



ARTIGO ORIGINAL

Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos

Quality of charcoal marketed in southeast Pará for cooking foods

Rudson Silva Oliveira^{1*}
Luan Felipe Feitosa da Silva¹
Fernando Wallase Carvalho
Andrade²
Paulo Fernando Trugilho³
Thiago de Paula Protásio⁴
Selma Lopes Goulart⁴

¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Rua Prefeito Lothário Meissner, 632, 80210-170, Curitiba, PR, Brasil

² Universidade Federal do Oeste do Pará (Ufopa), Rua Vera Paz, s/n, 68035-110, Santarém, PA, Brasil

³ Universidade Federal de Lavras (Ufla), Departamento de Ciências Florestais, s/n, 37200-000, Lavras, MG, Brasil

⁴ Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra), Rodovia PA 275, km 13, s/n, 68515-000, Parauapebas, PA, Brasil

*Autor Correspondente:

E-mail: rudsonoliveira@ufpr.br

PALAVRAS-CHAVE

Carvão de resíduo de madeira
Churrasco
Cocção de alimentos
Região amazônica

KEYWORDS

Waste wood charcoal
Barbecue
Cooking foods
Amazon area

RESUMO: Em 2017, no Brasil, os setores residencial e comercial consumiram cerca de 677.000 toneladas de carvão vegetal. Devido à expressividade deste consumo, conduziram-se alguns trabalhos para atestar a qualidade desse combustível em vários estados, entretanto, no Pará, continuam incipientes pesquisas dessa temática. Portanto, aqui, objetivou-se caracterizar o carvão vegetal para cocção de alimentos comercializados no sudeste paraense e avaliar se a qualidade atende aos parâmetros indicados ao Selo Carvão *Premium*. Conduziu-se a pesquisa no município de Parauapebas, onde foram selecionadas três marcas de carvão (A, B e C) em três locais de venda diferentes, adquirindo-se pacotes com 5 kg em três meses, totalizando 15 kg. As variáveis analisadas foram: densidade relativa aparente, umidade base seca, poder calorífico superior, poder calorífico útil, densidade energética, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e composição química elementar (C, H, N, S e O). Os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado, sendo três tratamentos e 18 repetições, totalizando 54 unidades amostrais. Todas as marcas apresentaram umidade acima de 5%, densidade relativa aparente superior a 420 kg m⁻³ e elevados percentuais de cinzas (> 1,5%). As marcas B e C apresentaram teores de materiais voláteis entre 17%-19% e de carbono fixo entre 78%-80%, respectivamente. O poder calorífico útil médio para os carvões da região foi de 6672 kcal kg⁻¹. Os carvões vegetais para a cocção de alimento analisados apresentam baixa qualidade, entretanto, as marcas B e C foram as que mais se aproximaram dos padrões mínimos exigidos pelo Selo Carvão *Premium* do estado de São Paulo.

ABSTRACT: In 2017, the residential and commercial sectors consumed around 677,000 tons of charcoal in Brazil. Due to the expressiveness of this consumption, some studies to attest the quality of this fuel were conducted in several states of Brazil; however, in Pará, studies on this subject are still incipient. Therefore, this study aimed to characterize the charcoal for cooking food marketed in southeastern Pará and to evaluate whether the quality observed meets the parameters indicated by the Selo Carvão *Premium*. The study was conducted in the city of Parauapebas, where three brands of charcoal (A, B, and C) were selected in three different points of sale, with packages of 5 kg being acquired in a three-month period, totaling 15 kg. The variables analyzed were apparent relative density, humidity, higher heating value, net heating value, energy density, volatile materials, ash, fixed carbon and elemental chemical composition (C, H, N, S, and O). The data were analyzed in a completely randomized design, being three treatments and eighteen replications, totaling fifty-four sample units. All brands had moisture content above 5%, apparent relative density greater than 420 kg m⁻³, and high percentages of ash (> 1.5%). The B and C brands had volatile material contents between 17 – 19% and fixed carbon between 78 – 80%, respectively. The average net heating value for the charcoals of the region was 6672 kcal kg⁻¹. The charcoal for cooking foods analyzed have low quality; however, brands B and C were the closest to the minimum standard required by the Selo Carvão *Premium* of the state of São Paulo.

1 Introdução

A região amazônica destaca-se por sua vasta biodiversidade e pelo manejo florestal sustentável que contribui para o abastecimento de madeira serrada no país. No entanto, grandes quantidades de resíduos são geradas durante a atividade de colheita (9%-18%) e no processo de beneficiamento das toras (45-55%) (Numazawa et al., 2017), que por sua vez, podem ser aproveitados na atividade de carvoejamento e produção de bioenergia.

A exemplo disso, em um levantamento realizado pelo Serviço Florestal Brasileiro & Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Neto et al., 2010), 1,6 milhões m³ de resíduos do processamento mecânico das toras foram destinados para a produção de carvão vegetal e outros 2,7 milhões m³ para a geração direta de energia na Amazônia brasileira. Ainda, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2018a), a região amazônica apresenta grande potencial de utilização dos resíduos do manejo florestal sustentável e do processamento industrial da madeira para abastecimento de sistemas isolados de produção de energia, devido à potencialidade energética da biomassa florestal.

Entretanto, o baixo nível tecnológico regional empregado na produção de carvão vegetal a partir desses resíduos não permite um controle adequado das variáveis do processo, o que diminui a eficiência e aumenta a liberação de materiais particulados e gases nocivos ao meio ambiente, refletindo na qualidade do produto final. Logo, existe a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas e implantação de técnicas e tecnologias mais eficazes de produção sustentável desse combustível.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, em 2017, o Brasil produziu cerca de 5,2 milhões de toneladas de carvão vegetal, sendo 85% empregado no setor industrial, pelas siderúrgicas, metalúrgicas e aciarias, enquanto que o consumo residencial e o de estabelecimentos comerciais (churrascarias), juntos, corresponderam a 13% (677.000 toneladas), sendo destinado, principalmente, para a cocção de alimentos, como o churrasco (Empresa de Pesquisa Energética, 2018b).

No estado de Santa Catarina, o consumo médio de carvão vegetal residencial equivale a 48,6 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹ (Passos et al., 2016), havendo uma forte correlação com o preparo de churrasco ($r=0,77$) que, juntamente com o número de pessoas na residência, foram as principais variáveis associadas ao consumo deste combustível para cocção.

Desta forma, deve-se buscar a produção de carvão de maior qualidade, com menor teor de umidade e maior densidade energética, assegurando a menor emissão de fumaça e maior eficiência do produto no uso comercial e residencial.

No Brasil, somente o estado de São Paulo tem normas para controle do carvão vegetal comercializado para uso doméstico. O selo São Paulo – Carvão *Premium*, de adesão voluntária, foi instituído em 2003 e alterada em 2015 (São Paulo, 2015), atribuindo padrões mínimos de qualidade para cada propriedade física e química desse tipo de produto. Desde então, diversas pesquisas foram conduzidas em diversos estados da federação no sentido de determinar a qualidade do carvão vegetal para cocção (churrasco), como é o caso de Rosa et al. (2012) no Espírito Santo, Brand et al. (2015) em Santa Catarina, Dias Júnior; Brito et al. (2015) em São Paulo, Oliveira et al. (2015) no Paraná, Costa et al. (2017) no Mato Grosso e Silva et al. (2018) no Amapá.

O controle da qualidade é o primeiro passo para melhorar a eficiência do processo de carbonização, e, conseqüentemente, as características do produto. Entretanto, não há, no estado do Pará, estudos científicos de relevância sobre o tema. O selo Carvão *Premium* é uma iniciativa relevante para garantir a qualidade do carvão vegetal destinado à cocção de alimentos e pode ser replicado por outros estados do país, como os da Amazônia.

Esse tipo de estudo permite a definição de parâmetros mínimos de qualidade específicos para cada estado, de acordo com as características da matéria-prima utilizada, agregando valor ao produto, diferenciando-o e beneficiando a cadeia produtiva. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi caracterizar o carvão vegetal para cocção de alimentos comercializado no sudeste paraense e avaliar se a qualidade observada atende aos parâmetros indicados pelo selo Carvão *Premium* do estado de São Paulo.

2 Material e Métodos

A pesquisa foi realizada no município de Parauapebas, sudeste do estado do Pará, (06° 04' 03" S e 49° 54' 08" O), distante cerca de 750 km da capital Belém (Figura 1).

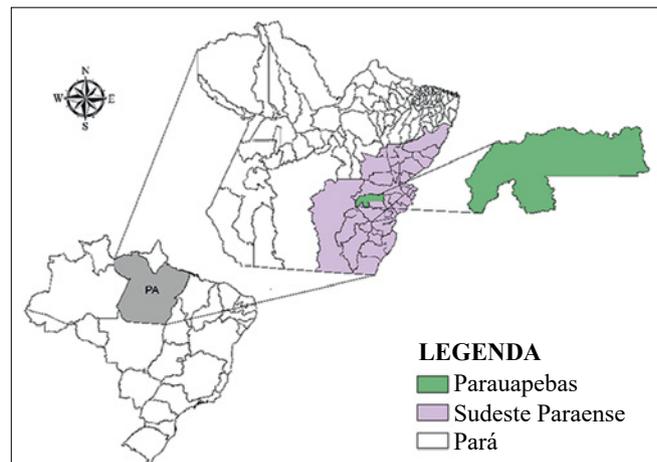


Figura 1. Mapa de localização da pesquisa.

Figure 1. Research location map.

Para a realização do estudo, foram selecionadas três marcas distintas de carvão vegetal comercializadas na região, identificadas como A, B e C, em três locais de venda diferentes, sendo adquiridos pacotes com 5 kg de cada, em um período de três meses, totalizando 15 kg de material coletado por marca.

Todas as embalagens eram de papel *kraft* não branqueado, com alça em barbante e apresentavam acendedor de fogo à base de álcool. Somente uma marca disponibilizava informações da empresa e o número de registro junto aos órgãos ambientais. Contudo, nenhuma marca identificou a procedência da matéria-prima do produto. Desta forma, não foi possível a distinção prévia entre carvão de plantios florestais ou de resíduos do setor madeireiro.

O material foi classificado quanto ao tamanho das peças, em cinco classes: C1 (< 12 mm); C2 (12-20 mm); C3 (20-80 mm); C4 (> 80 mm); e a classe C5, que agrupou todas as impurezas encontradas, sendo considerada como tal qualquer material que não fosse carvão vegetal. Após pesagem, foi

determinada a porcentagem de cada classe em função da massa total comercializada na embalagem.

A densidade relativa aparente (DRA) foi determinada por meio do método hidrostático de imersão em água com auxílio de balança semianalítica, a partir de uma adaptação da metodologia proposta pela NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO, 2003). Para a determinação da umidade do carvão vegetal foram selecionadas e pesadas 18 peças de tamanhos variáveis de cada marca, em seguida, levadas à estufa de circulação forçada de ar aquecida a $103 \pm 5^\circ \text{C}$, até atingirem massa constante, sendo a umidade base seca calculada a partir da Equação 1.

$$U = ((mu - ms) / ms) * 100 \quad (1)$$

Em que: U = umidade base seca (%); mu = massa úmida do carvão (g) e ms = massa seca do carvão (g)

Para as propriedades químicas e energéticas, foram utilizadas amostras moídas retidas em 60 *mesh*, para a determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), em mufla de resistência elétrica (ASTM, 2013) e o poder calorífico superior (PCS), em bomba calorimétrica modelo IKA C200® (ASTM, 2017). A composição química elementar (C, H, N, S), base massa seca, foi determinada utilizando amostras retidas em 270 *mesh* com auxílio de um analisador Elemental, modelo Vario Micro Cube e o Oxigênio (O) foi obtido por diferença (Equação 2).

$$O = 100 - C - H - N - S - Cinzas \quad (2)$$

Em que: O = oxigênio (%); C = carbono (%); H = hidrogênio (%); N = nitrogênio (%) e S = enxofre (%)

O poder calorífico inferior (PCI), o poder calorífico útil (PCU) e a densidade energética (DE) foram estimadas a partir das equações 3, 4 e 5, respectivamente.

$$PCI = PCS - (600 * 9H) / 100 \quad (3)$$

$$PCU = PCI * \left(\frac{100 - Ubu}{100} \right) - (6xUbu) \quad (4)$$

$$DE = PCU * DRA \quad (5)$$

Em que: PCU = poder calorífico útil (kcal kg^{-1}); Ubu = umidade na base úmida (%); 600 = calor latente de condensação da água (kcal kg^{-1}); DE = densidade energética (Mcal m^{-3}); PCI = poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}); DRA = densidade relativa aparente do carvão (kg m^{-3}).

O experimento foi avaliado em delineamento inteiramente casualizado, perfazendo três tratamentos (marcas) e 18 repetições, totalizando 54 unidades amostrais para todas as variáveis, exceto para o PCS e química elementar, nos quais foram utilizadas nove repetições. Os dados foram analisados com o auxílio do *software* R versão 3.5.1 (R Core Team, 2018). Realizou-se o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade da variância, em seguida, procedeu-se com a análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) e, quando as diferenças foram significativas, aplicou-se o teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação das médias.

Devido à ausência de normativa sobre padrões mínimos de qualidade do carvão vegetal para o estado do Pará, os resultados obtidos foram comparados com a Resolução nº 40/2015 da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do estado de São Paulo (São Paulo, 2015), cujos valores de referência estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Padrões mínimos de qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos.

Table 1. Minimum charcoal quality standards for cooking food.

Características	Referência Carvão Premium
Geração de finos	$\leq 5\%$
Tamanho das peças	90% da massa de carvão vegetal com peças entre 20-80 mm
Umidade base seca	$\leq 5\%$
Teor de material volátil	$\leq 23,5\%$
Teor de cinzas	$\leq 1,5\%$
Teor de carbono Fixo	$\geq 75\%$

Fonte: Adaptado de São Paulo (2015).

Source: Adapted from São Paulo (2015).

3 Resultados e discussão

Observou-se que todas as marcas apresentaram teor de finos menor que 5%, conforme recomendado pelo selo Carvão Premium (São Paulo, 2015) (Figura 2). Nenhuma marca atingiu a porcentagem mínima de peças entre 20 e 80 mm (classe C3) e somente 25% do carvão vegetal presente na embalagem atendeu aos padrões de tamanho especificados pelo selo, resultado bem abaixo dos 90% mínimos exigidos.

O tamanho uniforme das peças de carvão vegetal exerce influência sobre a combustibilidade, temperatura máxima fornecida e tempo de residência dentro da churrasqueira. Peças de carvão vegetal com 16 mm fornecem maiores temperaturas durante a combustão (320°C), facilitando o processo de cocção, e peças acima de 50 mm, embora tenham menores temperaturas máximas, fornecem energia por mais tempo (Dias Júnior; Brito et al., 2015).

Desta forma, é interessante que as peças de maior dimensão permaneçam na parte inferior da churrasqueira, pois forneceriam baixa temperatura por mais tempo, enquanto as peças menores sejam alocadas na parte superior, melhorando a geração de energia no início da combustão, aumentando a eficiência do cozimento da carne.

Todas as amostras analisadas apresentaram algum tipo de impureza (classe C5), principalmente, material parcialmente carbonizado (atiços), esterco animal, fragmentos de rocha, plásticos e frações de argilas. A presença de impurezas é vedada pelo selo Carvão Premium, desta forma, nenhuma das marcas avaliadas poderiam receber a certificação. Essa ocorrência pode estar relacionada com o tipo de forno utilizado no sistema de produção, sendo que no Pará o mais comum é o “rabo quente” ou “biscoiteiro”. Nesse processo, o carvão produzido é armazenado diretamente no solo, onde pode ser contaminado durante o processo de ensacamento.

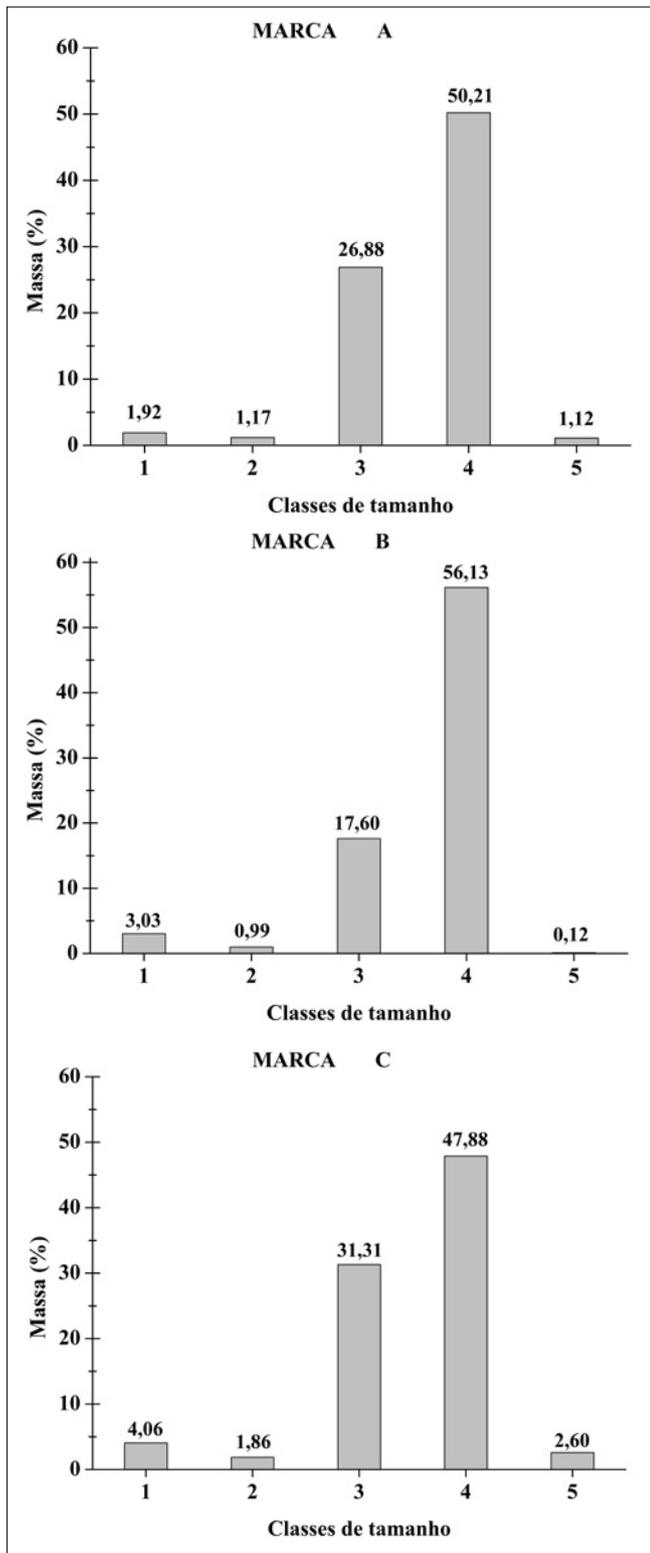


Figura 2. Classificação granulométrica do carvão vegetal comercializado no sudeste paraense.

Figure 2. Granulometric classification of charcoal marketed in southeastern Pará.

As marcas apresentaram umidade superior a 6% (base seca), qualidade inferior ao exigido pela norma analisada. A densidade média do carvão (DRA) observada foi de $483 \pm 148 \text{ kg m}^{-3}$

com 31% de variação entre as marcas, além de que diferenças significativas foram verificadas entre as médias (Figura 3).

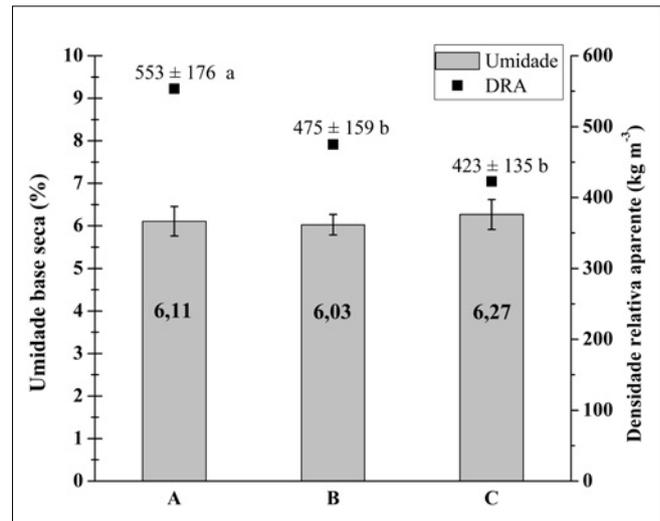


Figura 3. Valores médios das propriedades físicas do carvão vegetal comercializado no sudeste paraense.

Figure 3. Averages values of the physical properties of charcoal marketed in southeastern Pará.

O maior teor de umidade pode acarretar em maior volume de fumaça, o que prejudica sua qualidade para cocção, pois pode influenciar no sabor do alimento. Além disso, aumenta o consumo de energia para a remoção da umidade inicial do carvão, retardando a ignição e sua combustibilidade (Dias Júnior et al., 2016).

Os valores de DRA do carvão observados estão acima do relatado em outros trabalhos da literatura sobre o tema, como é o caso de Brand et al. (2015) e Costa et al. (2017), que verificaram densidades acima de 400 kg m^{-3} para carvão vegetal comercializado para cocção de alimentos em Santa Catarina e Mato Grosso. A maior densidade pode ser devido ao tipo de matéria-prima utilizada. Em geral, os resíduos utilizados para produção do carvão são oriundos de madeiras amazônicas com alta densidade, vide o alto coeficiente de variação (31%), o que implica em carvão de maior densidade, conforme observado por Araújo et al. (2018) e Silva et al. (2018).

Embora o selo Carvão *Premium* não indique um valor de referência para essa variável, Dias Júnior; Andrade et al. (2015), a partir do método de desdobramento da função qualidade (QFD), verificaram que a densidade foi uma das características mais importantes indicadas na matriz de qualidade para os consumidores de carvão vegetal, em que o valor mínimo apontado foi de 262 kg m^{-3} . A densidade do carvão vegetal apresenta relação com a umidade, resistência mecânica e friabilidade, ou seja, essa variável auxilia na gestão dos estoques, condições de armazenamento e transporte.

Os resultados obtidos para a densidade do carvão vegetal podem ser considerados aceitáveis em comparação com os trabalhos de Araújo et al. (2018) e Silva et al. (2018) referentes à cocção, já que, de maneira geral, constataram que o carvão com densidade elevada ocupa menos espaço dentro da churrasqueira e a duração da combustão é maior.

Quanto ao teor de materiais voláteis, todas as marcas apresentaram percentual $\leq 23,5\%$, considerando-se o desvio padrão, conforme requerido pelo selo Carvão *Premium*. Para o teor de cinzas, considerando o desvio padrão, somente uma das marcas avaliadas atendeu aos requisitos. Quanto ao teor de carbono fixo, todas as marcas atingiram o valor mínimo de 73% exigido (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios das propriedades químicas do carvão vegetal.
Table 2. Average values of the chemical properties of charcoal.

Marca	Materiais voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
A	24,95 \pm 2,14 a	2,22 \pm 0,95 ab	72,83 \pm 1,53 b
B	17,38 \pm 1,53 b	1,71 \pm 0,55 b	80,91 \pm 4,01 a
C	19,31 \pm 4,14 b	2,58 \pm 0,49 a	78,11 \pm 4,08 a

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A presença de voláteis no carvão facilita sua ignição dentro da churrasqueira, devido à mistura com oxigênio do ar proporcionando combustão mais eficiente e homogênea (Protásio et al., 2017). Costa et al. (2017) e Rosa et al. (2012) observaram que 60% e 70%, respectivamente, das marcas avaliadas em seus estudos atendiam às exigências do selo Carvão *Premium* quanto ao conteúdo de voláteis, corroborando nossas observações.

Os valores de cinzas observados indicam a baixa qualidade dos carvões analisados para cocção, haja vista que os materiais inorgânicos presentes no combustível interferem negativamente na quantidade de energia liberada durante a conversão energética. Além disso, os elevados percentuais de cinzas apresentam forte tendência em formar incrustações dentro dos equipamentos de queima, devido aos altos teores de sílica e óxidos alcalinos (Pelanda et al., 2015), causando a redução da eficiência energética por dificultarem a troca térmica.

O elevado coeficiente de variação encontrado para o teor de cinzas evidencia a heterogeneidade da matéria-prima, e Souza et al. (2016) também atribuíram a alta variação (34%) às pequenas quantidades percentuais das cinzas quando comparada aos outros constituintes químicos do carvão vegetal.

Brand et al. (2015) obtiveram resultados semelhantes para o teor de cinzas (1,92%) ao avaliar o carvão de uso doméstico, estando acima do limite indicado e não recomendado para cocção de alimentos. Em contrapartida, Dias Júnior; Brito et al. (2015), ao avaliarem o carvão vegetal de uso doméstico proveniente de madeiras do gênero *Eucalyptus* sp., observaram conteúdo de cinzas de 1,20%, ou seja, inferiores ao encontrados neste trabalho.

Em relação ao percentual de carbono sólido, as marcas B e C não diferiram estatisticamente e revelaram haver uma proporção de CF acima de 78%. Para se enquadrar como carvão de qualidade, o selo Carvão *Premium*, exige que o carvão vegetal apresente teor de CF acima de 75%, portanto, as marcas B e C são as que melhores se enquadram com resultados superiores à especificação mínima requerida pela normativa.

O CF é uma propriedade importante, pois revela a quantidade de carbono que ficou retido na forma sólida após o processo de pirólise, estando este relacionado com o valor energético e a estabilidade térmica do carvão vegetal. Maiores percentuais de CF proporcionam uma maior liberação de energia e um maior tempo de residência dentro da churrasqueira, resultando na necessidade de menos combustível ou menores intervenções para abastecimento do equipamento de conversão energética (Costa et al., 2017).

Na Figura 4 fica evidente a forte correlação existente entre o CF e o PCS, uma vez que a análise de regressão revelou que até 79% da energia liberada pelo carvão vegetal pode ser explicada pela sua concentração de carbono sólido e que, para cada 1% de incremento em CF, haverá um ganho energético de 49,5 kcal kg⁻¹.

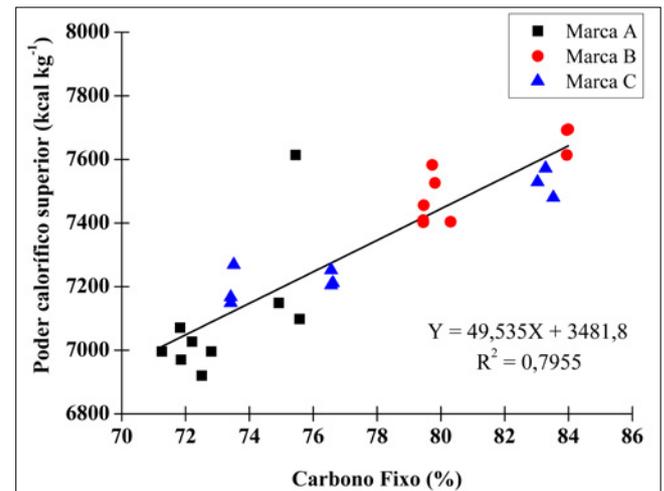


Figura 4. Correlação entre o carbono fixo (%) e o poder calorífico superior (kcal kg⁻¹) do carvão vegetal.

Figure 4. Correlation between the fixed carbon (%) and higher heating value (kcal kg⁻¹) of charcoal.

Os valores inferiores de CF encontrados para o carvão vegetal da marca A podem ser atribuídos às maiores médias de MV e CZ, mostrando que tais propriedades químicas apresentam uma relação negativa, evidenciando que esse combustível está fora dos padrões especificados pelo selo Carvão *Premium*.

Ao avaliar a qualidade para consumo doméstico, Dias Júnior; Brito et al. (2015) observaram que o carvão vegetal apresentou valores satisfatórios de CF (82%). Já Silva et al. (2018) verificaram elevados teores de CF, variando entre 86 e 88% para carvão doméstico proveniente de *Acacia mangium* e resíduos madeireiros, comercializados no estado do Amapá, ambos superiores aos encontrados nesta pesquisa e acima do exigido pelo selo Carvão *Premium*.

Para o PCS verificou-se que o carvão vegetal proveniente da marca B diferiu estatisticamente dos demais, apresentando o maior valor calórico entre os combustíveis analisados (7531 kcal kg⁻¹) (Tabela 3), esse resultado pode ser atribuído à constituição química da biomassa utilizada, uma vez que madeiras amazônicas, em geral, possuem maior quantidade de lignina, e ao processo de produção, principalmente, o controle da temperatura final de carbonização.

Tabela 3. Valores médios do poder calorífico superior e inferior do carvão vegetal.**Table 3.** Average values of the higher heating value and lower heating value of charcoal.

Marca	Poder calorífico superior (kcal kg ⁻¹)	Poder calorífico inferior (kcal kg ⁻¹)	Poder calorífico útil (kcal kg ⁻¹)
A	7093 ± 207 c	6917 ± 207 c	6458 ± 194 c
B	7531 ± 120 a	7373 ± 120 a	6892 ± 113 a
C	7315 ± 165 b	7152 ± 165 b	6666 ± 154 b

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Brand et al. (2015) encontraram valores de 6440 kcal kg⁻¹ para PCS, devido aos elevados valores de MV e CZ, 33% e 1,96%, respectivamente, corroborando com o resultado observado para os carvões vegetais das marcas A e C. Já Dias Júnior; Brito et al. (2015), observaram valores satisfatórios de PCS, com média de 7805 kcal kg⁻¹, relacionando o resultado com os 17% de MV e 1,2% de CZ, assemelhando-se aos resultados encontrados para a marca B.

A quantidade de energia liberada por um combustível é um dos principais indicativos de qualidade para uso energético, contudo, vale ressaltar que o PCS é um resultado teórico, e o que importa do ponto de comercialização e uso do carvão vegetal, é a quantidade de energia útil (PCU) a ser liberada pela combustão, nesse sentido, a marca B foi a que apresentou

Tabela 4. Composição elementar do carvão vegetal comercializados.**Table 4.** Elementary composition of charcoal.

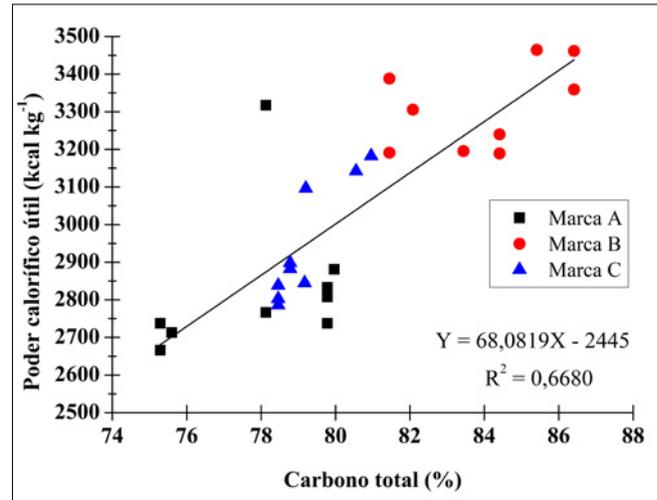
Marca	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)
A	77,84 ± 2,00	3,26 ± 0,22	1,20 ± 0,16	15,39 ± 2,54	0,09 ± 0,03
B	83,87 ± 1,92	2,93 ± 0,16	1,24 ± 0,04	9,44 ± 0,78	0,08 ± 0,06
C	79,52 ± 1,00	3,02 ± 0,39	1,18 ± 0,06	13,65 ± 0,61	0,05 ± 0,01

Em termos médios, os teores de carbono elementar foram superiores em ± 1% em relação ao observado CF, essa diferença ocorre porque na análise elementar considera-se a concentração de carbono total presente no combustível, enquanto que o carbono fixo corresponde ao percentual de carbono sólido após a liberação dos compostos orgânicos voláteis.

Os resultados observados para o teor de carbono elementar nesta pesquisa foram semelhantes aos de Vicente et al. (2018) que encontraram 79% de C em carvão vegetal para churrasco comercializado em Portugal. Portanto, os resultados evidenciam que os percentuais dos elementos químicos dos carvões analisados atendem às necessidades para seu uso em churrasco.

De acordo com Leite et al. (2015), o C, H e O são os principais elementos que constituem as biomoléculas, sendo que a energia calorífica potencial do carvão vegetal

resultado mais satisfatório (6892 kcal kg⁻¹) para cocção de alimentos devido à alta concentração de carbono elementar e baixo percentual de oxigênio (Figura 5).

**Figura 5.** Correlação entre o carbono total (%) e o PCU (kcal kg⁻¹) do carvão vegetal.**Figure 5.** Correlation between the carbon total (%) and net heating value (kcal kg⁻¹) of charcoal.

Os resultados encontrados para os teores elementares do material analisado mostram uma pequena variação em função das marcas avaliadas, com exceção dos teores de oxigênio e enxofre (Tabela 4).

está intimamente relacionada com as proporções de C e H presentes no combustível, contribuindo positivamente com o PCS, visto que estes são os principais elementos químicos combustíveis.

Ao avaliar a estabilidade de degradação térmica de biocombustíveis, Silva et al. (2016) verificaram que o carbono se correlaciona fortemente com a quantidade de energia liberada pelo combustível, e que o aumento de 1% em sua concentração pode promover ganhos de até 96 kcal kg⁻¹ de energia calorífica.

O carvão da marca A apresentou o maior teor de oxigênio (15,39%) e, juntamente com o percentual de cinzas (2,22%), influenciou no baixo valor energético útil do combustível, sendo este o menor entre as marcas avaliadas. Portanto, o oxigênio não apresentou correlação positiva com o PCU, logo, elevados percentuais desse elemento implicam em menor liberação de energia durante a combustão (Figura 6).

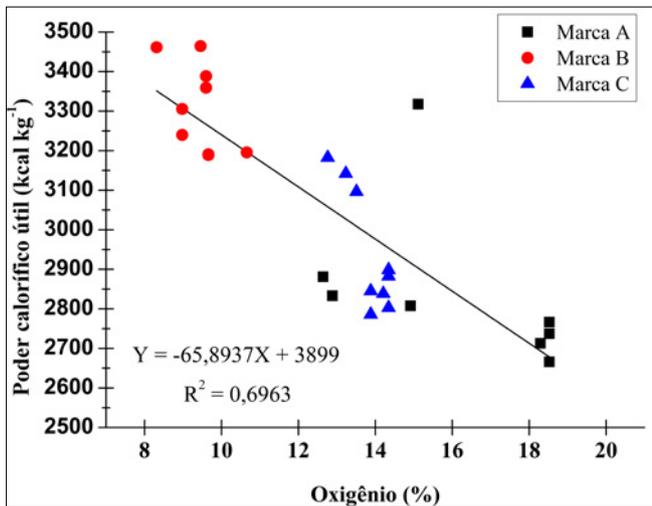


Figura 6. Correlação entre oxigênio (%) e PCU (kcal kg⁻¹) do carvão vegetal.

Figure 6. Correlation between the oxygen (%) and net heating value (kcal kg⁻¹) of charcoal.

A análise elementar apontou que os combustíveis analisados apresentaram valores médios de 1,21% de nitrogênio e 0,07% de enxofre, resultado superior ao encontrado por Vicente et al. (2018) que observaram 1,03% e < 0,01% de N e S, respectivamente. O recomendado é que as concentrações desses dois elementos sejam o mais próximo de zero, e de acordo com esses autores, o carvão derivado da biomassa tende a apresentar um valor médio 0,6% de N. Contudo, o percentual de N pode sofrer alteração de acordo com as condições edáficas em que a árvore estava implantada.

É interessante a realização de ensaios que avaliem o nível de emissões e a qualidade dos gases liberados durante o processo de conversão energética do carvão vegetal destinado à cocção de alimentos, uma vez que possibilita quantificar o que está sendo gerado de CO, CO₂, NO_x, SO_x, dentre outros componentes, proporcionando atestar mais acuradamente a qualidade do sistema de conversão energética (equipamento) e do combustível consumido (Pelanda et al., 2015; Vicente et al., 2018).

Na Figura 7, encontram-se os resultados referentes à densidade energética, em que se verificou efeito significativo das marcas pelo teste F e médias diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O carvão vegetal proveniente da marca A apresentou a maior quantidade de energia estocada por unidade de volume (3571 Mcal m⁻³) devido, principalmente, à elevada DRA encontrada para este combustível. A amostra C, apesar de esboçar um PCU 3,22% maior que A, apresentou uma DE 13,87% inferior, ocasionado pelos elevados teores de oxigênio elementar, umidade e baixa DRA.

Costa et al. (2017) encontram resultados semelhantes ao desta pesquisa com valores entre 2665-3146 Mcal m⁻³ para carvão destinado à cocção de alimentos, contudo, Silva et al. (2018), avaliando o carvão vegetal comercial produzido no estado do Amapá, apesar de relatarem altas médias de densidade e PCS, verificaram densidade energética variando de 2600-2854 Mcal m⁻³, sendo este resultado explicado pelo conteúdo de umidade do material analisado.

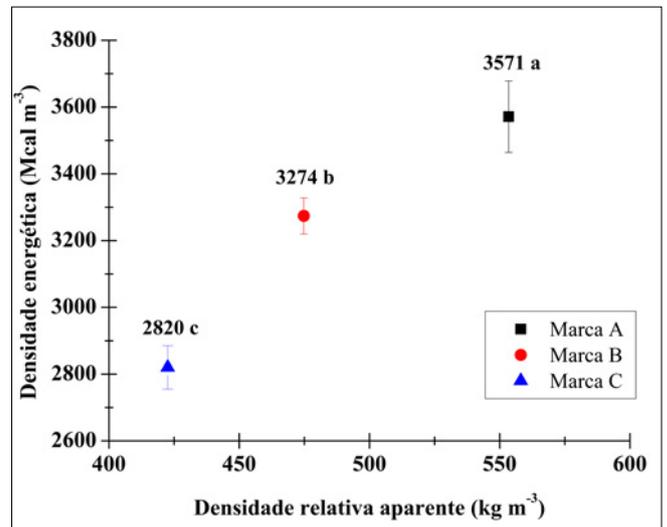


Figura 7. Valores médios da densidade energética do carvão vegetal comercializado no sudeste paraense.

Figure 7. Averages values of energy density of charcoal marketed in southeastern Pará.

Logo, o elevado PCU do combustível, aliado à alta DRA ou densidade à granel, resulta em maximização da DE do carvão, sendo esta variável importante para se quantificar a energia calorífica estocada em uma carga de carvão vegetal. Portanto, é possível inferir o quanto de energia, em média, está sendo comercializada em cada embalagem, informação muito importante para o consumidor, relacionando o PCU e a massa de carvão contida na embalagem livre de impurezas (Figura 8).

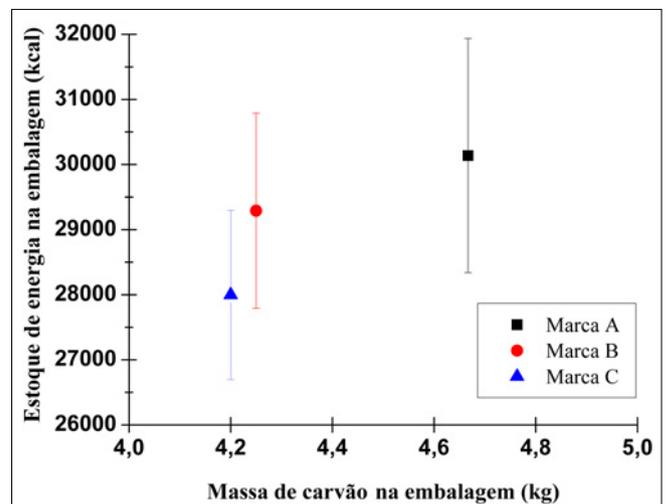


Figura 8. Estoque de energia contida na embalagem do carvão vegetal comercializado no sudeste paraense.

Figure 8. Stock of energy contained in the charcoal package marketed in southeastern Pará.

O estoque de energia na embalagem dos carvões avaliados variou entre 27900-30100 kcal kg⁻¹, com destaque para a marca A, que apresentou a maior média, evidenciando que maiores quantidades de carvão vegetal na embalagem comercial tendem a conter mais energia calorífica estocada.

4 Conclusão

Nenhuma das marcas avaliadas se enquadra em todos os critérios exigidos pelo selo Carvão *Premium*. Os aspectos qualitativos do carvão vegetal que precisam ser melhorados para a obtenção da certificação é a eliminação das impurezas nas embalagens, maior homogeneidade das peças, diminuição dos percentuais de finos, umidade e de cinzas.

Referências

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; GUIMARÃES NETO, R. M.; ROCHA, M. F. V.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 365-371, 11 jul. 2018. doi: 10.4336/2018.pfb.38e201701546

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941 Madeira*: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. v. 1.

ASTM INTERNATIONAL. *D1762-84*: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. West Conshohocken, 2013.

ASTM INTERNATIONAL. *D240-17*: standard test method for heat of combustion of liquid hydrocarbon fuels by bomb calorimeter. West Conshohocken: ASTM, 2017.

BRAND, M. A.; RODRIGUES, A. A.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, M. S.; ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015. doi: 10.1590/0100-67622015000600020

COSTA, A. C. S.; OLIVEIRA, A. C.; FREITAS, A. J.; LEAL, C. S.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializado em Cuiabá – MT. *Nativa*, Sinop, v. 5, n. 6, p. 456-461, 2017. doi: 10.5935/2318-7670.v05n06a12

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da função qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v. 22, n. 2, p. 262-270, 2015. doi: 10.1590/2179-8087.105314

DIAS JÚNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; ANDRADE, C. R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1127-1133, 2015. doi: 10.1590/0100-67622015000600016

DIAS JÚNIOR, A. F.; PIROLA, L. P.; TAKESHITA, S.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O.; ANDRADE, A. M. Higroscopicity of charcoal produced in different temperatures. *Cerne*, Lavras, v. 22, n. 4, p. 423-430, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Nota Técnica 17/18*: potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira. 1. ed. Rio de Janeiro, 2018a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balço energético nacional 2018*: ano base 2017. 12. ed. Rio de Janeiro, 2018b.

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; VALLE, M. L. A.; SIQUEIRA, H. F. Composição química

elementar da madeira e do carvão vegetal de *Coffea arabica* para uso bioenergético. *Coffee Science*, Lavras, v. 10, n. 4, p. 537-547, 2015.

NETO, M. A.; CARNEIRO, M. S.; MIRANDA, K. F. *A atividade madeireira na Amazônia brasileira*: produção, receita e mercados. 1. ed. Belém: Serviço Florestal Brasileiro (SFB); Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon), 2010.

NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; JOHN, V. M. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. *Resources, Conservation & Recycling*, [S. l.], v. 122, p. 280-285, 2017. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.02.016

OLIVEIRA, A. F.; BAVARESCO, A.; PESSUTI, C. A. A.; MIYASHIRO, C. S.; FRANK, J. Análise da qualidade do carvão para consumo doméstico de quatro municípios do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, Curitiba, v. 4, n. 3, p. 102-111, 25 nov. 2015. doi: 10.5380/rber.v4i3.43034

PASSOS, B. M. dos; SIMIONI, F. J.; DEBONI, T. L.; DALARI, B. L. S. K. Características do consumo residencial de lenha e carvão vegetal. *Floresta*, Curitiba, v. 46, n. 1, p. 21-29, 2016. doi: 10.5380/rf.v46i1.39714

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A.; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. *Ciência da Madeira*, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 112-121, 2015. doi: 10.12953/2177-6830/rbm.v6n2p112-121

PROTÁSIO, T. P.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; MIRMEHDI, S.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; KNOVACK, K. M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. *Cerne*, Lavras, v. 23, n. 1, p. 1-10, 2017.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018.

ROSA, R. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; ANDRADE, W. S. de P.; MOULIN, J. C. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, Gurupi, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.

SÃO PAULO. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. *Resolução SAA nº 40, de 14 de dezembro de 2015*. Altera a Resolução SAA 10, de 11-07-2003, que define Norma de Padrões Mínimos de Qualidade para carvão vegetal, como base para Certificação de Produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481, 29-12-1999, e a Resolução SAA 67, de 13-09-2012. São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/2FX7191>. Acesso em: 8 abr. 2019.

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; ALVES, I. C. N.; MAGALHÃES, M. A. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. *European Journal of Wood and Wood Products*, [S. l.], v. 74, n. 6, p. 845-850, 2016.

SILVA, M. do R. S. E.; RIBEIRO, E. A. S.; BARBOSA, J. P.; ALVES JÚNIOR, F. T.; GUEDES, M. C.; PINHEIRO, P. G.; BUFALINO, L. Quality attributes of commercial charcoals produced in Amapá, a Brazilian state located in the Amazonia. *Environment, Development and Sustainability*, [S. l.], n. 1, p. 1-14, 2018. doi: 10.1007/s10668-018-0216-x

SOUZA, N. D.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. *Floresta Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.

VICENTE, E. D.; VICENTE, A.; EVTYUGINA, M.; CARVALHO, R.; TARELHO, L. A. C.; ODUBER, F. I.; ALVES, C. Particulate and gaseous emissions from charcoal combustion in barbecue grills. *Fuel Processing Technology*, Amsterdam, v. 176, p. 296-306, 2018.

Contribuição dos Autores: Rudson Silva Oliveira idealizou a pesquisa, realizou os experimentos, analisou os dados e redigiu o manuscrito, Luan Felipe Feitosa da Silva contribuiu com a revisão bibliográfica e a escrita científica, Fernando Wallase Carvalho Andrade contribuiu com a idealização do estudo, orientação do experimento e escrita do manuscrito, Selma Lopes Goulart contribuiu com a orientação dos experimentos, revisão ortográfica e escrita do manuscrito, Thiago de Paula Protásio contribuiu com a análise dos dados, revisão bibliográfica e a redação do manuscrito, Paulo Fernando Trugilho contribuiu com a realização das análises químicas e energéticas.

Agradecimentos: Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas. Ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras (Ufla) e ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra), campus de Parauapebas, por toda infraestrutura disponibilizada para as análises.

Fontes de Financiamento: Não houve fonte de financiamento.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.