ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO VEGETAL DE *Eucalyptus grandis* PRODUZIDO NA REGIÃO DE GUANHÃES-MG

Autores: Tailhane Luiza Andrade de Sousa, Ana Clara Gomes de Queirós, Lucas dos Santos Monteiro, Ricardo Gomes de Oliveira, Edgard Geraldo Bertoli Trindade, Bruno Oliveira Lafetá, Caroline Junqueira Sartori.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Av. Primeiro de Junho, 1043 - Centro, São João Evangelista - MG, 39705000, Brasil, luizatailhane@gmail.com, anaclaragdq@gmail.com, lucassantosmonteiro2003@gmail.com, ricardo.gomes@ifmg.edu.br, edgard.trindade@ifmg.edu.br, bruno.lafeta@ifmg.edu.br, caroline.sartori@ifmg.edu.br.

Resumo

O carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. desempenha papel relevante na matriz energética brasileira, especialmente em Minas Gerais, sendo amplamente utilizado para geração de energia e na siderurgia. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a análise química imediata de carvão vegetal produzido no município de Guanhães – MG. Foram determinados os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, além da estimativa do poder calorífico superior por meio da equação de Goutal. Os resultados indicaram umidade de 5,62%, teor de materiais voláteis de 24,83%, teor de cinzas de 1,03% e carbono fixo de 74,14%. O poder calorífico estimado foi de 8.636,97 kcal kg^{-1}. Os baixos teores de umidade e cinzas, associados ao elevado teor de carbono fixo, evidenciam a elevada qualidade energética do material. Conclui-se que o carvão vegetal avaliado apresenta características adequadas para aplicações energéticas e industriais, destacando-se pelo alto rendimento térmico e pela eficiência durante a combustão.

Palavras-chave: carvão vegetal. eucalipto. biomassa florestal. análise química imediata. poder calorífico.

Área do Conhecimento: Engenharia Florestal.

Introdução

O uso da biomassa florestal para geração de energia é uma prática histórica e relevante para diversas economias regionais. No Brasil, o gênero *Eucalyptus* destaca-se como principal fonte de matéria-prima energética, devido ao rápido crescimento e à qualidade tecnológica da madeira, resultado dos avanços em silvicultura e melhoramento genético (Protásio *et al.*, 2013). Além da importância industrial, a produção de carvão vegetal constitui fonte de renda para pequenos produtores rurais (Bauer *et al.*, 2015).

O carvão vegetal destaca-se na matriz energética brasileira por substituir o carvão mineral fóssil e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa na siderurgia (Magalhães *et al.*, 2022). Minas Gerais concentra mais de 40% das empresas do setor (Ibá, 2025), sendo o carvão utilizado como fonte de energia e agente redutor na produção de ferro-gusa e aço (Assis *et al.*, 2012). Entretanto, parte da produção ainda utiliza fornos de alvenaria rudimentares, com baixo rendimento e limitado controle do processo (Oliveira *et al.*, 2013), o que pode gerar carvão com propriedades físicas e químicas heterogêneas e comprometer sua produtividade industrial (Vieira, 2013).

A análise química imediata permite determinar os teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, sendo fundamental para avaliar a qualidade do carvão (Vale *et al.*, 2010). O carbono fixo está relacionado à energia armazenada, enquanto elevados teores de cinzas podem prejudicar processos metalúrgicos (Negrão; Barros, 2017). Os materiais voláteis influenciam a ignição e a estabilidade da chama, sendo desejáveis baixo teor de cinzas, baixa umidade e elevado carbono fixo para um carvão de alta qualidade (Nunes *et al.*, 2020). O poder calorífico, por sua vez, tende a aumentar com o teor de carbono fixo (Huang *et al.*, 2009).

Diante da importância do setor florestal em Minas Gerais e da necessidade de avaliar a qualidade do carvão produzido regionalmente, este trabalho teve como objetivo realizar a análise química imediata do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* produzido no município de Guanhães – MG.

Metodologia

Origem e coleta do material

Para a execução deste estudo, foram obtidas amostras de carvão vegetal provenientes de povoamentos de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade, conduzidos em segunda rotação, localizados no município de Guanhães, Minas Gerais (18° 46′ 30″ S, 42° 55′ 58″ W). O carvão vegetal foi produzido por meio do processo de carbonização em fornos de encosta (ou barranco), sistema amplamente utilizado na produção tradicional de carvão vegetal na região. As amostras foram coletadas e encaminhadas ao laboratório para a realização das análises químicas e energéticas.

Preparo do material para análise química imediata

Inicialmente, o carvão vegetal foi submetido à trituração em moinho de facas do tipo Wiley, com o objetivo de promover a redução e homogeneização do tamanho das partículas. Em seguida, o material triturado foi classificado por meio de peneiramento utilizando peneiras de 40 e 60 mesh, sendo empregada nas análises a fração retida na peneira de 60 mesh, conforme procedimentos comumente adotados para a caracterização química de carvão vegetal. A padronização granulométrica das amostras foi realizada visando garantir maior uniformidade e confiabilidade nos resultados obtidos. Todas as determinações foram conduzidas em triplicata, permitindo maior precisão analítica e avaliação da repetibilidade dos ensaios.

Determinação da umidade do carvão vegetal

Para a determinação da umidade do carvão, utilizou-se aproximadamente 1,0 g do material, empregando uma balança de precisão e cadinhos de porcelana previamente secos e tarados. Após a obtenção das massas úmidas (Mu), as amostras foram submetidas a um período de secagem por 2 horas em estufa com circulação de ar a 105 ± 3 °C, seguido pelo armazenamento em dessecador por 15 minutos para resfriamento. Esse processo permitiu uma nova pesagem, resultando na obtenção da massa seca (Ms) e determinação da umidade em base úmida (Ubu), conforme Equação 1.

$$Ubu = \frac{Mu - Ms}{Mu} \; x \; 100 \qquad Eq.\ 1$$

Ubu: umidade em base úmida, em %;
Mu: massa úmida, em g;
Ms: massa seca, em g.

Determinação dos materiais voláteis

Após a determinação da massa seca do carvão, as amostras em cadinhos tampados foram utilizadas para a análise dos materiais voláteis, sendo submetidas à mufla a temperaturas de 950 °C. Antes desse processo, foi realizado um pré-aquecimento de dois minutos na extremidade externa da porta da mufla para aclimatação, seguido por mais três minutos na borda da mufla, e, em seguida, as amostras permaneceram por seis minutos no interior da mufla fechada. Logo após, aguardou-se aproximadamente 30 minutos para o resfriamento e foi determinada em balança de precisão a massa seca sem voláteis (Mms), a fim de calcular o teor de materiais voláteis conforme a Equação 2.

$$TMV = \frac{Ms - Mms}{Ms} \; x \; 100 \qquad Eq.\ 2$$

TMV: teor de materiais voláteis em %;
Ms: massa da amostra seca em estufa, em g;
Mms: massa, em g após o tratamento a 950°C.

Determinação do teor de cinzas do carvão vegetal

Para a determinação do teor de cinzas do carvão vegetal, as amostras foram levadas à mufla, a 750 °C sem as tampas, mantendo-se por um período de 6 horas, e, a massa residual de cinzas (Mr), foi determinada em balança de precisão após o resfriamento em dessecador. Aplicou-se a Equação 3 para

calcular o teor de cinzas, levando em consideração a massa residual inorgânica resultante da incineração.

$$TCz = \frac{Mr}{Ms} \; x \; 100 \qquad Eq.\ 3$$

TCz: teor de cinzas em %;
Ms: massa da amostra seca em estufa em g;
Mr: massa, em g do resíduo após a incineração da matéria orgânica.

Determinação do teor de carbono fixo

Com base nos parâmetros previamente estabelecidos, calculou-se o teor de carbono fixo (TCF) do carvão por meio da aplicação da Equação 4.

$$TCF = 100 - TMV - TCz \qquad Eq.\ 4$$

TCF = teor de carbono fixo;
TMV = teor de materiais volatéis;
TCz = teor de cinzas.

Determinação do Poder Calorífico Superior

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi estimado utilizando a Equação de Goutal (Sater *et al.*, 2011) (Equação 5).

$$PCS = (82 * Cf + A * V) \qquad Eq.\ 5$$

Cf = carbono fixo, %;
A = coeficiente A, derivado da relação V/(V+Cf);
V = materiais voláteis, %.

Resultados

Os valores médios, os desvios padrão e os coeficientes de variação (CV) obtidos para os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do carvão vegetal analisado estão apresentados na Tabela 1. Esses parâmetros permitem avaliar a composição química imediata do material, bem como a variabilidade dos resultados obtidos entre as repetições experimentais.

Tabela 1 – Valores médios de umidade (Ubu), Teor de materiais voláteis (TMV), Teor de cinzas (TCz) e Teor de carbono fixo (TCF) no carvão vegetal. Onde, D.P = Desvio Padrão e C.V = Coeficiente de Variação.

	UBU (%)	TMV (%)	TCz (%)	TCF (%)	PCS (kcal/kg)
Média	5,62	24,83	1,03	74,14	8636,97
D.P	0,08	0,59	0,04	0,62	
C.V	1,47	2,39	3,48	0,84	

Fonte: elaborado pelos próprios autores.

Discussão

Os resultados obtidos para o carvão vegetal demonstram desempenho satisfatório quanto às propriedades químicas e energéticas, considerando os parâmetros de umidade (Ubu), teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCz) e teor de carbono fixo (TCF), os quais são fundamentais para avaliar a qualidade do combustível sólido e sua aplicabilidade em processos térmicos e industriais.

A umidade média observada foi de 5,62%, valor considerado baixo para carvão vegetal, o que é desejável, pois a presença de água reduz a eficiência energética do combustível. Este resultado está alinhado com o observado no mercado nacional, aproximando-se da média de 5,21% relatada por Assis *et al.* (2012) em marcas comerciais.

O teor de materiais voláteis apresentou média de 24,83%, caracterizando um carvão com voláteis em nível moderado, associado a um processo de carbonização eficiente. Tal valor situa-se dentro da faixa ideal (20% e 25%) citada por Protásio *et al.* (2013) para *Eucalyptus* de alta densidade e próximo à média de 26,11% verificada por Assis *et al.* (2012). Em termos práticos, os materiais voláteis influenciam diretamente a ignição e a formação de chama, pois correspondem a compostos que se desprendem e queimam rapidamente durante o aquecimento (Trugilho; Silva, 2001). Valores muito elevados podem indicar carvão pouco carbonizado, com maior liberação de gases e fumaça, o que reduz a estabilidade da combustão e pode comprometer a eficiência em aplicações industriais. Assim, o valor obtido sugere equilíbrio entre facilidade de ignição e controle da queima, além de indicar tendência de maior concentração de carbono fixo, que é a fração mais relevante para geração de energia de forma contínua (Brito; Barrichelo, 1979).

O teor de cinzas (TCz) foi de 1,03%, considerado baixo e altamente favorável, uma vez que as cinzas representam o resíduo mineral não combustível do carvão. Este resultado é inferior ao limite de 1,5% sugerido por Nunes *et al*. (2020) para carvão de uso siderúrgico de alta qualidade e significativamente menor que a média de 2,98% encontrada em carvões comerciais (Assis *et al.*, 2012). Teores elevados de cinzas reduzem o poder calorífico e prejudicam o desempenho energético, pois aumentam a quantidade de material inerte no combustível, diminuindo a eficiência da combustão. Além disso, altos níveis de cinzas podem gerar problemas operacionais, como maior acúmulo de resíduos, necessidade frequente de limpeza e risco de incrustações em equipamentos (Brand, 2010). Portanto, o baixo teor de cinzas observado indica um combustível de melhor qualidade comparável aos melhores clones avaliados por Vale *et al.* (2010), com maior aproveitamento energético e menor produção de resíduos sólidos após a queima.

O teor de carbono fixo (TCF) apresentou média de 74,14%, valor elevado e diretamente associado à qualidade do carvão vegetal. Este percentual supera a média de mercado de 70,85% (Assis *et al.*, 2012), demonstrando superioridade técnica. O carbono fixo representa a fração responsável pela combustão lenta e prolongada, garantindo estabilidade térmica e maior rendimento energético. Em aplicações industriais, como siderurgia e processos de geração de calor, altos teores de carbono fixo são desejáveis por proporcionarem queima mais constante, maior durabilidade do combustível e maior eficiência térmica (Vieira, 2013).

Em concordância com os parâmetros discutidos, o poder calorífico calculado pela equação de Goutal foi de 8636,97 kcal/kg, evidenciando alto potencial energético. O valor obtido supera a faixa média de 7500 a 8300 kcal/kg comumente citada na literatura para o gênero (Vale *et al.*, 2010; Protásio *et al.*, 2013). Esse resultado é compatível com o conjunto de propriedades observadas, especialmente a baixa umidade e o alto teor de carbono fixo, que favorecem a liberação de energia de forma mais eficiente e contínua. Dessa forma, o carvão vegetal analisado apresenta características desejáveis para utilização energética, com vantagens operacionais e ambientais associadas à redução de resíduos e melhor aproveitamento do combustível.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o carvão vegetal analisado apresentou propriedades químicas e energéticas favoráveis, evidenciadas pela baixa umidade (5,62%), teor moderado de materiais voláteis (24,83%), baixo teor de cinzas (1,03%) e alto teor de carbono fixo (74,14%). Esses parâmetros indicam um material com boa estabilidade na combustão, elevada eficiência energética e menor geração de resíduos após a queima. Além disso, o poder calorífico estimado (8636,97 kcal/kg) reforça o potencial do carvão como combustível sólido de alto desempenho, compatível com aplicações que exigem elevado rendimento térmico e constância na liberação de energia. Assim, os resultados demonstram que o carvão vegetal avaliado possui qualidade adequada para fins energéticos e industriais, destacando-se como alternativa eficiente e tecnicamente viável para geração de calor e processos térmicos.

Referências

ASSIS, M. R. de *et al*. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S.l.], v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL (ABTCP). **Normas técnicas ABCP**. São Paulo: ABTCP, 1974.

BAUER, E. *et al*. A produção de carvão vegetal na agricultura familiar do Sul do Brasil: retrato de uma realidade escondida. **Revista PerCursos**, Florianópolis, v. 16, n. 30, p. 99-121, 2015.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRITO, J. O; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. Piracicaba: **IPEF**, 1979. 7p. (Circular Técnica, n. 52).

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, [S. l.], v. 29, n. 6, p. 1793–1797, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.027. Acesso em: 19 jan 2026.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2025**. São Paulo: IBÁ, 2025. Disponível em: https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf. Acesso em: 19 jan. 2026.

MAGALHÃES, L. C.; SILVA, D. A.; SOARES, J. R. S.; COSTA, A. L. Sustainable charcoal use for CO_2 emissions neutrality in the steel industry. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND MATERIAL EFFICIENCY AND CO_2 REDUCTION IN THE STEEL INDUSTRY (EMECR), 4., 2022, São Paulo. **Proceedings**.... São Paulo: ABM, 2022. p. 221–227.

NEGRÃO, R. S.; BARROS, D. S. **Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria e exploração florestal no município de Anapú – PA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2017.

VIEIRA, R. S. *et al*. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de Eucalyptus microcorys. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000100008. Acesso em: 19 jan. 2026.

OLIVEIRA, A. C. *et al*. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019. Acesso em: 19 jan. 2026.

PROTÁSIO, T. P. *et al*. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137–149, 2013.

SATER, O. *et al*. Estudo comparativo da carbonização de resíduos agrícolas e florestais visando à substituição da lenha no processo de secagem de grãos de café. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 6, 2011.

NUNES, G. R. S. *et a*l. Qualidade do carvão vegetal para consumo doméstico comercializado na região central do Rio Grande do Sul. **Agropecuária Científica No Semiárido**, v. 16, n. 3, p. 119, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v16i3.1265. Acesso em: 19 jan. 2026.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (Himenea courbaril L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976. Acesso em: 19 jan. 2026.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus São João Evangelista, pelo apoio institucional e pela disponibilização da infraestrutura necessária para a realização deste trabalho.