



Artigos

Influência da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização

Influence of basic density and chemical composition of wood on the carbonization process

Rafaella Dias Ramos¹ , Dalton Longue Júnior¹ ,
Guilherme Sampaio Pereira¹ , João Vítor Morais da Silva¹ ,
Mara Lúcia Agostini Valle^{II} , Ananias Francisco Dias Júnior^{III} 

¹Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil

^{II}Universidade Federal do Sul da Bahia, Itabuna, BA, Brasil

^{III}Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, BA, Brasil

RESUMO

A produção de carvão vegetal a partir de madeiras de eucalipto e espécies nativas é uma das mais importantes atividades do setor florestal brasileiro, e abastece principalmente o setor siderúrgico. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre estudos que relacionam a densidade básica e a composição química da madeira com as variáveis do processo de carbonização e com as características do carvão vegetal. Foi utilizado o princípio do estudo exploratório por meio de uma revisão de literatura. Os estudos utilizados nesta pesquisa apontaram que os clones de eucalipto utilizados na indústria de carvão vegetal apresentaram densidade básica entre 330 e 600 kg/m³, teor de carbono fixo entre 71,9 e 84,4% e poder calorífico superior entre 6996 cal/g e 8326 cal/g. Com relação às espécies nativas estudadas, estas apresentaram densidade básica variando entre 364 e 1052 kg/m³, maior que a variação verificada para o *Eucalyptus*; teor de carbono fixo variando entre 60,6 e 81,0%; e poder calorífico superior entre 6248 cal/g e 7730 cal/g. Conclui-se que é necessário mais investimento nas análises de qualidade da madeira para a avaliação do processo de carbonização e qualidade do carvão vegetal, principalmente com madeiras de espécies nativas; dentre as características da madeira, a densidade básica foi a mais utilizada nas indústrias de carvão vegetal, enquanto o teor de holocelulose e relação S/G da lignina foi pouco apresentada pelas pesquisas.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Eucalyptus; Espécies nativas; Energia

ABSTRACT

Charcoal production from wood of fast-growing species, *Eucalyptus* and native species, is one of the most important activities in the Brazilian forestry sector, and mainly supplies the steel sector. The objective of this work was to carry out a literature review on studies that relate the basic density and chemical composition of wood with the variables of the carbonization process and the characteristics of charcoal. The principle of exploratory study was used through a literature review. The main studies used in this research showed that *Eucalyptus* clones used in the charcoal industry showed a basic density between 330 and 600 kg/m³, fixed carbon content between 71.9 and 84.4% and a higher calorific value between 6996 cal/g and 8326 cal/g. Regarding the native species studied, these presented basic density varying between 364 and 1052 kg/m³, greater than the variation observed for *Eucalyptus*; fixed carbon content varying between 60.6 and 81.0%; and higher calorific value between 6248 cal/g and 7730 cal/g. The conclusion indicates necessity for more investment in wood quality analyzes to evaluate the carbonization process and charcoal quality, especially with wood from native species; among the characteristics of wood, basic density was the most used in the charcoal industry, while the holocellulose content and S/G ratio of lignin were rarely presented in research.

Keywords: Wood quality; *Eucalyptus*; Native species; Energy

1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é o produto sólido da carbonização da madeira, produto energético e renovável utilizado em muitas aplicações industriais. É um insumo relevante para diversas cadeias produtivas e coloca o Brasil como o principal produtor mundial, com uma contribuição de 7,0 milhões de toneladas produzidas em 2022 (INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2023). Em sua maioria oriundo de plantios florestais, é uma alternativa ao uso do carvão mineral, um exemplo de sustentabilidade na indústria siderúrgica, que coloca a nação como potencial fornecedora do insumo energético para o restante do mundo.

O processo de carbonização ocorre através da degradação térmica da biomassa, por meio de um fornecimento contínuo de calor em atmosfera limitada ou livre de oxigênio, que resulta em uma variedade de produtos: líquidos (licor pirolenhoso e alcatrão), gasosos (hidrocarbonetos e hidrogênio) e sólido, o carvão vegetal (Protásio *et al.*, 2021). Segundo Pereira (2021), as variáveis do processo de carbonização que impactam diretamente nas características finais do carvão vegetal são o tempo e a temperatura final de carbonização.

Além disso, a qualidade do carvão para utilização industrial e doméstica pode ser avaliada por suas características físico-químicas, como densidade aparente, rendimento gravimétrico e análise química imediata (carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas). Entre essas, a densidade 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 aparente indica maior resistência à compressão e melhor desempenho na ocupação do alto-forno siderúrgico (Protásio *et al.*, 2021).

Ressalta-se que peças de carvão vegetal com maior densidade aparente tendem a liberar mais energia quando queimadas, aumentando o rendimento gravimétrico. Rendimento gravimétrico entre 30 e 35% são considerados satisfatórios (Rodrigues; Braghini Júnior, 2019).

A análise química imediata do carvão vegetal também é fundamental para determinar sua qualidade e eficiência como combustível. O teor de carbono fixo, que corresponde à porcentagem de carbono presente no carvão, é um dos principais indicadores dessa qualidade (Basso, 2017). Os materiais voláteis, que incluem hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono, representam a fração da matéria volátil residual no carvão vegetal. Embora esses materiais voláteis contribuam para a combustão inicial, o teor de cinzas, que é o resíduo de óxidos minerais resultante da combustão completa, é considerado indesejável (Lima, 2020).

Com relação ao processo de carbonização da madeira, a escolha adequada das características dos fornos (tamanho, tecnologia, reaproveitamento de subprodutos, tipo de material na construção, tempo de carbonização) também é fator relevante e que afeta a qualidade do carvão vegetal produzido. O acompanhamento da carbonização e das suas variáveis de controle, como tempo, temperatura e taxa de aquecimento, quando possíveis, permite melhorar ainda mais a qualidade do carvão e o rendimento do processo de carbonização.

Portanto, a caracterização e a qualidade da madeira unidos a um processo de carbonização bem controlado são fundamentais para a produção de carvão vegetal de alta qualidade. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a influência da densidade básica e da composição química da madeira com as principais variáveis do processo de carbonização e com as características do carvão vegetal.

2 METODOLOGIA

2.1 Pesquisa e seleção de material bibliográfico

O trabalho seguiu o princípio do estudo exploratório por meio de uma revisão de literatura, desenvolvida a partir da seleção de material publicado nos últimos 20 anos, entre 2000 e 2021, composto por artigos científicos, dissertações e teses.

O material foi coletado em revistas científicas, como: Revista *Árvore*, *Cerne*, *Ciência Florestal*, *Floresta e Ambiente*; e repositórios de teses e dissertações de universidades brasileiras: Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Escola Superior Luiz de Queiroz (ESALQ), utilizando as seguintes palavras chaves: carbonização, carvão vegetal, pirólise e madeira.

Em seguida, foi feita uma leitura/triagem, considerando como critério de seleção as bibliografias que abordassem a qualidade da madeira (densidade básica e composição química) com relação às variáveis de processo de carbonização. Em um terceiro nível de seleção, foram consideradas as publicações que especificavam os gêneros dos clones/espécies (*Eucalyptus* e Nativas) e demais informações sobre os cultivos das árvores (espaçamento, idade e local), e que apresentaram claramente as variáveis de carbonização mais usuais pelas instituições de pesquisa no Brasil. Nessa seleção foram considerados 9 artigos e 4 dissertações/teses.

2.2 Elaboração das planilhas de dados a partir do material bibliográfico selecionado

As informações extraídas das bibliografias selecionadas foram organizadas em planilhas contendo as informações mais relevantes para este estudo, com informações sobre: i) plantios: espécies/clones, idade, espaçamento e local; ii) características da madeira: densidade básica e composição química; iii) variáveis do processo de carbonização: tempo total de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento; iv) características do carvão vegetal: rendimento, teor de carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico superior.

2.3 Relações entre a qualidade da madeira, as variáveis do processo de carbonização e as características do carvão vegetal

Para a discussão dos resultados, foram criados gráficos de correlação entre todas as variáveis selecionadas. Foram estabelecidas correlações entre a densidade básica e a composição química da madeira (teor de holocelulose, lignina total e extrativos); com as variáveis do processo de carbonização tempo total de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento, e com as características do carvão vegetal: teor de carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico superior.

2.4 Comparação entre as características do carvão vegetal e as variáveis do processo de carbonização

Para entender ainda melhor a relação da qualidade da madeira (densidade básica e composição química) no processo de carbonização e na qualidade do carvão vegetal dentre os trabalhos selecionados, foi elaborado um gráfico comparativo contendo três diferentes tempos de carbonização para as madeiras de eucalipto (240, 360 e 740 min) e três diferentes tempos para madeiras nativas (150, 240 e 330 min), consideradas condições extremas na mesma temperatura de carbonização 450 °C. Essa comparação buscou entender em que condições deve-se alterar as demais variáveis de processo (taxa de aquecimento), devido a variação da qualidade da madeira (densidade básica e composição química), e o reflexo dessa combinação na qualidade do carvão vegetal.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Avaliação das informações sobre a caracterização tecnológica da madeira para produção de carvão vegetal

Na primeira etapa de seleção dos materiais, foram selecionados 26 artigos e 8 dissertações/teses. Na segunda e terceira seleção, mais criteriosa, foram considerados 9 artigos e 4 dissertações/teses, que além dos títulos, realmente se tratava de pesquisas com resultados e discussões relacionadas à qualidade da madeira (caracterização tecnológica) para produção de carvão vegetal.

Com base nestes 13 trabalhos selecionados, foram coletados dados de 53 materiais genéticos (clones), dentre os quais 71,7% eram relativos ao gênero *Eucalyptus* (38 clones) e 28,3% pertenciam as espécies nativas (15 espécies), sendo todos os trabalhos relacionados à produção de carvão vegetal.

Fato importante de ser relatado foi a falta de informação dos plantios florestais. A idade do clone e o espaçamento utilizado nos plantios não foram informados em 0% e 32% dos trabalhos de eucalipto, respectivamente, e em 93%, e 93% dos trabalhos de nativas, respectivamente.

Considerando todas as informações dos plantios como importantes (idade, espaçamento e procedência), 75% das publicações com plantios de eucalipto apresentaram todas as informações, enquanto apenas 20% das publicações com espécies nativas apresentaram todas as informações.

Sobre a falta de informações da qualidade da madeira (densidade básica e composição química completa), todos os trabalhos de eucalipto e nativas apresentaram a densidade básica, teor de lignina total, holocelulose e extrativos. Por outro lado, os trabalhos não apresentaram o teor de celulose e de hemicelulose separadamente, e 100% e 62,5% dos trabalhos com nativas e eucalipto não apresentaram a relação S/G da lignina, respectivamente.

Considerando todas as informações da qualidade da madeira como importantes

(densidade básica e composição química completa), apenas 37,5% dos trabalhos de eucalipto apresentaram todas as informações, enquanto nenhum dos trabalhos de nativas foi completo. Isso demonstra que é preciso um maior investimento na realização de análises de qualidade da madeira para a avaliação do processo de carbonização, principalmente em trabalhos que envolvem madeiras de espécies nativas.

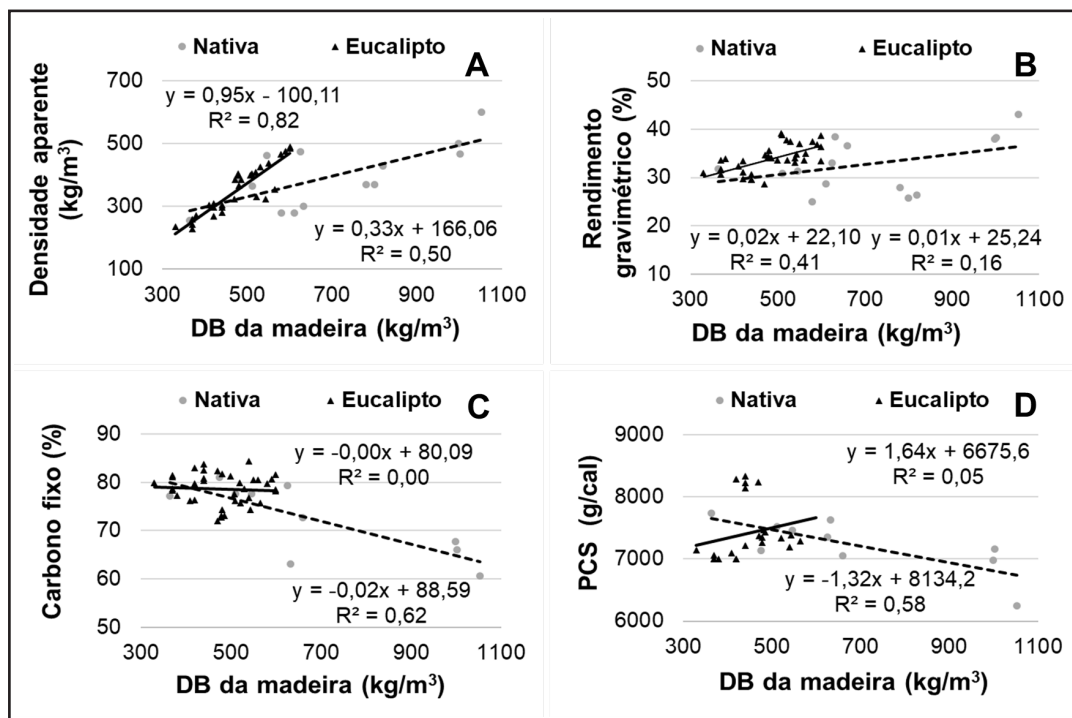
3.2 Influência da densidade básica da madeira na qualidade do carvão vegetal

Com base neste estudo de caso, a densidade aparente do carvão vegetal de eucalipto variou entre 227 kg/m³ e 491 kg/m³, para uma variação de densidade básica entre 330 kg/m³ e 600 kg/m³, e a densidade aparente do carvão vegetal de espécies nativas variou entre 255 kg/m³ e 600 kg/m³, para uma variação de densidade básica entre 364 kg/m³ e 1052 kg/m³ (Figura 1A). É perceptível que madeiras de espécies nativas apresentaram uma maior variação de densidade básica da madeira do que a variação apresentada pelas espécies comerciais (eucalipto). Isso é explicado pela grande diversidade de espécies nativas com potencial para serem cultivadas para a produção de carvão vegetal.

A densidade aparente do carvão vegetal aumentou com a elevação da densidade básica da madeira para ambas as espécies. Apesar das variáveis do processo de carbonização interferirem na densidade do carvão, foi verificada uma forte influência da densidade básica da madeira. Isso também foi observado por Frederico (2009) e Santos (2010), que encontraram maiores valores de densidade aparente do carvão para os clones que apresentaram maior densidade básica da madeira.

De acordo com Costa (2014), existe uma alta correlação entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal, por isso, quanto mais densa a madeira, mais denso será o carvão vegetal dela proveniente.

Figura 1 – Influência da densidade básica da madeira na densidade aparente do carvão (A); rendimento gravimétrico do carvão; (B); teor de carbono fixo; (C) e poder calorífico superior de nativa e eucalipto (D)



Fonte: Autores (2024)

Com relação ao rendimento gravimétrico em carvão, este aumentou com a elevação da densidade básica da madeira para ambos os grupos de madeiras, e variou entre 28,7% e 39,1% para os melhores materiais de eucalipto e de 24,9% a 43% para os melhores materiais de espécies nativas, conforme Figura 1B. Assim, é possível notar que os clones de eucaliptos apresentaram uma variação no rendimento gravimétrico em carvão vegetal inferior em relação à variação apresentada pelas espécies nativas.

Medeiros Neto *et al.* (2012) afirmam que madeiras mais densas proporcionam uma maior produção em massa de carvão vegetal, ou seja, maior rendimento gravimétrico em carvão. Porém, é importante lembrar que outros fatores, como a umidade da madeira e a temperatura de carbonização, também influenciam no rendimento gravimétrico (Oliveira *et al.*, 2010).

O teor de carbono fixo do carvão vegetal de eucalipto apresentou uma tendência de se manter constante com o aumento da densidade básica, e variou entre 71,9 e 84,4%, para uma variação de densidade básica entre 330 kg/m³ e 600 kg/m³, conforme Figura 1C. Entretanto, o teor de carbono fixo do carvão vegetal das madeiras de espécies nativas apresentou uma tendência de decréscimo à medida que a densidade básica da madeira aumentou, e variou entre 60,6 e 81,0%, para uma variação de densidade básica entre 364 kg/m³ e 1052 kg/m³.

Esse comportamento pode ser explicado devido às madeiras mais densas exigirem condições de carbonização mais drásticas e maior degradação da lignina, e por isso o decréscimo do teor de carbono fixo no carvão vegetal. Vital *et al.* (1994) não encontraram correlação positiva entre a densidade básica da madeira e o teor de carbono fixo do carvão.

Assim, é possível notar que os carvões de eucalipto apresentam um teor de carbono fixo mais elevado e com uma variação menor em comparação com os carvões de espécies nativas, devido ao maior controle do processo de carbonização em razão da menor heterogeneidade da madeira.

Por fim, o poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal de eucalipto apresentou uma tendência de aumento com a elevação da densidade básica da madeira, e variou entre 6996 cal/g e 8326 cal/g, para uma variação de densidade básica entre 330 kg/m³ e 600 kg/m³, conforme Figura 1D. Segundo Silva *et al.* (2011), madeiras com densidades mais altas são mais recomendadas para a fabricação de carvão vegetal, uma vez que tendem a ter um maior poder calorífico por unidade de volume.

Entretanto, o poder calorífico do carvão vegetal das madeiras de espécies nativas apresentou uma tendência de decréscimo à medida que a densidade básica da madeira aumentou, e variou entre 6248 cal/g e 7730 cal/g para uma variação de densidade básica entre 364 kg/m³ e 1052 kg/m³. Isso acontece devido às madeiras mais densas demandarem condições mais extremas de carbonização, redução do teor

de carbono fixo (degradação da lignina) e conseqüente diminuição do poder calorífico.

Diante dessa importante discussão sobre a densidade básica da madeira, as unidades industriais produtoras de carvão vegetal têm preferido trabalhar com madeiras de densidade média a levemente alta, a fim de otimizar o desempenho dos fornos de carbonização, visando aumentar a produtividade e eficiência da produção diária de carvão vegetal.

3.3 Estudo da composição química da madeira na qualidade do carvão vegetal

A composição química da madeira exerce forte influência no processo de carbonização e na qualidade do carvão vegetal. O teor de carbono fixo do carvão vegetal de eucalipto variou entre 71,9% e 84,4%, para uma variação do teor de holocelulose da madeira entre 54,9 e 73,5%, e o teor de carbono fixo do carvão vegetal de espécies nativas variou entre 60,6 e 81,0%, para uma variação do teor de holocelulose da madeira entre 49,3% e 74,6% (Figura 2A).

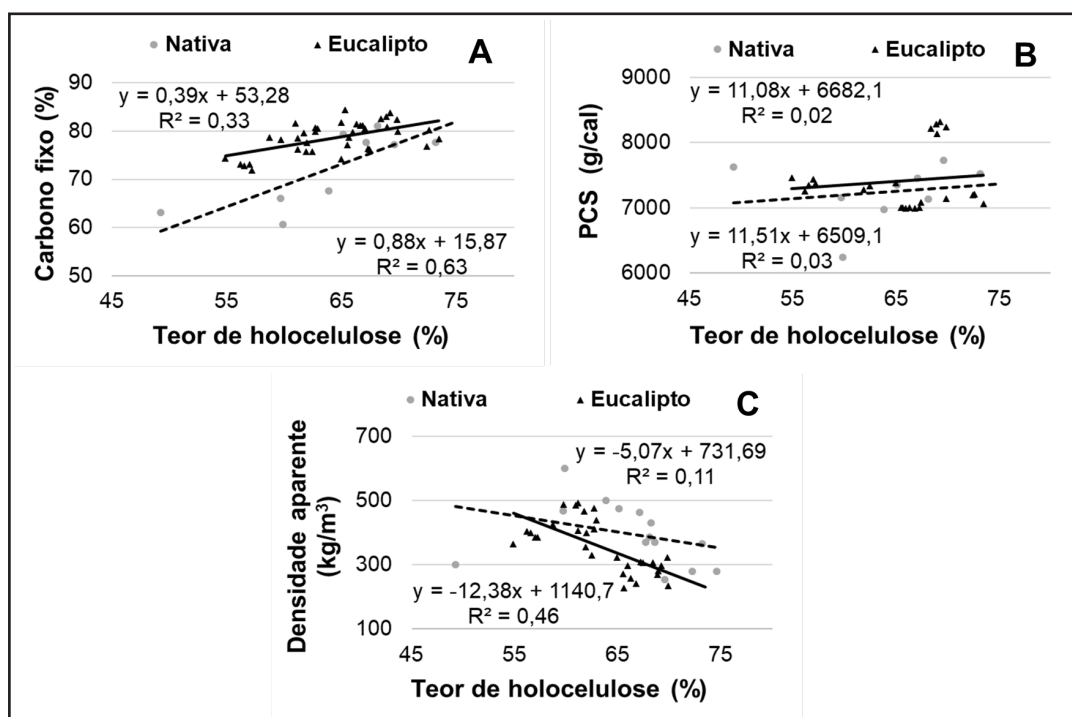
O teor de carbono fixo do carvão apresentou uma tendência de aumento à medida que se elevou o teor de holocelulose da madeira para ambas as espécies. Os carboidratos da madeira também colaboram para a elevação do teor de carbono fixo do carvão vegetal, principalmente quando produzidos com menores tempos e temperaturas, que acarretam a menor liberação de carbono na forma de materiais voláteis.

Em relação ao poder calorífico superior do carvão vegetal, ambas as espécies apresentaram uma tendência de aumento à medida que o teor de holocelulose da madeira aumentou, variando de 6996 cal/g a 8326 cal/g para eucalipto e de 6248 cal/g a 7730 cal/g para madeiras de espécies nativas (Figura 2B).

A densidade aparente do carvão de eucalipto e de nativas apresentou tendência de decréscimo à medida que o teor de holocelulose da madeira aumentou, variando de 227 kg/m³ a 491 kg/m³ para eucalipto e de 255 kg/m³ a 600 kg/m³ para madeiras nativas (Figura 2C). Isso pode ser explicado pela volatilização da maior parte dos compostos

químicos da madeira durante a carbonização, produzindo sempre um carvão menos denso. A compreensão dessa relação é muito útil em processos industriais, na seleção de espécies para produção de carvão vegetal, uma vez que a densidade do carvão afeta não somente na qualidade do carvão, mas também no rendimento dos fornos.

Figura 2 – Influência do teor de holocelulose da madeira de nativa e eucalipto com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C)



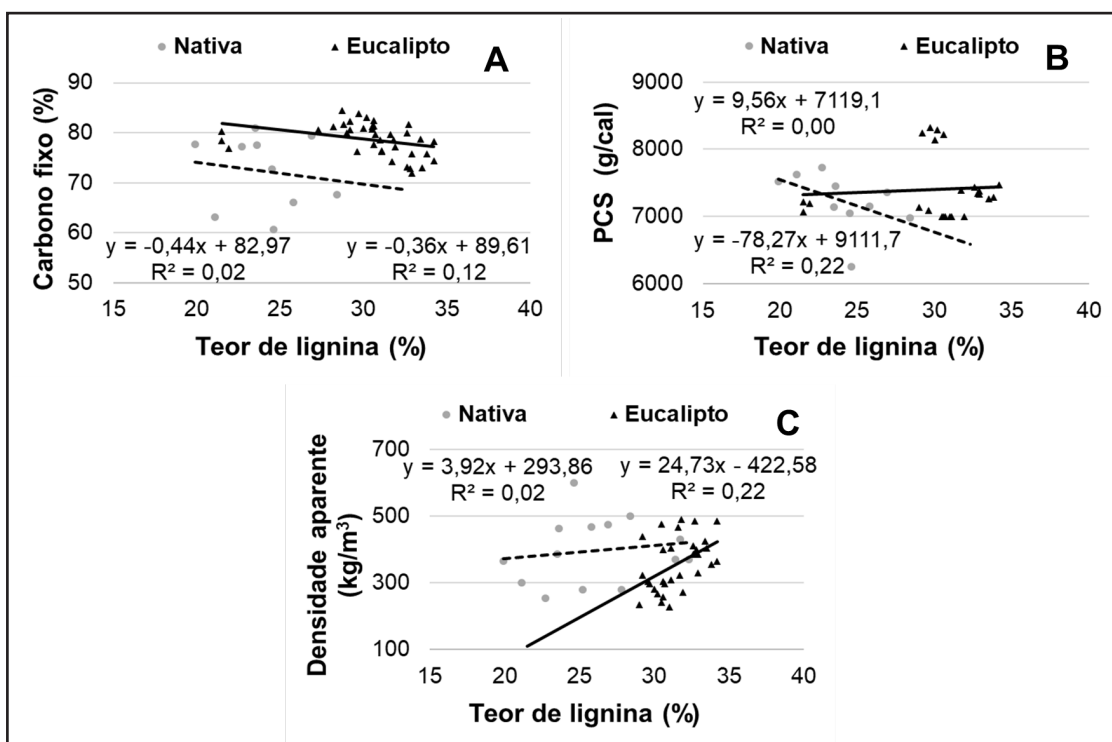
Fonte: Autores: (2024)

O teor de carbono fixo do carvão apresentou uma tendência de decréscimo à medida que o teor de lignina da madeira aumentou (Figura 3A), comportamento semelhante para ambos os grupos de madeiras. Para madeiras de clones de eucalipto, o teor de carbono fixo do carvão variou entre 71,9 e 84,4%, para uma variação do teor de lignina da madeira entre 21,5 e 34,2%, e o teor de carbono fixo do carvão vegetal das madeiras de espécies nativas variou entre 60,6 e 81,0%, para uma variação do teor de lignina da madeira entre 19,9 e 32,3%.

O teor de lignina colaborou negativamente com o teor de carbono fixo, ao

contrário do que se esperava. Isso pode ser explicado pelo fato de as condições de carbonização terem que ser mais drásticas para madeiras mais densas (Figura 1C), que conseqüentemente apresentam maiores teores de lignina (Figura 3A). As maiores temperaturas de carbonização levam a uma maior degradação dos carboidratos e da lignina, mesmo sendo a lignina mais resistente a degradação térmica.

Figura 3 – Influência do teor de lignina da madeira de espécies nativas e clones eucalipto com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C)



Fonte: Autores (2024)

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal de eucalipto apresentou uma leve tendência de aumento com a elevação do teor de lignina da madeira, e variou entre 6996 cal/g e 8326 cal/g, para uma variação do teor de lignina entre 21,5 e 34,2%, conforme Figura 3B. De acordo com Santana (2009), o poder calorífico do carvão é mais elevado na presença de um maior teor de lignina e extrativos na madeira, devido ao fato de que estes contêm menores porcentagens de oxigênio do que os polissacarídeos.

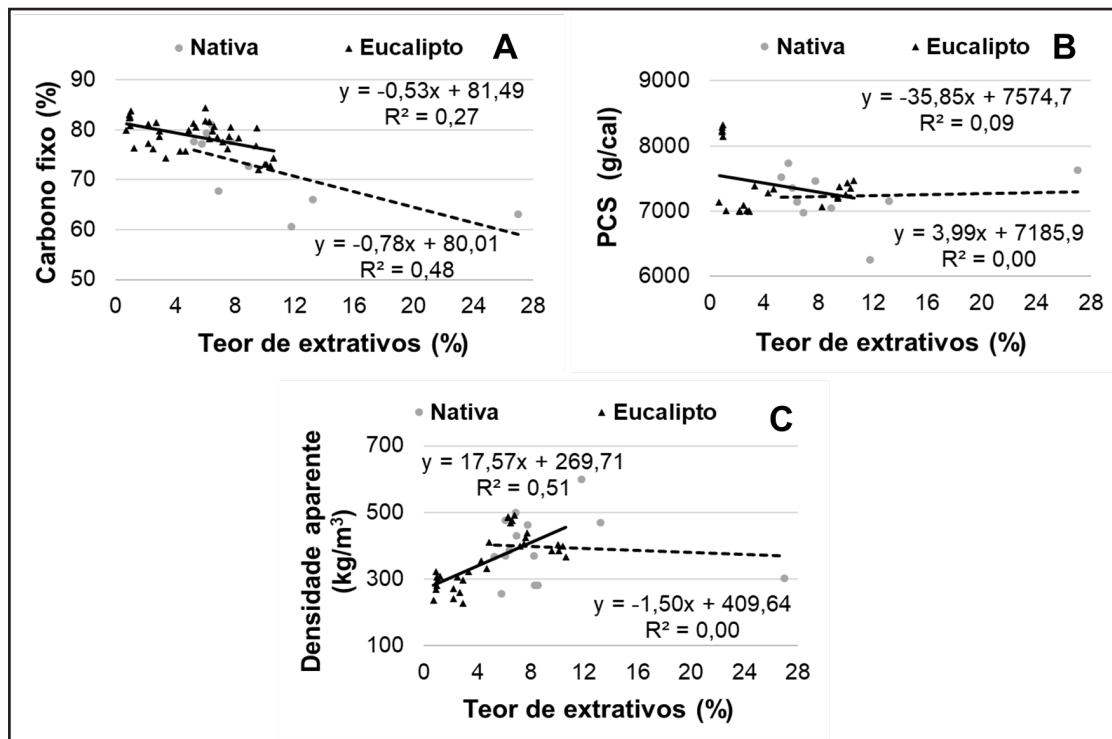
Contudo, o poder calorífico do carvão vegetal de espécies nativas apresentou uma tendência de decréscimo à medida que o teor de lignina da madeira aumentou, e variou entre 6248 cal/g e 7730 cal/g para uma variação do teor de lignina entre 19,9 e 32,3%. Isso acontece devido essas madeiras serem muito mais densas que as madeiras de eucalipto e demandarem condições de carbonização mais drásticas (temperatura e tempo) e conseqüentemente a produção de carvão vegetal com menor energia armazenada.

A densidade aparente do carvão de eucalipto e nativas apresentou tendência de aumento à medida que o teor de lignina da madeira aumentou, variando de 227 kg/m³ a 491 kg/m³ para eucalipto e de 255 kg/m³ a 600 kg/m³ para nativas (Figura 3C). Isso pode ser explicado pela estabilidade térmica da lignina em relação aos carboidratos. Como a lignina é muito mais estável termicamente, os indivíduos que apresentam maiores teores desse composto conservaram uma quantidade maior de massa no carvão vegetal.

Vale, Dias e Santana (2010) avaliaram as relações entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do Cerrado, e encontraram uma relação significativa e diretamente proporcional do teor de lignina da madeira com a densidade aparente do carvão vegetal.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal apresentou uma tendência de decréscimo à medida que se elevou o teor de extrativos da madeira, padrão observado de maneira semelhante em ambas as espécies. O teor de carbono fixo do carvão vegetal de eucalipto variou entre 71,9 e 84,4%, para uma variação do teor de extrativos da madeira entre 0,9 e 10,6%, e o teor de carbono fixo do carvão vegetal de nativas variou entre 60,6 e 81,0%, para uma variação do teor de extrativos da madeira da madeira entre 5,3% e 27,0% (Figura 4A). Vale, Dias e Santana (2001) afirmam que a presença de compostos oriundos dos extrativos diminuem o teor de carbono fixo do carvão vegetal por serem compostos que se volatilizam, em sua maioria, durante o processo térmico, principalmente em madeiras com maior teor de extrativos.

Figura 4 – Influência do teor de extrativos da madeira de nativa e eucalipto com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C)



Fonte: Autores (2024)

Quanto ao poder calorífico superior do carvão vegetal de eucalipto, observou-se um padrão de decréscimo à medida que o teor de extrativos da madeira aumentou, com variação de 6996 cal/g a 8326 cal/g, conforme Figura 4B. Isso ocorre devido à propensão dos extrativos a se volatilizarem durante o processo de carbonização, o que pode ter um impacto adverso na qualidade do carvão resultante, levando a um produto com teor de carbono fixo reduzido e, conseqüentemente, menor poder calorífico.

Em contrapartida, o poder calorífico superior do carvão de nativas aumentou levemente com o aumento do teor de extrativos da madeira, com variação de 6248 cal/g a 7730 (Figura 4B). Frederico (2009) afirma que dependendo da resistência à degradação térmica dos extrativos presentes na madeira, maior porcentagem de extrativos poderá colaborar para o aumento no poder calorífico do carvão. Os

extrativos nas madeiras nativas são encontrados em maiores quantidades e maior diversidade, o que pode explicar essa tendência diferente daquela apresentada pelas madeiras dos clones de eucalipto.

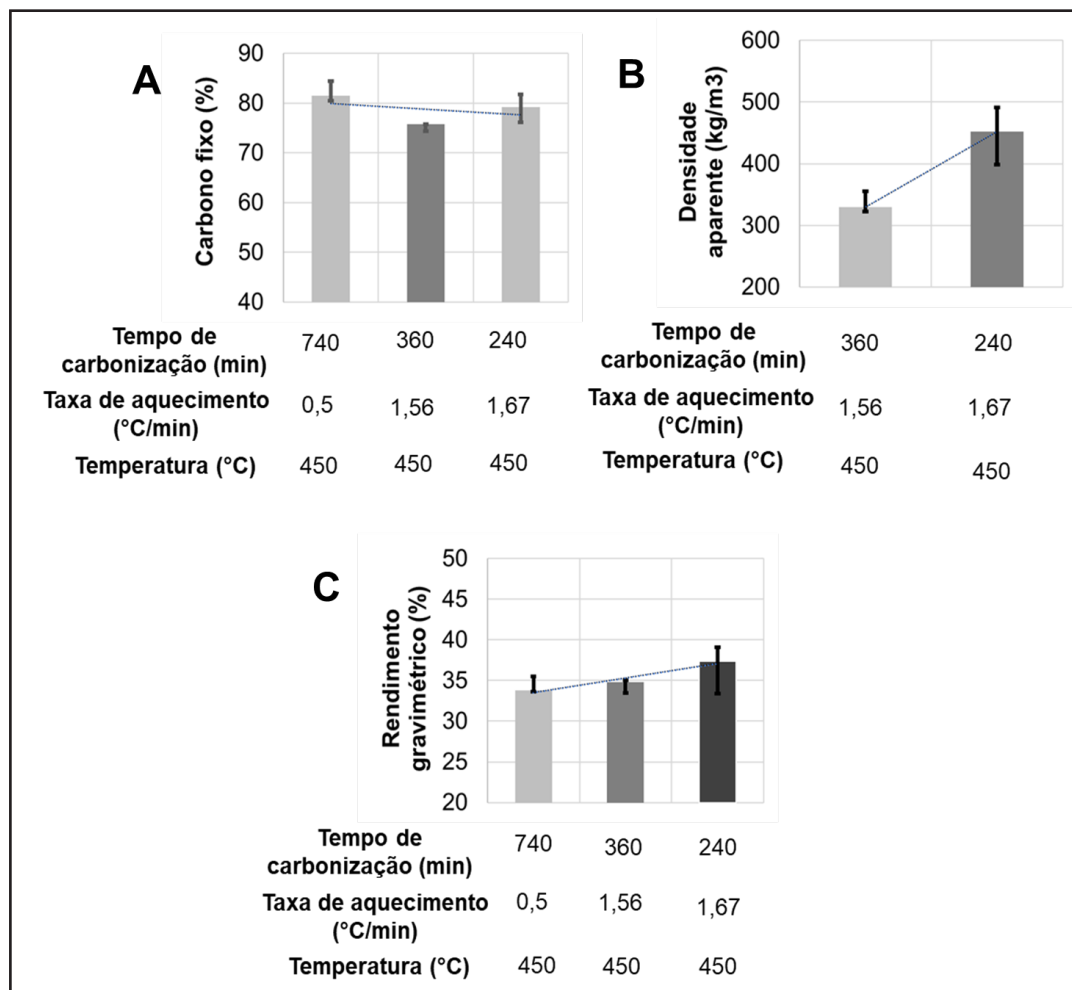
Por fim, a densidade aparente do carvão vegetal de eucalipto aumentou com o aumento do teor de extrativos, variando entre 227 kg/m³ e 491 kg/m³. Para madeiras de espécies nativas, a densidade aparente do carvão vegetal diminuiu com o aumento do teor de extrativos, variando entre 255 kg/m³ e 600 kg/m³ (Figura 4C). Parte dos extrativos da madeira, principalmente madeiras com elevados teores de extrativos tendem a ficar no carvão vegetal e colaborar positivamente com a densidade do carvão, entretanto, trata de madeiras de maiores densidades e condições de carbonização mais drásticas, e por isso menores densidades do carvão vegetal produzido.

3.4 Estudo dos parâmetros do processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal

Os parâmetros da carbonização são definidos em função da qualidade do carvão vegetal para atender as especificações de um determinado produto. As informações sobre as madeiras de eucalipto provenientes dos materiais científicos utilizados neste estudo para comparação dos parâmetros do processo de carbonização indicaram, em sua maioria, tempos de carbonização de 240, 360 e 740 minutos, taxa de aquecimento de 0,5, 1,56 e 1,67°C/min e temperatura final de 450°C.

A partir desses dados foi possível observar que, para madeira de eucalipto, o teor de carbono fixo foi maior quando utilizadas as condições extremas, ou seja, maior tempo de carbonização (740 min) associado a menor taxa de aquecimento (0,5°C); e menor tempo de carbonização (240 min) associado a maior taxa de aquecimento (1,67°C), conforme Figura 5A, ou seja, tempos de carbonização mais longos associados a uma taxa de aquecimento mais lenta permitiram um processo mais estável de decomposição térmica e uma liberação mais eficientes de compostos voláteis, enquanto promoveram uma retenção mais eficaz do carbono estrutural na forma de carvão vegetal.

Figura 5 – Influência dos parâmetros da carbonização (tempo, taxa de aquecimento e temperatura final) na qualidade do carvão vegetal das madeiras de eucalipto: teor de carbono fixo (A), densidade aparente do carvão (B) e o rendimento gravimétrico (C)



Fonte: Autores (2024)

A densidade aparente do carvão vegetal e o rendimento gravimétrico foram maiores quanto mais curto o tempo de carbonização (240 min) associado a uma taxa de aquecimento mais elevada (1,67 °C/min), o que produziu um carvão mais denso (453 kg/m³) e um rendimento gravimétrico superior (37,4%).

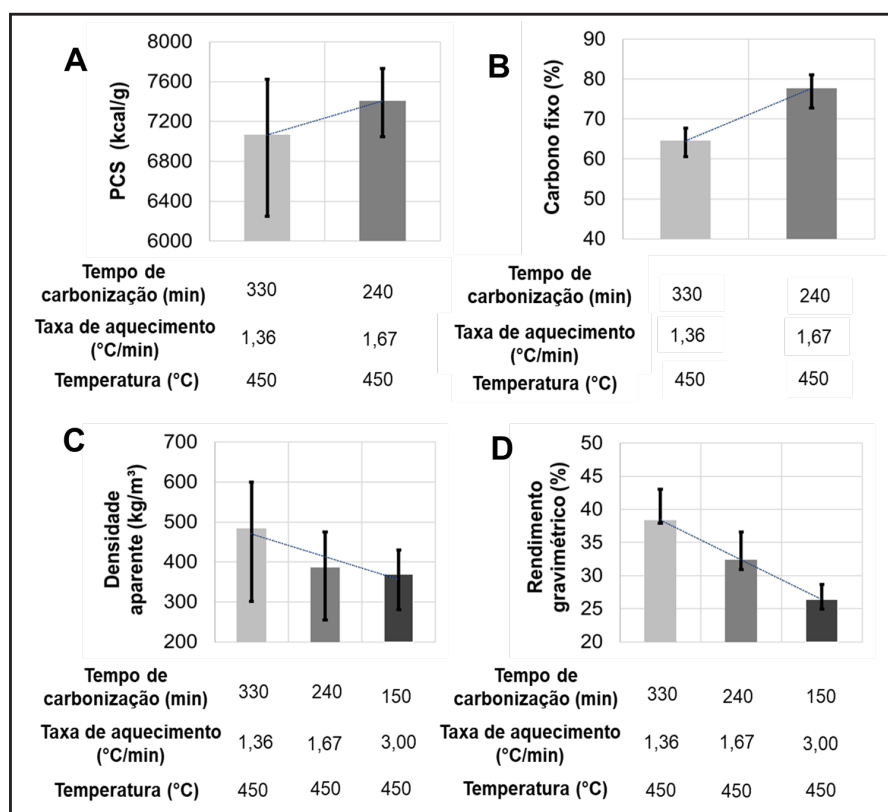
Os valores de poder calorífico superior do carvão vegetal oriundo de madeiras de eucalipto quase não foram informados nos trabalhos consultados e por isso não foi possível realizar essa avaliação.

As informações sobre as madeiras de espécies nativas provenientes dos materiais científicos utilizados neste estudo para comparação dos parâmetros do

processo de carbonização indicaram, em sua maioria, tempos de carbonização de 150, 240 e 330 minutos, taxa de aquecimento de 1,36 1,67 e 3,0 °C/min e temperatura de 450 °C. Em relação à carbonização da madeira de eucalipto, os tempos de carbonização apresentaram menor variação e menores valores, enquanto as taxas de aquecimento foram superiores.

Foi possível perceber que, para madeira de espécies nativas, o poder calorífico superior do carvão vegetal foi maior quando utilizadas as condições de menor tempo de carbonização (240 min) associada a maior taxa de aquecimento (1,67 °C), conforme Figura 6A, enquanto o menor valor foi encontrado quando combinados maior tempo de carbonização e menor taxa de aquecimento (330 minutos e 1,36 °C). Isso demonstra que mesmo madeiras diferentes podem produzir carvão vegetal com elevado poder calorífico superior, desde que utilizadas condições de processo específicas.

Figura 6 – Influência dos parâmetros da carbonização na qualidade do carvão vegetal das madeiras de espécies nativas: poder calorífico superior (A), o teor de carbono fixo (B) a densidade aparente do carvão (C) e o rendimento gravimétrico (D)



Fonte: Autores (2024)

O teor de carbono fixo do carvão vegetal de nativas apresentou comportamento semelhante ao do poder calorífico superior, foi maior quando utilizada maior taxa de aquecimento (1,67 °C/min) e menor tempo de carbonização (240 min), conforme Figura 6B. Assim, condições que envolvem uma taxa de aquecimento mais alta e um tempo de carbonização mais curto podem ser mais favoráveis para alcançar um carvão com um teor de carbono fixo mais alto e, conseqüentemente, um maior poder calorífico superior.

Por fim, a densidade aparente e o rendimento gravimétrico de espécies nativas, apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, a maior densidade aparente do carvão (484 kg/m³) e o maior rendimento em carvão (38,4%) foram observados na condição com maior tempo de carbonização (330 min) e menor taxa de aquecimento (1,36°C/min), para a temperatura de 450°C, conforme Figuras 6C e 6D, respectivamente.

Isso está relacionado às condições de um processo de carbonização mais longo e menor drástico (menor taxa de aquecimento), resultando em processo com menor liberação de gases e um carvão mais pesado com maior teor de materiais voláteis, importante para elevação da densidade e do rendimento.

4 CONCLUSÕES

Em relação às madeiras:

– A densidade básica, o teor de lignina total e o teor de extrativos foram as características mais apresentadas nos trabalhos científicos, enquanto o teor de holocelulose e relação S/G da lignina foram as informações menos apresentadas nas pesquisas.

– Foi perceptível a diferença na quantidade de estudos usando a madeira de nativas em relação ao eucalipto, sendo a grande maioria dos estudos focados em madeiras de eucalipto.

Em relação ao processo de carbonização:

– A temperatura final foi uma variável praticamente fixa (450 °C), enquanto o tempo total de carbonização e a taxa de aquecimento variaram de acordo com a qualidade da madeira (nativas e eucalipto).

REFERÊNCIAS

- BASSO, S. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná. 2017.
- COSTA, T. G. *et al.* Wood quality of five species from cerrado for production of charcoal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, jan./mar. 2014.
- FREDERICO, P. G. U. **Effect of region and *Eucalyptus* wood on charcoal properties**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- IBÁ – Indústria Brasileira de produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2023 ano base 2022**. Brasília: 2023. 91 p.
- LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira**. 2020. 205f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.
- MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; ALMEIDA, A. M. C.; PIMENTA, A. S.; CARNEIRO, A. C. O. Physicochemical and energetic characteristics of two species occurring in the brazilian semiarid. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 579-588, jul.-set., 2012.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Quality parameters of *Eucalyptus pellita* F. Muell. Wood and charcoal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- PEREIRA, A. K. S. **Relação entre a temperatura e o tempo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp**. 2021. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, 2021.
- PROTÁSIO, P. T.; LIMA, M. D. R.; JUNIOR, U. O. B.; BUFALINO, L.; SILVA, A. R.; GONÇALVES, D. A.; TRUGILHO, P. F. 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.*
- PROTÁSIO, T. P.; COSTA, J. S.; SCATOLINO, M.V.; LIMA, M. D. R.; DE ASSIS, M. R.; DA SILVA, M. G.; BUFALINO, L. DIAS JUNIOR, A. F.; TRUGILHO, P. F. Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 4491-4508, 2021.
- RODRIGUES, T.; BRAGHINI JÚNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 143, e104670, 2019.
- SANTANA, W. M. S. **Growth, yield and wood Properties of the wood of *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* clone for energy purposes**. 2009. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SANTOS, R. C. **Quality parameters of wood and charcoal from *Eucalyptus* clone**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SILVA, D.A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; CUNHA, A. B. **Energy characterization of *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. São Jorge: Universidade Federal do Paraná, 2011.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relationships among Chemical Properties, physical and energy wood Properties of five cerrado species. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n.1, p. 137-145, jan.-mar., 2010.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relationships between the basic density of wood, the yield and quality of charcoal from cerrado species. **Revista Árvore**, v.25, n.1, p.89-95, 2001.

VITAL, B. R.; ALMEIDA, J.; VALENTE, O.F.; PIRES, I. E. Growth, wood and charcoal characteristics for the classification of *Eucalyptus* spp. Clones aiming at energetic use. **IPEF**, n. 47, p. 22-28, maio 1994.

Contribuição de Autoria

1 Rafaella Dias Ramos

Engenheira Florestal

<https://orcid.org/0009-0008-3257-2106> • ra.fadias@hotmail.com

Contribuição: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise de dados; Administração do projeto

2 Dalton Longue Júnior

Engenheiro Florestal, Doutor em Ciência Florestal

<https://orcid.org/0000-0002-5149-3074> • dalton@uesb.edu.br

Contribuição: Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita – revisão e edição

3 Guilherme Sampaio Pereira

Engenheiro Florestal

<https://orcid.org/0000-0002-2613-5021> • sampaioguimas@gmail.com

Contribuição: Pesquisa; Metodologia

4 João Vitor Morais da Silva

Engenheiro Florestal

<https://orcid.org/0009-0003-9451-0131> • joaomoraisart@gmail.com

Contribuição: Pesquisa; Metodologia

5 Mara Lúcia Agostini Valle

Engenheira Florestal, Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira

<https://orcid.org/0000-0003-2121-5281> • maraagostini@ufsb.edu.br

Contribuição: Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita – revisão e edição

6 Ananias Francisco Dias Júnior

Engenheiro Florestal, Doutor em Recursos Florestais

<https://orcid.org/0000-0001-9974-0567> • ananias.dias@ufes.br

Contribuição: Supervisão; Validação de dados e experimentos; Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

RAMOS, R. D.; LONGUE JÚNIOR, D.; PEREIRA, G. S.; SILVA, J. V. M.; VALLE, M. L. A.; DIAS JÚNIOR, A. F. Influência da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 4, e87722, p. 1-21, 2024. DOI 10.5902/1980509887722. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509887722>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.