	25,5 ±1,3 a	6,0 ±3,2 ab	30,3 ±6,5
2	32,9 ±1,8 a	24,3 ±1,4 a	3,6 ±1,9 b	29,1 ±2,5
3	34,4 ±2,5 a	25,0 ±1,8 a	10,7 ±5,4 a	39,4 ±3,7
4	34,2 ±3,2 a	25,5 ±2,9 a	3,2 ±1,3 b	30,9 ±4,7
Média Geral	34,1	25,1	5,9	32,4

Fonte: Autores (2022)

Em que: Médias (±desvio padrão) seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância. bs = base seca.

Observa-se na Tabela 3 que os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e carbono fixo foram pouco influenciados pelo material genético. Isso porque variações significativas não foram observadas para os teores de lignina e holoceluloses dos clones avaliados (Tabela 2) e os rendimentos em carvão vegetal e em carbono fixo são influenciados pela composição química da madeira. Além disso, a temperatura final de carbonização (COSTA *et al.*, 2020) tem influência significativa nesses parâmetros, contudo, neste trabalho, os carvões vegetais foram obtidos em temperatura final de carbonização padronizada, variando de 360 a 400°C. O rendimento gravimétrico médio em carvão foi igual a 34,1%, valor considerado satisfatório para carbonização em fornos retangulares, em que há necessidade de queima parcial da lenha para o aquecimento interno do forno. Esse valor está no intervalo de 32 a 35%, normalmente verificado para rendimento gravimétrico de fornos retangulares (RODRIGUES; BRAGHINI JÚNIOR, 2019) e semelhante ao valor médio de 34,4% encontrado por Oliveira *et al.* (2020) para a carbonização de madeira de eucalipto aos 84 meses em forno retangular, indicando que a maior idade dos clones avaliados não influenciou na produção de carvão vegetal.

A utilização de madeira com baixo teor de umidade (Tabela 3), próxima a 30%, considerando-se a secagem em campo, assim como a instrumentação dos fornos retangulares de carbonização para efetivo controle da temperatura, resultando em



temperaturas de pico de carbonização, em torno de 380°C, foram decisivas para o elevado rendimento de carvão vegetal. Arruda *et al.* (2011), avaliando a carbonização de madeira de *Eucalyptus* em fornos retangulares com capacidade de 90 m³, verificaram valores de rendimento em carvão vegetal variando entre 23,8% e 28,4%, valor considerado baixo, resultante da elevada umidade da madeira, que variou de 48 a 66%. É importante ressaltar que madeira com elevado teor de umidade, além de estender o tempo de carbonização, reduz o rendimento gravimétrico, ao consumir parte da carga da lenha para evaporar a água (CARNEIRO *et al.*, 2013), além de afetar a qualidade do carvão vegetal, sendo a etapa de secagem de grande importância para o processo produtivo.

Diversos estudos avaliando a carbonização em forno mufla da madeira de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus*, com idade entre 72 e 84 meses (6 e 7 anos), com temperaturas máximas de 400-450°C, encontraram rendimentos gravimétricos em carvão vegetal variando de 29,8 a 36,8% (COSTA *et al.*, 2020; PROTÁSIO *et al.*, 2015; PROTÁSIO *et al.*, 2014). Assim, os rendimentos encontrados (Tabela 3) indicam a viabilidade desses materiais para a produção de carvão vegetal, mesmo em idade acima da normalmente adotada pelas empresas florestais como idade de corte da floresta de eucalipto.

O rendimento em carbono fixo não foi influenciado pelo material clonal (Tabela 3), sendo o valor médio encontrado igual a 25,1%, próximo ao verificado na literatura para a carbonização de clones de eucalipto (PROTÁSIO *et al.*, 2014). Esse resultado era esperado, uma vez que não houve efeito significativo do clone no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo (Tabela 4).

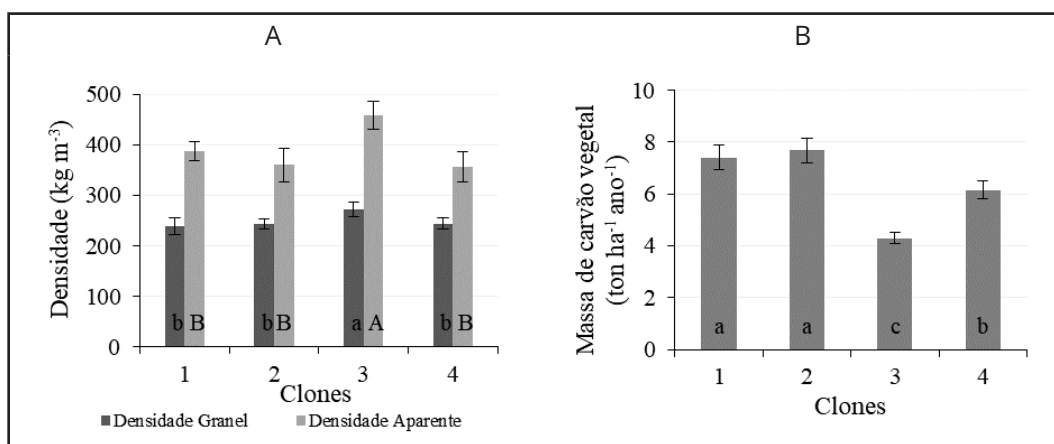
Para o rendimento de atíço, verificou-se efeito do clone, sendo observado na Tabela 3 que o clone 3 apresentou elevado percentual de atíço (10,7%), valor 2,5 vezes maior em relação à média dos demais materiais genéticos. Isso pode ser explicado principalmente pela maior densidade da madeira deste clone (Figura 3B) e maior teor de umidade (Tabela 3) que resultaram na menor formação de carvão, uma vez que as carbonizações foram conduzidas com os mesmos tempos e temperaturas máximas



de carbonização. Assim, visando a redução na geração de atíço, para esse material deve-se aumentar o tempo de carbonização para que o calor atinja toda a madeira enfornada. Para carbonização em forno retangular de alvenaria, é aconselhável que o atíço gerado esteja entre 5% e 10% do volume da carga de madeira, assim, o volume gerado nas carbonizações avaliadas está dentro do limite aceitável, com destaque para os clones 2 e 4 que tiveram rendimento em atíço inferior a 4%.

Observa-se na Figura 5 o efeito significativo dos clones avaliados sobre as densidades a granel e aparente do carvão vegetal e na massa de carvão vegetal produzido por hectare.ano.

Figura 5 – (A) Densidades a granel e aparente do carvão vegetal ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e (B) Massa de carvão vegetal ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) dos clones de *Eucalyptus*



Fonte: Autores (2022)

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, (A) pelo teste Tukey, (B) pelo teste Kruskal Wallis e Dunn. Barras de erro indicam o desvio padrão.

A variação nos valores médios da densidade a granel e densidade aparente (Figura 5A) pode ser atribuída à variabilidade encontrada para a densidade básica da madeira (Figura 3B), sendo a maior densidade do carvão vegetal verificada para o clone 3, que apresentou a maior densidade básica da madeira, evidenciando a correlação positiva entre essas propriedades, conforme também verificado por Andrade *et al.* (2018), Castro *et al.* (2016) e Pereira *et al.* (2013).



Quanto maior a densidade do carvão vegetal, maior a capacidade de carga no alto-forno em termos de carbono por volume e, de acordo com Carneiro *et al.* (2013), para uso siderúrgico a densidade a granel deve ser superior a $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Assim, verifica-se que a densidade do carvão vegetal produzido nos fornos retangulares para todos os clones avaliados foi acima desse limite, com destaque para o clone 3, com valor 36 % maior ao limite mínimo estabelecido e cerca de 12 % superior aos valores encontrados para os demais clones. Os valores encontrados para os clones de maior idade (Figura 5A) foram superiores ao valor médio ($234 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) encontrado para o carvão de eucalipto de 84 meses (7 anos) produzido em forno retangular (OLIVEIRA *et al.*, 2020) e acima da variação de 180 a $205 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ encontrada por Figueiró *et al.* (2019) ao avaliarem a qualidade de carvão vegetal de um clone de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 84 meses (7 anos), de um forno retangular.

A densidade aparente do carvão vegetal variou de 356 a $458 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, com maior valor para o clone 3 que diferiu estatisticamente dos demais. Esses valores foram ligeiramente superiores aos verificados por Andrade *et al.* (2018) e Castro *et al.* (2016), que avaliaram a qualidade do carvão vegetal de diferentes espécies e clones de eucalipto aos 72 e 84 meses (6 e 7 anos), respectivamente, produzido em forno mufla. A diferença verificada está relacionada a maior idade dos materiais avaliados, que resultou na maior densidade básica da madeira (Figura 3B), que refletiu na maior densidade do carvão. Os maiores valores de densidade básica observados podem ser apontados como uma vantagem dos clones de eucalipto avaliados neste estudo, uma vez que a maior idade de corte reflete em maior valor de densidade da madeira e consequente maior densidade do carvão vegetal.

A determinação da densidade aparente garante adequada e eficiente utilização do carvão vegetal em diferentes processos metalúrgicos e, desde que não prejudique as demais propriedades, a densidade deve ser a maior possível. Contudo, quanto mais denso o carvão vegetal, menor é a sua porosidade, o que pode prejudicar a reatividade do carvão vegetal e comprometer a eficiência dos processos metalúrgicos que usam o carvão como agente redutor, ao prejudicar a permeabilidade da carga e distribuição dos gases no alto-forno, conforme verificado por Ramos *et al.* (2019).

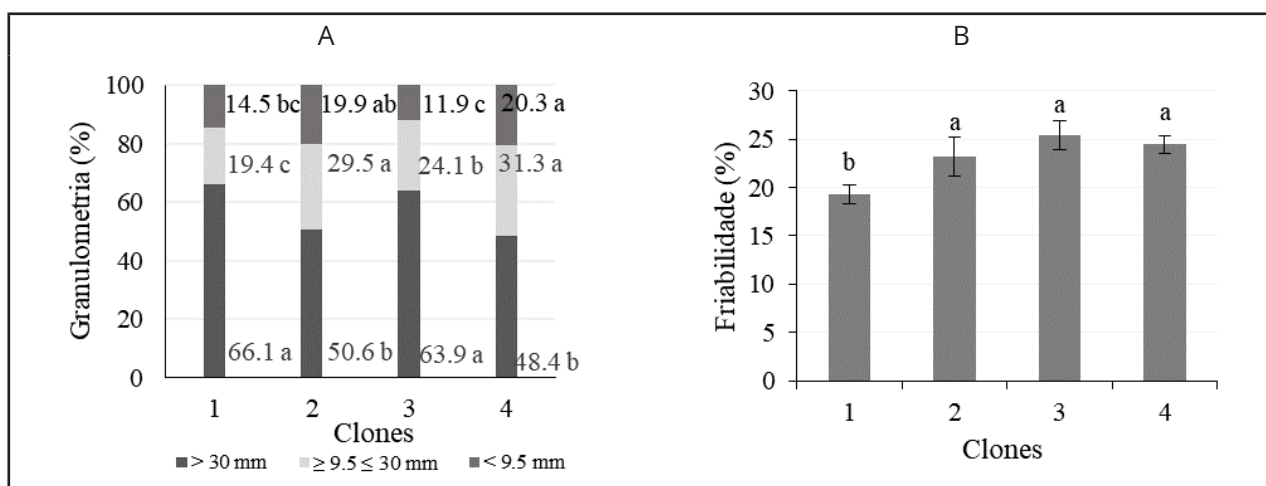


Verifica-se na Figura 5B que houve efeito significativo do clone sobre a quantidade de carvão vegetal produzida em forno retangular, em que os clones 1 e 2 apresentaram maior produção, em média 7,5 toneladas de carvão vegetal por hectare.ano⁻¹, seguidos pelos clones 4 e 3. Os resultados encontrados indicam uma maior contribuição da massa de madeira produzida (Figura 4), que pode estar atrelada à maior idade e conseqüentemente ao maior incremento em diâmetro e maior volume de madeira, pois não houve variação no rendimento gravimétrico em carvão para clones (Tabela 3).

A quantidade de carvão vegetal produzido, conjuntamente com os parâmetros de qualidade, deve ser utilizada como parâmetro na seleção de materiais genéticos, pois influencia no transporte de madeira e carvão vegetal, mão de obra empregada e até mesmo na quantidade de fornos necessários para determinada produção. Além disso, quanto maior a produção de carvão, maior a viabilidade econômica da produção de carvão vegetal, pois maior receita será gerada.

Observa-se, na Figura 6, a classificação granulométrica e a friabilidade do carvão vegetal dos diferentes clones de *Eucalyptus* produzidos em fornos retangulares.

Figura 6 – (A) Classificação granulométrica (%) e (B) Friabilidade (%) do carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus*



Fonte: Autores (2022)

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância. Barras de erro indicam o desvio padrão.



Observa-se na Figura 6A efeito significativo do clone na granulometria do carvão vegetal produzido nos fornos retangulares. Os clones 1 e 3 apresentaram em média 65% do volume de carvão vegetal produzido na maior faixa granulométrica (>30 mm) e 13,2% na menor faixa (< 9,5 mm); já os clones 2 e 4 tiveram 49,5% do carvão vegetal na maior granulometria. A maior parte do volume de carvão vegetal com granulometria acima de 30 mm é considerado satisfatório para produção realizada em fornos retangulares industriais que realizam o descarregamento mecanizado do forno, uma vez que o carvão vegetal é um material bastante friável, susceptível a quebra durante manuseio. Carvão vegetal com menores granulometrias não é desejado na indústria siderúrgica, pois reduzem a permeabilidade no alto-forno, que dificulta a passagem dos gases pela carga de carvão vegetal durante o processo de redução do minério, aumentando excessivamente a pressão do sistema, podendo levar a interrupção do processo para evitar possíveis acidentes (FIGUEIRÓ *et al.*, 2019).

Verifica-se efeito significativo na friabilidade do carvão vegetal para os diferentes clones de *Eucalyptus* avaliados (Figura 6B), com o clone 1 apresentando friabilidade média igual a 19,2%, ou seja, 21% menor comparado aos demais carvões, sendo estatisticamente superior. Os valores observados estão dentro do intervalo de friabilidade de 18,4 a 23,9% encontrados por Oliveira *et al.* (2020) ao avaliarem o carvão vegetal de eucalipto, com 84 meses de idade, carbonizado em forno retangular. Apesar disso, todos os carvões vegetais foram caracterizados como material de média resistência conforme classificação do Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC (OLIVEIRA *et al.*, 1982), resultando no baixo percentual de finos, variando de 11,9 a 20,3%, gerados na carbonização de clones de eucalipto em idades de 108 e 120 meses (Figura 6A).

Carvão vegetal menos friável é desejado na produção de ligas metálicas, uma vez que em toda a cadeia produtiva, o carvão está sujeito à abrasão e choques mecânicos, resultando na redução da granulometria e, dessa forma, elevando a produção de carvão menor que 9,5 mm, que é considerado resíduo na produção de ferro-ligas. Além



disso, os finos reduzem a permeabilidade do leito de carga no alto-forno, afetando negativamente a eficiência do processo siderúrgico (DUFOURNY *et al.*, 2019).

Na Tabela 4, é possível observar os valores médios da análise imediata do carvão vegetal e o estoque de carbono dos diferentes materiais genéticos de eucalipto.

Tabela 4 – Teores de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e estoque de carbono fixo do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*

Clone	Carbono Fixo (%)	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Estoque carbono fixo (kg.m ⁻³)
1	76,4 ±1,4 a	23,4 ±1,4 a	0,15 ±0,03 ab	296,28 ±10,5 b
2	77,3 ±2,3 a	22,5 ±2,2 a	0,21 ±0,08 a	278,52 ±20,1 b
3	75,9 ±0,7 a	23,9 ±0,7 a	0,10 ±0,05 b	358,07 ±15,8 a
4	78,1 ±2,2 a	21,7 ±2,2 a	0,21 ±0,06 a	270,85 ±16,2 b
Média Geral	76,9	22,8	0,17	287,22

Fonte: Autores (2022)

Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

O teor de carbono fixo não variou entre os clones avaliados, cujo valor médio foi igual a 76,92%, com valor mínimo de 75,9% para o clone 3 e máximo de 78,1% para o clone 4 (Tabela 4). Os valores encontrados estão dentro do exigido pelas indústrias siderúrgicas, cuja variação aceitável é entre 75 e 80%, visando o aumento da produtividade de altos-fornos para um determinado consumo de carvão vegetal (CARNEIRO *et al.*, 2013) e próximo ao verificado por Arruda *et al.* (2011), Figueiró *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2020), que avaliaram a qualidade do carvão vegetal de eucalipto produzido em fornos retangulares com madeira de eucalipto aos 84 meses, para os três estudos.

Para o teor de materiais voláteis, também não houve efeito significativo dos clones, com valores médios variando de 21,7% para o clone 4 a 23,9% para o clone 3, valores adequados para a utilização na indústria siderúrgica, visto que esse parâmetro é inversamente proporcional ao carbono fixo. Arruda *et al.* (2011) encontraram valor



médio de materiais voláteis igual a 22,7%, enquanto Oliveira *et al.* (2020) encontraram valor médio igual a 24,4% ao caracterizarem as propriedades do carvão vegetal de eucalipto produzido em fornos retangulares industriais.

Os valores de carbono fixo e materiais voláteis encontrados são um indicativo da baixa influência da madeira, seja pela idade ou material genético, dos clones avaliados nas características químicas do carvão vegetal, principalmente por não ter havido efeito significativo na composição química da madeira (Tabela 2). Além disso, há uma tendência de o teor de carbono fixo aumentar, com o aumento da temperatura máxima de carbonização (DUFOURNY *et al.*, 2019), contudo, houve controle de temperatura de carbonização, com picos máximos variando de 360 a 400°C.

O teor de cinzas no carvão vegetal foi inferior a 1% em todos os materiais (Tabela 4). O clone 3 apresentou o menor teor de cinzas (0,10%), diferindo estatisticamente dos demais clones. De forma geral, o carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus*, de diferentes materiais genéticos e idades, apresenta teor de cinza inferior a 1% (SILVA *et al.*, 2018; CASTRO *et al.*, 2016), corroborando com os resultados encontrados neste trabalho, ou seja, o aumento da idade de corte dos eucaliptos pouco influenciará no teor de cinzas determinado para o carvão vegetal. O carvão vegetal produzido com madeira de eucalipto em idade entre 108 e 120 meses seria adequado para o uso siderúrgico por apresentar valor inferior a 0,3% de cinzas. Para utilização como insumo na indústria siderúrgica, a presença de materiais inorgânicos no carvão vegetal deve ser a mínima possível, pois causa desgaste no alto-forno e pode comprometer a qualidade do ferro-gusa, com consequente formação de trincas e fissuras (CARNEIRO *et al.*, 2013).

Na Tabela 4, observa-se o efeito significativo do clone no estoque de carbono fixo do carvão vegetal, com maior valor, 358 kg m⁻³, para o clone 3 que diferiu estatisticamente dos demais. Essa diferença está relacionada a maior densidade aparente do carvão vegetal desse clone (Figura 5A), uma vez que não houve variação no teor de carbono fixo. Protásio *et al.* (2014) encontraram valores de estoque em carbono variando de 263 a 321 kg m⁻³ para materiais jovens de eucalipto, e assim como neste trabalho verificaram que a densidade aparente do carvão vegetal foi mais relevante que o teor de carbono fixo para a diferenciação do estoque de carbono fixo.



4 CONCLUSÕES

Clones de *Eucalyptus* com idades variando de 108 a 120 meses têm propriedades da madeira adequadas para a produção de carvão vegetal, com destaque para o incremento de densidade que resulta em maior densidade do carvão.

A idade superior dos clones quando comparada à normalmente utilizada pelas indústrias produtoras de carvão não influenciou tanto o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, que foi satisfatório para fornos retangulares, quanto os parâmetros de qualidade do carvão vegetal, que também foram adequados para uso metalúrgico.

Dentre os materiais avaliados, em maior idade de corte, os clones 1 (híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*) aos 108 meses e o clone 3 (híbrido de *E. urophylla* x *E. camaldulensis*) aos 120 meses seriam os mais indicados para produção em forno retangular de carvão vegetal destinado à indústria metalúrgica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES; do CNPq; da FAPEMIG; da empresa Minas Ligas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. W. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V. H. P. Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, 25, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017615>

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. 2011. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500020>

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14577**: pasta celulósica e madeira: determinação do material solúvel em água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A. B. N. T. **NBR 14853**: Madeira - Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2010. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal: Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7402**. Determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. *In*: SANTOS, F.; COLLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. (Eds.). **Bioenergia & biorrefinaria – cana-de-açúcar & espécies florestais**. 1.ed. Viçosa: Os Autores, 2013. p.429-457.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C.O.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

COSTA, A. C. S; LEAL, C. S.; SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p10-20>

COSTA, J. M. F. N.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; ARAÚJO, S. O.; CANAL, W. D. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 11, n. 1, p. 53-62, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n1p53-62>

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15103**: Determination of bulk density. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2010. 14 p.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s.l.].v. 137, p. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013>

FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A.C.O.; SANTOS, G.R.; CARNEIRO, A.P.S.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M.A.; SILVA, C.M.S.; CASTRO, V.R. Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.14, n.3, e5659, 2019. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5659>

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. *In*: SARKANEN, K. V. E.; LUDWING, C. H. (Eds.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. 1 ed. New York: John Wiley Interprice, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determination of lignin content in woody material: modified Klason method. **O Papel**, [s.l.], v. 47, n. 8, 1986.

GUO, X. J., WANG, S. R., WANG, K. G., Qian, L. I. U., LUO, Z. Y. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of fuel Chemistry and Technology**, v. 38, n. 1, p. 42-46, 2010.



INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2021**. São Paulo: IBÁ, 2022. 93p. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2022.

OLIVEIRA, A. C.; RAMOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O. Carbonization temperature and charcoal properties at different positions in rectangular kiln. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.15, n.4, e8493, 2020. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8493>

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R. (Ed.). **Produção e utilização do carvão vegetal**. 1982. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 60-73. (CETEC. Série de Publicações Técnicas, 8).

PEREIRA, B.L.C.; CARVALHO, A.M.L.; OLIVEIRA, A.C.; SANTOS, L.C.; CARNEIRO, A.C.O.; MAGALHÃES, M.A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509822755>

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 217-225, jun. 2013.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; LIMA JÚNIOR, P. H.; SILVA, M. M. O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 801-816, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6>

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657>

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B. L. C. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for metallurgical. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 26 (Special nº2), p. e20180435, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043518>

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JÚNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 143, e104670, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. T. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.36, n.5, p.971-980, 2012.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016>

VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011. <https://doi.org/10.4322/floram.2011.066>



Contribuição de Autoria

1 Diego Correa Ramos

Doutor em Ciência Florestal, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0002-8432-8577> • diegoengf@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria dos dados, Análise Formal, Investigação, Escrita – primeira redação

2 Angélica de Cássia Oliveira Carneiro

Doutora em Ciência Florestal, Professora e Pesquisadora

<https://orcid.org/0000-0002-5992-3059> • cassiacarneiro1@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Supervisão

3 Humberto Fauller de Siqueira

Doutor em Ciência Florestal, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0001-5176-8448> • fauller86@gmail.com

Contribuição: Análise Formal, Investigação, Escrita – primeira redação

4 Aylson Costa Oliveira

Doutor em Ciência Florestal, Professor e Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0003-1599-5947> • aylsoncosta@gmail.com

Contribuição: Análise Formal, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

5 Bárbara Luísa Corradi Pereira

Doutora em Ciência Florestal, Professora e Pesquisadora

<https://orcid.org/0000-0003-3620-7129> • babicorradi@gmail.com

Contribuição: Análise Formal, Visualização de dados (infográfico, tabela, gráfico), Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Ramos, D. C.; Carneiro, A. C. O.; Siqueira, H. F.; Oliveira, A. C.; Pereira, B. L. C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de Eucalyptus com idades entre 108 e 120 meses. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 33, n. 1, e48302, p. 1-27, 2023. DOI 10.5902/1980509848302. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509848302>.