

## **Caracterização energética de biomassa utilizada em laticínio na Amazônia em diferentes níveis de biodegradação**

Amanda Santos Ferreira<sup>1</sup>; Márcia Cristina Alves<sup>1</sup>; Maria Jhulia Cordeiro Santos<sup>1</sup>; Dayane Targino de Medeiros<sup>2</sup>; Felipe Gomes Batista<sup>2</sup>; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Rolim de Moura/RO, Brasil; <sup>2</sup> Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil – [sfamanda20@gmail.com](mailto:sfamanda20@gmail.com)

**Resumo:** Na literatura há lacunas para ser abordados sobre a qualidade e adequação energética de biomassa produzidos a partir da exploração madeireira do manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira. O presente estudo teve como objetivo de realizar a caracterização energética da biomassa florestal em diferentes níveis de biodegradação. Foram utilizadas amostras de madeira sadia, biodegradada e cascas e, analisadas quanto as suas propriedades físicas (densidade básica e umidade), química imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), elemental (carbono, hidrogênio e oxigênio), poder calorífico, densidade energética e energia para evaporar a água. A madeira sadia mostrou-se mais vantajosa para a produção de energia devido à sua maior densidade básica ( $\sim 525,4 \text{ kg/m}^3$ ) e menor umidade, o que resultou em maiores valores de poder calorífico superior e inferior líquido ( $\sim 19,44 \text{ MJ/kg}$ ), com densidade energética de  $10215,54 \text{ MJ/m}^3$ . Concluiu que a madeira sadia pode ser adequada para produção de energia, mas é recomendável adotar procedimentos de secagem para otimizar sua utilização.

**Palavras-chave:** Resíduos florestais, Eficiência energética, Energia renovável.

## **Energy characterization of biomass used in dairies in the Amazon at different levels of biodegradation**

**Abstract:** In literature their gaps to be addressed regarding the quality and energy adequacy of biomass produced from timber exploitation in sustainable forest management in the Brazilian Amazon. The present study aimed to characterize the energy of forest biomass at different levels of biodegradation. Samples of healthy wood, biodegraded wood and bark were used and analyzed for their physical properties (basic density and moisture), immediate chemical properties (volatile materials, ash and fixed carbon), elemental (carbon, hydrogen and oxygen), calorific value, energy density and energy to evaporate water. Healthy wood proved to be more advantageous for energy production due to its higher basic density ( $\sim 525.4 \text{ kg/m}^3$ ) and lower moisture content, which resulted in higher values of net upper and lower calorific value ( $\sim 19.44 \text{ MJ/kg}$ ), with an energy density of  $10215.54 \text{ MJ/m}^3$ . It concluded that healthy wood can be suitable for energy production, but it is recommended to adopt drying procedures to optimize its use.

**Keywords:** Forest wastes, Energy efficiency, Renewable energy.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço do desenvolvimento econômico e o crescimento populacional, a demanda por energia tem aumentado significativamente, gerando uma preocupação constante em como supri-la de forma sustentável e eficiente (Goldemberg; Lucon, 2007). Assim, a biomassa surge como uma solução promissora, devido seu alto potencial de substituição de combustíveis fósseis, oferecendo diversidade de uso, como para produção de biocombustíveis (etanol e biodiesel), geração de energia elétrica, queima direta, ou produção de biogás (Fernandes *et al.*, 2021).

Na região Amazônica, a biomassa é uma importante fonte de energia utilizada para sustentar as operações de processamento agroindustrial, para a alimentação de caldeira e fornalhas. Nessa região, a biomassa geralmente é proveniente dos resíduos de serrarias (Santos *et al.*, 2023), limpeza de pastagem e outras atividades agrícolas. No entanto, existe uma lacuna de conhecimento e estudos sobre o manejo adequado da biomassa e os efeitos da biodegradação sobre as propriedades e qualidade do material como combustível.

O estudo da biomassa na região não apenas promove o desenvolvimento sustentável, mas também eleva a compreensão a respeito dos impactos ambientais e econômicos relacionados à sua utilização inadequada. A hipótese deste estudo é que quanto maior o nível de biodegradação da biomassa, menor será a sua qualidade e eficiência energética, devido às alterações nas propriedades químicas e físicas que ocorrerão ao longo desse processo. Assim, objetivou-se com este estudo realizar a caracterização energética da biomassa florestal em diferentes níveis de biodegradação.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Coleta de amostras

O material avaliado foi obtido em uma indústria de laticínios localizada no município de Rolim de Moura, Rondônia. As amostras coletadas foram classificadas de acordo com seu estágio de biodegradação, em madeira sadia (sem sinais de biodegradação), madeira biodegradada e cascas. Aproximadamente 500 g de cada amostra foram secas em estufa com circulação forçada de ar a  $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  até a massa constante. Posteriormente, o material foi levado ao moinho de facas tipo Willey

e peneirado em malhas de 40 mesh e retido em 60 mesh, para análise imediata da biomassa.

## **2.2 Determinação da densidade básica e umidade**

Para a determinação da densidade básica (pb) e umidade em base seca (UBS) e úmida (UBU) das amostras, foram utilizadas 10 repetições para cada estágio de biodegradação, conforme as normas NBR 11941 (ABNT, 2003) e ASTM E871-82 (ASTM, 2019), respectivamente.

## **2.3 Caracterização química imediata**

O material moído foi seco em estufa de circulação forçada de ar com temperatura ajustada em  $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  até massa constante. Em seguida, o material foi utilizado para determinação do teor de materiais voláteis (MV) conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021) e o teor de cinzas (CZ), de acordo com a NBR 13999 (ABNT, 2017). Com base nos resultados obtidos, o teor de carbono fixo (CF) foi calculado com a equação 1.

$$CF (\%) = 100 - (MV + CZ) \quad (1)$$

## **2.4 Caracterização química elementar**

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), foram estimados a partir dos valores obtidos da análise imediata (MV e CF), conforme Parikh *et al.* (2007).

## **2.5 Poder calorífico (superior, inferior e líquido), densidade energética (DE) e energia para evaporar a água (E<sub>ea</sub>)**

O PCS foi estimado utilizando a equação 2 proposta por Parikh *et al.* (2005). O PCI e PCL foram conforme as equações 3 e 4, respectivamente (Brand, 2010).

$$PCS (\text{MJ/kg}) = 0,3536CF + 0,1559MV - 0,0078CZ \quad (2)$$

$$PCI (\text{MJ/kg}) = PCS - 1,3565 \quad (3)$$

$$PCL (\text{MJ/kg}) = PCI \times [(100 - UBU) / 100] - (6 \times UBU) \quad (4)$$

Com os valores obtidos de PCS e pb, foram calculados os valores de densidade energética (DE), de acordo com Lima *et al.* (2020) utilizando a equação 5. Para estimar

a energia necessária para a evaporação da água foram adotados os métodos descritos por Soteli *et al.* (2023).

$$DE \text{ (MJ/m}^3\text{)} = pb \times PCS \quad (5)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 *Densidade básica e umidade*

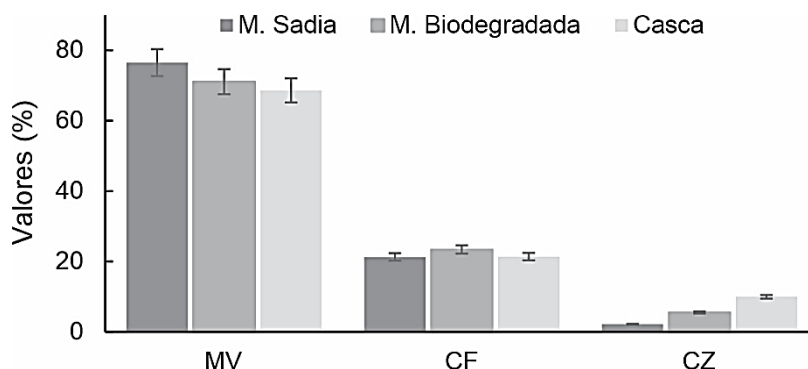
Os maiores valores de  $pb$  foram obtidos para a madeira sadia ( $525,45 \pm 123 \text{ kg/m}^3$ ) seguida da madeira biodegradada ( $337,45 \pm 77 \text{ kg/m}^3$ ) e casca ( $306,28 \pm 13 \text{ kg/m}^3$ ). Este decréscimo pode ser atribuído à heterogeneidade de espécies e aos níveis de biodegradação das amostras. O processo de biodegradação afeta os componentes da parede celular, fragmentando sua estrutura, reduzindo a massa por unidade de volume e, conseqüentemente, o poder calorífico da biomassa (Brand, 2010). Além disso, os elevados valores dos desvios padrão estão relacionados com a heterogeneidade de espécies que constituíam as amostras, no qual, continham densidades diferentes.

Em relação a umidade das amostras, a madeira biodegradada registrou os maiores teores de UBS ( $88,43 \pm 50 \%$ ) e UBU ( $43,20 \pm 16 \%$ ), seguida pelas cascas e a madeira sadia. As amostras com maior nível de biodegradação apresentaram teores mais elevados de água, decorrente da formação de espaços vazios e exposição de grupos OH da celulose. Segundo Brand; Muniz (2010), a biomassa destinada ao uso energético não deve exceder 30% de umidade. A umidade elevada das amostras é associada às condições inadequadas de armazenamento da biomassa, no qual apresentava exposição ao sol e contato direto com solo pouco drenado.

#### 3.2 *Caracterização química imediata*

Os processos de biodegradação influenciaram na composição imediata das amostras, alterando a proporção de MV, CF e CZ (Figura 1). A madeira biodegradada e as cascas apresentaram baixos teores de MV e elevados teores de CZ, o que compromete o processo de combustão e redução da eficiência energética do material.

**Figura 1.** Teor de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) das amostras de Madeira sadia, Madeira biodegradada e Casca.

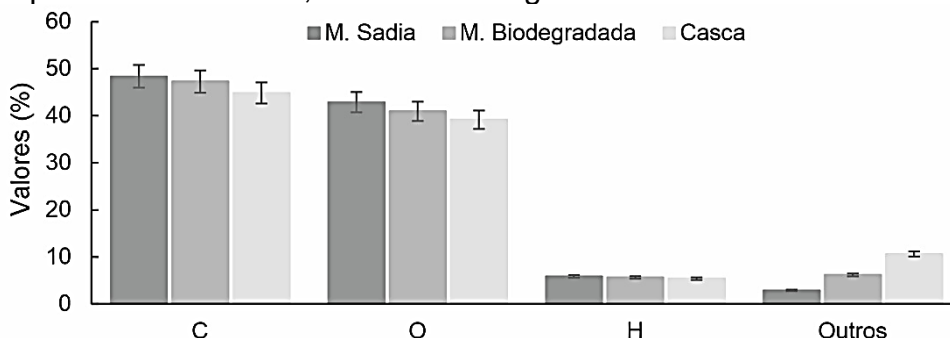


Essas afirmações são baseadas nas teorias de Brand (2010), onde relata que as madeiras para uso energético devem apresentar uma faixa de 75 a 85% para MV, 15 a 25% para CF e até 3% de CZ. Na combustão os MV, são responsáveis pela fase de ignição, enquanto o CF determina o tempo de queima, dessa forma, a biomassa que apresenta baixo teor MV e alto teor de CF, queimam mais lentamente.

### 3.3 Caracterização química elementar

Com base nos resultados obtidos foi possível observar que as amostras apresentaram comportamento semelhante, com pequenas variações nos teores de C, H e O (Figura 2).

**Figura 2.** Teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e outros elementos estimados para madeira sadia, madeira biodegradada e casca.



De acordo com estudos realizados por Brand (2010), as madeiras tropicais utilizadas para produção de energia possuem em média 49% de C, 5,87% de H e 43,97% de O em sua composição. Ao se comparar estes resultados, pode-se observar



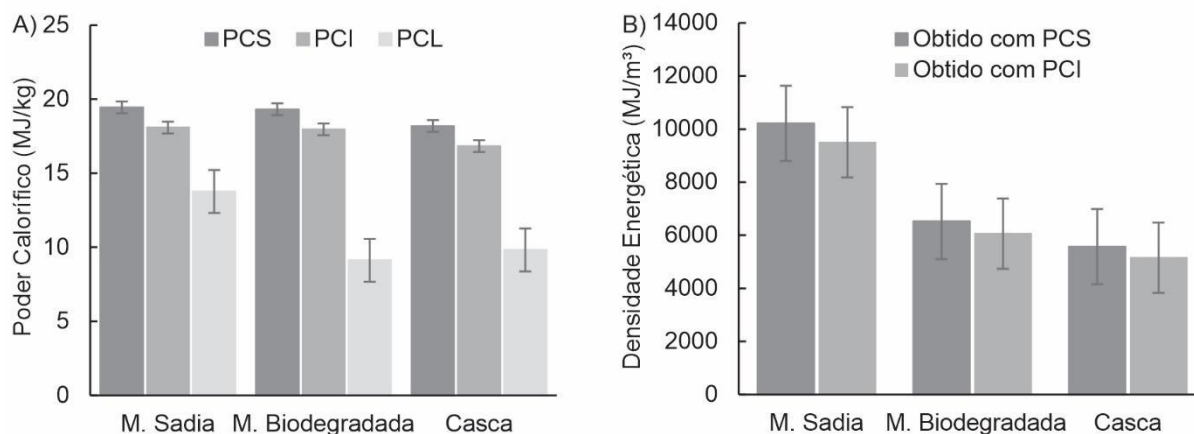
que a madeira sadia se aproxima mais dos valores descritos na literatura, indicando que é mais adequada para uso energético (Soteli *et al.*, 2023).

A madeira biodegradada e as cascas apresentaram ligeira redução dos teores de C e aumento dos teores de outros elementos (nitrogênio e enxofre) devido ao nível de biodegradação das amostras. Durante o processo de biodegradação, os microrganismos consomem o C da madeira para seu próprio metabolismo, resultando na liberação de CO<sub>2</sub> e alteração da composição elementar (Franco *et al.*, 2022). Isso, consequentemente, reduz a eficiência energética da biomassa, pois, baixos teores de C resultam em menor poder calorífico durante a queima.

### 3.4 Poder calorífico superior, inferior líquido e densidade energética

Analisando os resultados obtidos de PCS, PCI e PCL, foi observado que madeira sadia possui o maior potencial energético entre as amostras analisadas (Figura 3A).

**Figura 3.** A) Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCL) e B) Densidade energética das amostras de madeira sadia, madeira biodegradada e casca.



A madeira biodegradada e as cascas, embora apresentem PCS e PCI relativamente altos, demonstram menor eficiência energética, devido ao elevado nível de biodegradação e umidade do material. Como citado anteriormente, o processo de biodegradação reduz a pb e altera a composição química da madeira, além de elevar o teor de componentes não combustíveis, como as CZ e outros elementos, comprometendo seu conteúdo energético e sua eficiência durante a queima (Brand, 2010).

Em relação a DE, madeira sadia também se apresenta superior (Figura 3B), devido à sua estrutura mais densa e preservada, o que resulta em maior eficiência na produção de energia. Assim, pode-se afirmar que quanto maior nível de biodegradação da madeira, menos energia ela será capaz de produzir quando queimada, devido aos efeitos negativos da biodegradação em suas propriedades físicas e químicas, o que reduz seu potencial energético (Souza; Vale, 2016).

A superioridade do potencial energético da madeira sadia é coerente com outros estudos encontrados na literatura. Nas pesquisas realizadas por Santos *et al.* (2023), foram obtidos valores semelhantes para PCS (18,85 MJ/kg), PCI (17,49 MJ/kg), PCL (9,45 MJ/kg) e DE (10984,24 MJ/m<sup>3</sup>) para resíduos de madeira.

### **3.5 Energia necessária para evaporação da água (E<sub>ea</sub>)**

Em relação a energia necessária para a evaporação da água, foram observados valores de 2,42 GJ/m<sup>3</sup> para a madeira sadia, -6,18 GJ/m<sup>3</sup> para a madeira biodegradada e -10,26 GJ/m<sup>3</sup> para as cascas. Estes valores indicam que a energia necessária para converter água em vapor, variou de acordo com o nível de biodegradação das amostras. A madeira sadia, contém menor umidade e requer menos energia para evaporar a água, ou seja, a biomassa não só produziu calor suficiente para evaporar a umidade, como também forneceu um excedente de energia.

Esses resultados destacam a importância da avaliação da qualidade da biomassa e seu estado de biodegradação antes da sua utilização como fonte de energia. Recomenda-se manter as condições apropriadas de estocagem do material, como empilhamento e cobertura, para evitar o contato direto da madeira com o solo e exposição à chuva.

## **4. CONCLUSÃO**

A madeira sadia mostrou-se mais vantajosa para a produção de energia devido à sua maior pb e menor umidade, o que resultou em valores superiores de PCS, PCI e DE. Recomenda-se a adoção de melhores práticas de armazenamento e procedimentos de secagem da biomassa para melhorar suas características energéticas.

## 5. REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 11941: Madeira– Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação de resíduo (cinza) após incineração a 525 °C**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASTM (American Standard Test Methods). **ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2007.

ASTM (American Standard Test Methods). **ASTM D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. West Conshohocken: ASTM, 2 p. 2021.

ASTM (American Standard Test Methods). **ASTM E871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**. West Conshohocken: ASTM, 2 p. 2019.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 88, p. 619-628, 2010.

SANTOS, M. J. C.; OLIVEIRA BARROS, A. H. R.; OLIVEIRA, S. *et al.* Caracterização energética de biomassa lignocelulósica utilizada em secador de grãos em Rolim de Moura, Rondônia. **Revista Conexão Na Amazônia**, v. 4, n. 2, p. 41–55, 2023.

FRANCO, T. C.; OLIVEIRA, T. E.; MANTOVANI, J. R. *et al.* Selection of enzyme-producing plant growth-promoting bacteria: Effect on decomposition of organic waste. **Research, Society, and Development**, v. 11, n. 3, 2022.

FERNANDES, D. R.; EVANGELISTA, B. D. V.; PINTO, B. P. *et al.* A Panorama Geral da Utilização de Líquidos Iônicos para Fracionamento e Transformação da Biomassa Lignocelulósica. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 6, p. 1431-1456, 2021.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, p. 7-20, 2007.

LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. *et al.* Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, n. 105804, p. 1-18, 2020.

PARIKH, J.; CHANNIWALA S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.



PARIKH, J.; CHANNIWALA S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, v. 86, p. 1710-1719, 2007.

SOTELI, R. P.; RODRIGUES, L. D. O.; PEREIRA, B. L. C. *et al.* Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, p.14065-14094, 2023.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.