



ARTIGO ORIGINAL

Raphael de Souza Costa Arede¹
Eder Souto Batista¹
Jefferson Bezerra Bezerra¹
Tiago Marcolino de Souza²
Lina Bufalino^{3*}

¹ Universidade Federal do Amapá (UNIFAP),
Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento,
Rodovia Juscelino Kubitschek, km 02, 68903-419,
Macapá, Amapá, Brasil.

² Universidade do Estado do Amapá (UEAP),
Colegiado de Engenharia Química, Avenida
Presidente Vargas, 650, 68.900-070, Macapá, Amapá,
Brasil.

³ Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA),
ICA – Instituto de Ciências Agrárias, Avenida
Presidente Tancredo Neves, 2501, 66.077-830, Belém,
Pará, Brasil.

* **Autora correspondente:**
E-mail: linabufalino1@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Umidade
Densidade básica
Materiais voláteis
Carbono fixo
Cinzas

KEYWORDS

Moisture content
Basic density
Volatile matter
Fixed carbon
Ashes

Potencial energético do resíduo do despulpamento do açaí sob diferentes condições de estocagem

Energetic potential of the açai depulping waste under different storing conditions

RESUMO: A investigação da qualidade biomassa na condição fresca e após estocagem no ambiente é necessária para subsidiar seu aproveitamento para geração de energia. Na Amazônia, o resíduo produzido a partir do despulpamento do açaí se destaca pela ampla disponibilidade. O objetivo do trabalho foi avaliar se os diferentes métodos e locais de acondicionamento modificam as propriedades físicas, químicas e energéticas dos resíduos do açaí e seu potencial com fins energéticos. Os resíduos foram coletados em Macapá, estado do Amapá, em seis diferentes condições: uma amostra fresca, obtida após despulpamento, e cinco estocadas em diferentes condições ambientais. Após a despulpa, o resíduo do açaí apresentou umidade de 103,8%, mas a estocagem resultou em secagem natural, reduzindo esta propriedade para até 12,3%. Em comparação ao resíduo fresco (0,719 g cm⁻³), a densidade básica da biomassa dispersa em terreno baldio diminuiu significativamente (0,279 g cm⁻³), o que aumenta os custos de transporte e reduz o rendimento da combustão e pirólise. O teor de voláteis aumentou de 65,29% para até 75,62%, enquanto o carbono fixo diminuiu de 34,70% para até 23,09% e as cinzas de 1,81% para até 1,24%, quando os resíduos foram estocados. Tais modificações sugerem a decomposição de parte dos componentes químicos do resíduo do açaí que se tornam voláteis ou lixiviáveis. Como consequência, a estocagem diminuiu o poder calorífico e a densidade energética dos resíduos. Concluiu-se que a estocagem do resíduo do açaí em qualquer condição, com exceção da diminuição da umidade, prejudicou seu potencial energético.

ABSTRACT: The investigation of the biomass quality in the fresh condition and after storing environmental conditions is necessary to support its usage for energy generation. In Amazonia, the waste produced from açai depulping stands out because of its wide availability. This work aimed to evaluate if the different methods and sites of storage modify the physical, chemical, and energetic properties of the açai waste and its potential for energetic purposes. The residues were collected at Macapá, Amapá state, in six different conditions: a fresh sample, obtained right after depulping, and five samples stored under different environmental conditions. After depulping, the açai waste showed a moisture content of 103.8%, but the storage resulted in natural drying, reducing this property to up to 12.3%. Compared with the fresh waste (0.719 g cm⁻³), the basic density of the wasteland-dispersed biomass decreased significantly (0.279 g cm⁻³), which reduces the yield of combustion and pyrolysis. When the wastes were stocked, volatile materials raised from 65.29% to 75.62%, fixed carbon decreased from 34.70% to 23.09%, and ashes content reduced from 1.81% to up to 1.24%. Such modifications suggested the partial decomposition of chemical components that became volatile or leachable. Consequently, the storage decreased the higher heating value and the energy density of the wastes. It was concluded that açai waste storage by any condition, except for moisture content decreased, harmed its energetic potential.

Recebido em: 17/06/2020
Aceite em: 25/08/2020

1 Introdução

Devido à eminente escassez dos combustíveis fósseis e à necessidade de suprir a demanda interna de energia dos países, observou-se nos últimos anos um aumento da preocupação com a autossuficiência e sustentabilidade energética e um crescimento no investimento para geração de energia por meio de fontes alternativas (Vakulchuk et al., 2020). Nesse contexto, destacam-se as fontes de energia renováveis, originárias de recursos naturais que possuem uma capacidade de renovação cíclica (Costa & Prates, 2005).

O World Energy Council - WEC considera que a sustentabilidade energética apresenta três dimensões principais: sustentabilidade ambiental, equidade e segurança energética. Esses três aspectos precisam ser trabalhados simultaneamente para que seja garantido um desenvolvimento sustentável (WEC, 2018). No último diagnóstico da organização, verificou-se que no Brasil, assim como em outros países da América Latina, ocorreu uma melhora na dimensão de sustentabilidade ambiental. De 2018 para 2019, observou-se na matriz energética Brasileira, um aumento da participação das fontes renováveis de 45,5% para 46,1%. Esse percentual é muito superior ao da matriz energética mundial, que tem apenas 14,2% de energias renováveis (BRASIL, 2020).

Apesar do alto percentual de fontes renováveis na matriz nacional, a biomassa é representada majoritariamente pelos derivados da cana-de-açúcar, com 17% da oferta total, e por lenha e carvão vegetal, com 8% da oferta total (BRASIL, 2018). Portanto, há necessidade da diversificação do uso de biomassas, especialmente visando ao melhor aproveitamento de resíduos, com tecnologias que reduzam o impacto ambiental e sem prejudicar a agricultura de alimentos. Nesse caso, a bioenergia pode ser obtida a partir de biomassas, principalmente por processos de combustão para geração de energia térmica e elétrica. A gaseificação da biomassa, por exemplo, apresenta alta eficiência e permite a geração de combustíveis facilmente utilizáveis (Soltani et al., 2013). Os resíduos biológicos também são excelentes alternativas para geração de bioenergia e minimização do consumo de combustíveis fósseis, apresentando tanto vantagens ecológicas quanto financeiras (Marques & Pinto, 2013).

O açaí (*Euterpe oleracea*), proveniente de uma palmeira nativa, é um fruto oleaginoso, amplamente consumido pelas diversas populações da Amazônia. No norte do Brasil, a polpa obtida de sua semente tem uma vasta tradição nutricional (Oliveira, 2014). O processo de despulpamento do açaí resulta na formação de uma grande quantidade de resíduos, que correspondem a 81,3% da massa do fruto processado, e tornaram-se um sério problema ambiental (Bufalino et al., 2018). Sua decomposição

e retorno à natureza são lentos e poucas tecnologias alternativas têm sido desenvolvidas para seu aproveitamento (Oliveira, 2014).

Uma alternativa possível seria sua utilização para a produção de bioenergia. No entanto, para atestar seu potencial para essa finalidade, faz-se necessário uma caracterização física e química desses resíduos. Essa biomassa, na condição recém-processada, apresenta alto poder calorífico e densidade básica superior à da madeira de eucalipto, principal matéria-prima para a produção de bioenergia no Brasil (Bufalino et al., 2018). Essas propriedades são vantajosas para o rendimento energético do processo de combustão (Protásio et al., 2013).

Por outro lado, o despejo e o armazenamento do resíduo do açaí por longos períodos a céu aberto em diferentes condições é uma prática comum, e isso pode alterar as propriedades do resíduo. No caso do carvão vegetal, por exemplo, foi verificado que sua estocagem reduziu o teor de carbono fixo e aumentou o de materiais voláteis, diminuindo sua qualidade para combustão (Wang et al., 2017). Dessa forma, é necessário analisar se o resíduo do açaí mantém as propriedades mínimas favoráveis para a produção de bioenergia mesmo após esse tipo de processo de estocagem ou se é necessário que a conversão seja realizada logo após a geração do resíduo.

Considerando esses aspectos, o objetivo do trabalho foi avaliar se os diferentes métodos e locais de acondicionamento modificam as propriedades físicas, químicas e energéticas dos resíduos do açaí e seu potencial com fins energéticos.

2 Material e Métodos

Os resíduos de açaí foram coletados em outubro de 2018 nas cidades de Macapá e Santana, estado do Amapá, Brasil. Foram coletados resíduos despejados de cinco diferentes procedências com variações nas condições de estocagem. O tempo que os resíduos ficaram armazenados nas diferentes localidades é desconhecido. Adicionalmente, foram obtidos resíduos frescos diretamente de um estabelecimento comercial (batedeira de açaí), após meia hora do despulpamento do fruto (Tabela 1).

Aproximadamente 2 kg de resíduo de cada procedência foram coletados e acondicionados em sacos plásticos fechados para evitar perda de umidade durante o transporte.

Para a determinação das umidades base seca e base úmida pelo método da estufa conforme NBR 14.660 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2004) para madeira, foram selecionadas 10 unidades de resíduo de açaí de cada localidade na condição obtida em campo e pesadas em balança com 0,001 g de precisão. As amostras foram secas em estufa à temperatura de 105° C até massa constante (aproximadamente 24 h) e pesadas. As umidades base seca e base úmida foram calculadas de

Tabela 1. Descrição da procedência das amostras**Table 1.** Description of the sample's origin.

Sigla	Condição	Contato com o Solo	Cobertura	Ensacados ou dispersos	Ambiente
Fr	Fresco	Não	Sim	Ensacados	Junto ao estabelecimento comercial
Es1	Estocado	Sim	Não	Dispersos	Várzea
Es2	Estocado	Sim	Não	Dispersos	Terreno baldio
Es3	Estocado, mas processado há apenas dois dias	Sim	Não	Ensacados	Junto ao estabelecimento comercial
Es4	Estocado há aproximadamente uma semana	Sim	Não	Disperso	Lixão
Es5	Estocado	Não	Não	Ensacados	Junto ao estabelecimento comercial

Fr: resíduos de açaí frescos; e Es1-Es5: resíduos de açaí estocados sob diferentes condições.

acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$UBS = \frac{Mu - Mas}{Mas} 100 \quad (1)$$

Em que: *UBS* é a umidade base seca (%); *Mas* é a massa absolutamente seca (g); e *Mu* é a massa úmida (g).

$$UBU = \frac{Mu - Mas}{Mu} 100 \quad (2)$$

Em que: *UBU* é a umidade base úmida (%); *Mas* é a massa absolutamente seca (g); e *Mu* é a massa úmida (g).

Para determinação da densidade básica, conforme a norma para madeira NBR 11941 (ABNT, 2003), dez unidades de resíduo de açaí de cada procedência foram previamente lavadas com intuito de remover traços da polpa de açaí. Em seguida, as amostras foram imersas em água deionizada até sua saturação. Após este processo, foram medidos os volumes saturados utilizando o método de imersão de acordo com o princípio de Arquimedes. Para tanto, foi utilizado um béquer de 50 mL contendo água deionizada e uma balança analítica. Em seguida, as amostras foram secas em estufa por 24 h a 105° C até total remoção da umidade e pesadas em balança com precisão de 0,001 g. A densidade básica de cada amostra foi determinada de acordo com a Equação 3.

$$Db = \frac{Mas}{Vs} \quad (3)$$

Em que: *Db* é a densidade básica (g cm⁻³); *Mas* é a massa absolutamente seca (g); e *Vs* é o volume saturado (cm³).

Os caroços de açaí foram triturados em um moinho analítico (Ika A1 Basic) e peneirados para seleção das frações que passaram pela peneira de 40 mesh e ficaram retidas na peneira de 60 mesh. A análise imediata foi

conduzida em triplicata de acordo com a norma para carvão de madeira ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2013) para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo com base na massa seca das amostras.

O poder calorífico superior foi estimado conforme a Equação 4, proposta por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005):

$$PC = 0,3536CF + 0,1559MV + 0,0078CZ \quad (4)$$

Em que: *PC* é o poder calorífico superior (MJ kg⁻¹); *CF* é teor de carbono fixo (%); *MV* é o teor de materiais voláteis (%); e *CZ* é o teor de cinzas (%).

A densidade energética da biomassa foi calculada conforme a Equação 5.

$$De = \frac{PC * Db}{1000} \quad (5)$$

Em que: *De* é a densidade energética (GJ m⁻³); *PC* é o poder calorífico superior (MJ kg⁻¹); e *Db* densidade básica (kg m⁻³).

Os dados das propriedades dos resíduos do açaí dos diferentes tratamentos (condições de estocagem) foram submetidos à análise de variância (ANAVA) e teste Tukey a 5% de significância utilizando-se o software Origin 2018 versão Student.

3 Resultados e Discussão

As análises de variância indicaram diferenças significativas entre todas as propriedades físicas dos resíduos do açaí obtidos em diferentes condições de estocagem (Tabela 2).

A amostra fresca apresentou umidade base seca e base úmida estatisticamente superior em comparação a todos os resíduos estocados (Figura 1), o que pode ser atribuído ao fruto fresco que envolve o resíduo antes do

processamento e à adição de água durante a extração da polpa do açaí. Dentre as demais amostras, verificou-se que Es3 e Es5 estavam significativamente mais úmidas,

Tabela 2. Resumo das análises de variância das propriedades físicas dos resíduos de açaí frescos ou provenientes de diferentes condições de estocagem.

Table 2. Summary of the physical properties of the açaí wastes fresh or stored under different conditions.

Variável	F calculado	Coefficiente de Variação (%)
Umidade base seca	54,37*	0,31
Umidade base úmida	79,89*	0,19
Densidade básica	24,78*	0,18

*Significativo a 5%.

enquanto Es1, Es2 e Es4 apresentaram umidade base seca estatisticamente iguais. Para umidade base úmida, Es2 apresentou média estatisticamente superior a Es1 e Es4 (Figura 1).

Os resíduos obtidos nas condições Es1, Es2 e Es4 estavam dispersos no ambiente, enquanto aqueles correspondentes a Es3 e Es5 estavam ensacados junto aos estabelecimentos comerciais, o que contribuiu para manter a alta umidade. O contato com o solo não afetou

irradiação solar no estado do Amapá (Marques et al., 2012). Por isso, na condição dispersa, a umidade foi significativamente reduzida, apesar do ambiente.

O valor de umidade de base seca superior a 100% encontrado para essas amostras frescas está provavelmente relacionado à água superficial e resíduos da polpa após extração. Na literatura foi verificado que as biomassas *Fallopia japonica*, *Heracleum mantegazzianum*, *Impatiens glandulifera* e *Solidago gigantea* apresentaram alta umidade na condição fresca, que variou de 64% a 92% (Meerbeek, 2015).

A umidade elevada dos resíduos frescos de açaí (Fr) é desfavorável para a conversão termoquímica e combustão porque a presença de água aumenta os custos de transporte e sua evaporação aumenta o consumo de energia (Asadullah, 2014). Apesar da combustão de qualquer biomassa ser possível, para viabilizar esse processo a umidade deve ser no máximo 50% (Kumar et al., 2015). Portanto, a dispersão dos resíduos nas condições Es1, Es2 e Es4 favoreceu essa condição, enquanto os resíduos frescos (Fr) e ensacados (Es3 e Es5) precisariam passar por um processo de secagem natural ou artificial previamente à combustão.

Os resíduos de açaí nas condições Fr, Es3, e Es4 apresentaram valores de densidade básica estatisticamente iguais entre si e superiores em relação aos das demais procedências. A densidade básica dos resíduos na condição Es1 foi estatisticamente igual à dos resíduos na condição Es5 enquanto a estocagem Es2 resultou na menor densidade básica dentre os tratamentos (Figura 2). De acordo com os testes estatísticos, as condições Es1 e Es5, que foram classificados como AB, formam um grupo intermediário que é semelhante tanto ao grupo A quanto ao grupo B.

De forma geral, os resultados obtidos indicaram que a densidade básica diminuiu com a estocagem, visto que os resíduos recém processados ou processados há pouco tempo apresentaram densidades básicas estatisticamente superiores (Es1 e Es3). A dispersão dos resíduos do açaí favoreceu a sua degradação, diminuindo a quantidade de massa por volume de unidade de resíduo e, conseqüentemente, diminuindo sua densidade básica (condições Es1 e Es2). A baixa densidade da biomassa ocasiona combustão de baixo rendimento e altos custos de transporte (Asadullah, 2014; Kambo & Dutta, 2014). Portanto, para essa propriedade, o estoque dos resíduos do açaí é desvantajoso.

Além da combustão direta, é possível realizar a briquetagem ou peletização, além da torrefação para melhorar a qualidade energética dos resíduos (García et al., 2018; Amarin et al., 2015). Altas densidades básicas são vantajosas na aplicação de resíduos da biomassa para produção de carvão vegetal por proporcionar maiores rendimentos volumétricos de carbonização (Brito & Barrichelo, 1977).

De acordo com a literatura, a madeira de *Eucalyptus benthamii* aos cinco anos de idade apresentou densidade básica de 0,47 g cm⁻³ (Silva et al., 2015) enquanto a espécie *Bambusa vulgaris* caracterizada nas idades de um, dois e três anos, apresentou densidade básica variando de

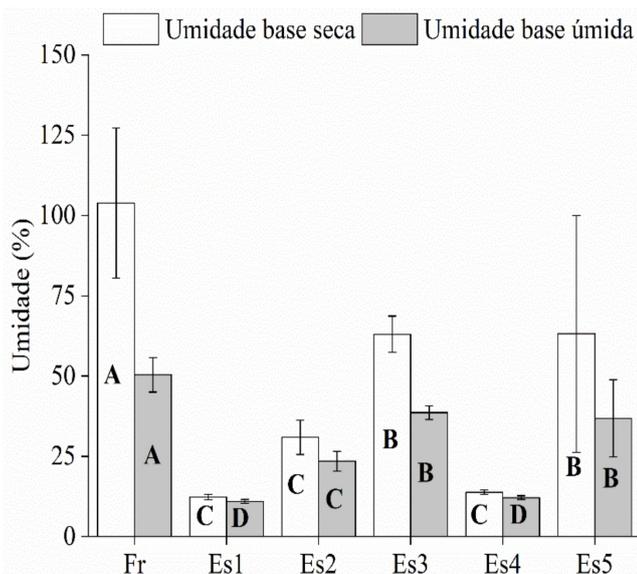


Figura 1. Umidades base seca e base úmida dos resíduos do açaí frescos ou provenientes de diferentes condições de estocagem; Fr: resíduos de açaí frescos; e Es1-Es5: resíduos de açaí estocados sob diferentes condições. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si de acordo com o Teste de Tukey ($p > 0.05$).

Figure 1. Moisture content based on the dry and humid mass of the açaí wastes from different storing conditions; Fr: fresh açaí wastes; and Es1-Es5: açaí wastes stored under different conditions. Means followed by the same letter do not differ according to Tukey Test ($p > 0.05$).

significativamente a umidade dos resíduos na condição Es5 em comparação com Es3.

Embora Es1 tenha sido coletado numa região onde há inundações sazonais, é importante ressaltar que a coleta foi realizada no período em que há o maior pico de

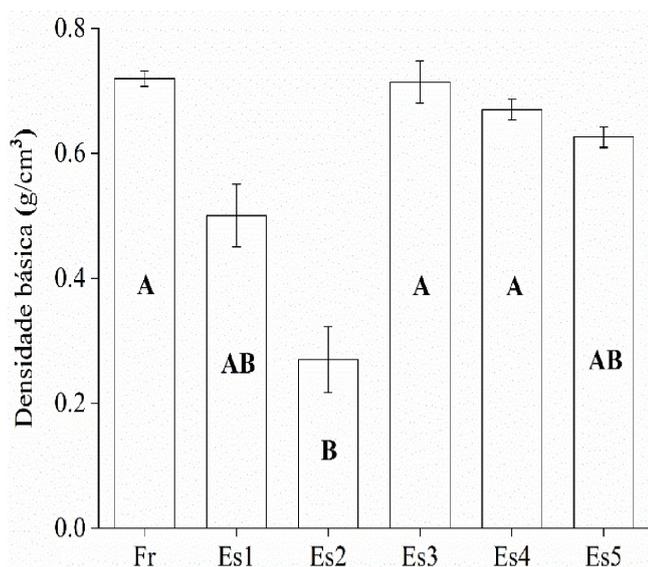


Figura 2. Densidade básica dos resíduos do açaí frescos ou provenientes de diferentes condições de estocagem; Fr: resíduos de açaí frescos; e Es1-Es5: resíduos de açaí estocados sob diferentes condições. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si de acordo com o Teste de Tukey ($p > 0.05$).

Figure 2. Basic density of the açaí wastes from different storing conditions; Fr: fresh açaí wastes; and Es1-Es5: açaí wastes stored under different conditions. Means followed by the same letter do not differ according to Tukey Test ($p > 0.05$).

0,50 g cm⁻³ a 0,71 g cm⁻³ (Vale et al., 2017). Esses resultados indicam que, com exceção da condição Es2, o resíduo do açaí apresentou densidade básica superior ou próxima a outras biomassas normalmente destinadas à produção de bioenergia (0,50 g cm⁻³ a 0,71 g cm⁻³). Entretanto, o resíduo do coco de babaçu apresentou densidade básica de 1,27 g cm⁻³, superior ao do açaí (Protásio et al., 2014).

As análises de variância demonstraram diferenças significativas entre os tratamentos para as análises de química imediata, poder calorífico superior e densidade energética (Tabela 3).

Os caroços frescos de açaí (Fr) apresentaram menor teor de materiais voláteis e maior teor de carbono fixo, respectivamente (Figura 3). Para teor de carbono fixo, a condição Es2 apresentou média significativamente inferior a Es5, enquanto as demais condições foram

Tabela 3. Resumo das análises de variância das propriedades químicas dos resíduos de açaí frescos ou provenientes de diferentes condições de estocagem.

Table 3. Summary of the chemical properties of the açaí wastes fresh or stored under different conditions.

Variável	F calculado	Coefficiente de Variação (%)
Materiais Voláteis	42,93*	0,05
Carbono Fixo	51,69*	0,14
Cinzas	35,93*	0,14
Poder calorífico superior	53,67*	0,00
Densidade energética	2625,14*	0,01

*Significativo ($p < 0,05$).

classificadas como um grupo intermediário (AB) com semelhança tanto à A quanto à B. A condição Es3 forneceu resíduos com o maior teor médio de cinzas, seguida das condições Fr e Es5. O teor de cinzas de Es4 foi estatisticamente igual às condições Es5 e Es2. O menor teor de cinzas foi encontrado para a condição Es1 (Figura 3).

O aumento do teor de materiais voláteis dos resíduos estocados em todas as condições em relação ao resíduo fresco sugere a decomposição de parte dos componentes químicos principais em outros que se tornam voláteis e/ou

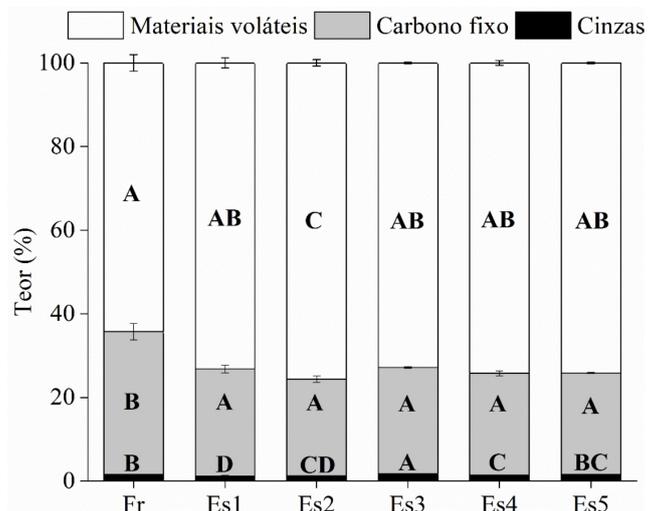


Figura 3. Composição química imediata dos resíduos do açaí frescos ou provenientes de diferentes condições de estocagem; Fr: resíduos de açaí frescos; e Es1-Es5: resíduos de açaí estocados sob diferentes condições. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si de acordo com o Teste de Tukey ($p > 0.05$).

Figure 3. Proximate chemical composition of the açaí wastes from different storing conditions; Fr: fresh açaí wastes; and Es1-Es5: açaí wastes stored under different conditions. Means followed by the same letter do not differ according to Tukey Test ($p > 0.05$).

lixiviáveis. Os resultados obtidos indicam que esse processo ocorre em pouco tempo, já que os resíduos das condições Es3 e Es4, cujo processamento do fruto ocorreu há uma semana ou menos da coleta, também apresentaram aumento desses componentes. Com o aumento do teor de materiais voláteis da biomassa ocorre uma variação proporcional dos teores de carbono fixo e cinzas (Vale et al., 2007).

O resíduo de açaí fresco ou estocado em diferentes condições apresenta maior teor de carbono fixo e menor teor de materiais voláteis em relação a outras biomassas, tais como bambu (14,40% de carbono fixo e 78,76% de materiais voláteis), casca de arroz (9,27% de carbono fixo e 73,18% de materiais voláteis) e bagaço de cana-de-açúcar (13,61% de carbono fixo e 75,03% de materiais voláteis) (Du et al., 2014). O maior teor de carbono fixo e menor teor de voláteis favorece a obtenção de um rendimento maior e um carvão vegetal de melhor qualidade, a partir da pirólise da biomassa fresca (Muñiz et al., 2014).

As médias dos teores de cinzas do açaí coletados sob diferentes condições variaram de 1,24% a 1,61%, sendo os

valores significativamente mais baixos para as amostras que estavam dispersas (Es1, Es2 e Es4). O maior percentual desses componentes nas amostras frescas está relacionado com os teores de carbono fixo e materiais voláteis. Adicionalmente, os resíduos da polpa do açaí podem ter contribuído para esse resultado. Possivelmente, nos resíduos estocados, parte dos minerais também pode ter sido lixiviada.

O resíduo de açaí apresentou menor teor de cinzas em relação a biomassas agrícolas como a casca de arroz e o milho (1,6% a 16,8% de cinzas). Já em comparação com a biomassa lenhosa (0,3% a 1,0% de cinzas), como aparas de madeira de pinus, cedro e eucalipto, o resíduo do açaí apresenta maior teor de cinzas (Protásio et al., 2013).

Menores teores de cinzas da biomassa são vantajosos para a geração de energia a partir da biomassa por combustão, pois o ponto de fusão das cinzas pode ser baixo e causar a formação de escórias ou incrustações, além de outros problemas técnicos nos equipamentos (DEMIRBAS, 2004). Além disso, as cinzas não participam do processo de combustão e não contribuem para o aumento do poder calorífico da biomassa (Vassilev et al., 2017).

Os resíduos frescos de açaí apresentaram poder calorífico superior significativamente maior em comparação a todas as condições de estocagem. Dentre estas, a condição de estocagem Es2 resultou na maior perda desta propriedade, enquanto as demais condições de estocagem não diferiram entre si. A densidade energética foi significativamente diferente entre todos os tratamentos, indicando a influência conjunta das modificações no poder calorífico e da densidade básica (Figura 4).

O decréscimo do poder calorífico dos resíduos após estocagem é compatível com as modificações das frações da composição imediata. A relação entre maior poder calorífico e maiores teores de carbono fixo, com consequente diminuição dos teores de materiais voláteis, foi reportada na literatura para biomassas madeiras (PROTÁSIO et al., 2013) e não-madeiras (LIMA et al., 2020). Quanto maior o poder calorífico, maior a quantidade energia liberada por unidade de massa do combustível, especialmente na degradação do carbono estável (PROTÁSIO et al., 2019).

O resíduo de açaí apresentou poder calorífico superior maior em comparação com várias biomassas madeiras e não madeiras estudadas por Protásio et al. (2013), tais como casca de arroz (16,18 MJ kg⁻¹), resíduos da colheita do milho (18,91 MJ kg⁻¹), resíduos de café (19,29 MJ kg⁻¹), polpa de bambu (17,55 MJ kg⁻¹), bagaço de cana de açúcar (18,89 MJ kg⁻¹) e serragem de madeiras de pinus (20,37 MJ kg⁻¹), cedro (19,91 MJ kg⁻¹) e eucalipto (19,14 MJ kg⁻¹). Para as frações fibras e sementes do resíduo do açaí, foi determinado poder calorífico de 19,91 e 19,32 MJ kg⁻¹, respectivamente (BUFALINO et al., 2018).

A densidade energética é uma propriedade altamente relevante na seleção de biocombustíveis para combustão e pirólise, pois fornece o efeito conjunto do poder

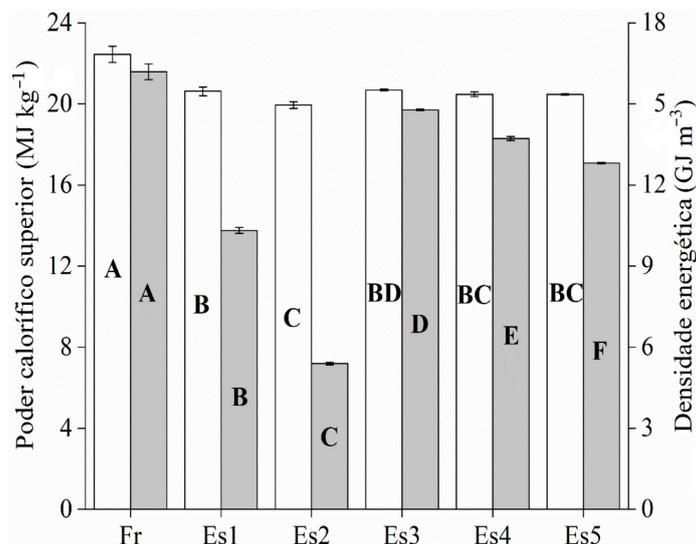


Figura 4. Poder calorífico e densidade energética dos resíduos do açaí frescos ou provenientes de diferentes condições de estocagem; Fr: resíduos de açaí frescos; e Es1-Es5: resíduos de açaí estocados sob diferentes condições. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si de acordo com o Teste de Tukey ($p > 0.05$).

Figure 4. Higher heating value and energetic density of the açai wastes from different storing conditions; Fr: fresh açai wastes; and Es1-Es5: açai wastes stored under different conditions. Means followed by the same letter do not differ according to Tukey Test ($p > 0.05$).

calorífico e da densidade básica, permitindo prever quanto de energia será gerado por volume de biomassa (SILVA et al., 2018). O resíduo do açaí sob diferentes condições de estocagem teve sua composição química imediata mais afetada do que a densidade, exceto para a condição Es2. O contrário foi observado para vinte espécies de madeira da Amazônia (LIMA et al., 2020). Portanto, a densidade energética foi afetada principalmente pelo poder calorífico em função do aumento de materiais voláteis e diminuição do carbono fixo.

4 Conclusão

O processo de estocagem de resíduos do açaí resultou em secagem natural independente das condições do ambiente, sendo a diminuição da umidade em relação ao resíduo fresco, vantajosa para a produção de bioenergia.

Por outro lado, a estocagem do resíduo do açaí por período curto ou prolongado ocasionou modificações indesejáveis na densidade básica, composição química imediata, poder calorífico e densidade energética da biomassa. Portanto, o resíduo do açaí fresco, previamente seco por processos artificiais ou naturais logo após ter sido produzido pelo despulpamento, apresenta maior potencial para a geração de energia.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM D 1762-84*: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Filadélfia: ASTM, 2013.

- AMORIM, F. S.; RIBEIRO, M. X.; PROTÁSIO, T. P.; BORGES, C. H. A.; COSTA, R. M. C. Produção de briquetes a partir de espécies florestais. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 10, p. 34-41, 2015.
- ASADULLAH, M. Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 201-215, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 14660*: madeira – amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 11941*: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. *Resenha Energética Brasileira*. Brasília, DF, 2020.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2018*. Brasília, DF, 2018.
- BRITO, J.; BARRICHELO, L. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e produção vegetal: 1. densidade e teor de madeira da madeira de eucalipto. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 14, n. 14, p. 9-20, 1977.
- BUFALINO, L.; GUIMARÃES, A.; SILVA, B.; SOUZA, R.; MELO, I.; OLIVEIRA, D.; TRUGILHO, P. Local variability of yield and physical properties of açaí waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 10, n. 5, p. 1-10, 2018.
- COSTA, R.; PRATES, C. *O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado*. Rio de Janeiro: BNDES, 2005. 30 p.
- DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004.
- DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. *Bioresource Technology*, v. 161, p. 333-339, 2014.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F. H. A.; PROTÁSIO, T. P. Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. *BioResources*, v. 13, p. 2898-2906, 2018.
- KAMBO, H. S.; DUTTA, A. Strength, storage, and combustion characteristics of densified lignocellulosic biomass produced via torrefaction and hydrothermal carbonization. *Applied Energy*, v. 135, p. 182-191, 2014.
- KUMAR, A.; KUMAR, N.; BARENDAR, P.; SHUKLA, A. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 530-539, 2015.
- MARQUES, D.; BRITO, A.; CUNHA, A.; SOUZA, L. Variação da radiação solar no estado do Amapá: estudo de caso em Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, n. 2, p. 127-138, 2012.
- MARQUES, T.; PINTO, L. Energia da biomassa de cana-de-açúcar sob influência de hidrogel, cobertura vegetal e profundidade de plantio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 6, p. 680-685, 2013.
- MEERBECK, K. V.; DEWIL, L. A. R.; LEMMENS, A. C. P.; HERMY, B. M. M. Biomass of invasive plant species as a potential feedstock for bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, v. 9, n. 3, p. 273-282, 2015.
- MUÑIZ, G.; LENGOWSKI, E.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W.; OLIVEIRA, V.; HANSEL, F. Characterization of *Pinus* spp. needles and evaluation of their potential use for energy. *Cerne*, v. 20, n. 2, p. 245-250, 2014.
- OLIVEIRA, J. *Investigação das etapas para o processo de produção de etanol de segunda geração a partir da biomassa do caroço de açaí (Euterpe oleracea)*. 2014. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, Campinas, 2014.
- 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.
- PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior Eucalyptus firewood. *BioEnergy Research*, v. 12, p. 626–641, 2019.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, A. A. C. da; NAPOLI, A.; MELO, I. N. A. de; SILVA, M. G. da. Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. *Springer Plus*, v. 3, n. 124, p. 1-14, 2014.
- PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, D.; JUNIOR, M.; TRUGILHO, P.; MENDES, L. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production:

characterization and comparison with fossil fuels. *BioResources*, v. 8, n. 1, p. 1166–1185, 2013.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. de O.; ASSIS, M. R. de; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTASIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*, v. 140, p. 1-15, 2020.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SILVA, M. F.; FORTES, M. M.; SETTE JUNIOR, C. R., Characteristics of wood and charcoal from Eucalyptus clones. *Floresta e Ambiente*, v. 25, p. 1-10, 2018.

SOLTANI, S.; MAHMOUDIA, S.; YARIB, M.; MOROSUKC, T.; ROSEND, M.; ZARE, V. A comparative exergoeconomic analysis of two biomass and co-firing combined power plants. *Energy Conversion and Management*, v. 76, n. 1, p. 83-91, 2013.

VALE, A. T.; MOREIRA, A. C. O.; MARTINS, I. S. Avaliação do potencial energético de *Bambusa vulgaris* em função da idade. *Floresta e Ambiente*, v. 24, p. 1-9, 2017.

VALE, A.; GENTIL, L.; GONÇALEZ, J.; COSTA, A. Caracterização energética e rendimento de carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*, DUKE). *Cerne*, v. 13, n. 4, p. 416-420, 2007.

VAKULCHUK, R.; OVERLAND, I.; SCHOLTEN, D. Renewable energy and geopolitics: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 122, p. 1-12, 2020.

VASSILEV, S.; VASSILEVA, C.; CANÇÃO, Y.; LI, W.; FENG, J. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*, v. 208, p. 377–409, 2017.

WANG, L.; BARTA-RAJNAI, E.; HU, K.; HIGASHI, C.; SKREIBERG, O.; GRØNLI, M.; CZÉGÉNY, Z.; JAKAB, E.; MYRVÅGNES, V.; VÁRHEGYI, G.; ANTAL, M. Biomass charcoal properties changes during storage. *Energy Procedia*, v. 105, p. 830-835, 2017.

WORLD ENERGY COUNCIL - WEC. World Energy Trilemma – Index, 2018. UK. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2018/10/World-Energy-Trilemma-Index-2018.pdf>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.

Contribuição dos autores: Raphael de Souza Costa Arede coletou dados e ajudou a escrever; Irvin Benito Ismanto Martoredjo coletou dados e ajudou a escrever. Eder Souto Batista coletou dados e ajudou a escrever. Jefferson Bezerra Bezerra orientou a coleta de dados e fez a estatística. Tiago Marcolino de Souza forneceu infraestrutura e revisou a escrita. Lina Bufalino idealizou o trabalho, orientou a coleta de dados e revisou a escrita.

Fontes de financiamento: Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Amapá (PPP/Processo N° 250.203.044/2017), a Universidade do Estado do Amapá (LABTAM/UEAP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

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