

Caracterização energética da madeira de duas espécies exóticas de ocorrência no semiárido brasileiro

Energy characterization of wood from two exotic species found the brazilian semi-arid region

Lucas Silva de Lima¹, Flavio Cipriano de Assis do Carmo², Pedro Nicó de Medeiros Neto³, Giselle Lemos Moreira⁴, Natália Isabel Lopes Quirino⁵, Gerlanny Vieira de Moraes⁶

RESUMO: A pesquisa teve como objetivo avaliar as características físico-químicas, anatômicas e energéticas da madeira das espécies *Prosopis juliflora* e *Leucaena leucocephala*, visando a utilização como fonte de energia. Para isso, foram selecionadas cinco árvores por espécie e retirados discos com 5 cm de espessura, nas posições a 0 (base), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial do tronco, considerado um diâmetro mínimo de 5,0 cm. Esses discos foram divididos em quatro partes em forma de cunha, sendo duas cunhas utilizadas para determinar a densidade básica, teor de casca e relação cerne/alburno e as outras utilizadas para as análises químicas e energéticas e produção do carvão vegetal. A espécie *Prosopis juliflora* apresentou maiores valores de massa seca (77,92 kg), densidade básica (779,31 kg.m⁻³) e relação C:A (1,00). Por outro lado, a *Leucaena leucocephala* teve um maior teor de lignina insolúvel (28,17%), enquanto a *Prosopis juliflora* apresentou maiores percentuais de extrativos (9,75%) e cinzas na madeira (2,20%). Já a densidade energética da madeira foi superior para a *Prosopis juliflora* (3,73 Gcal.m⁻³). Não foi observada diferença significativa entre as espécies para os resultados do poder calorífico superior e inferior, teores de carbono fixo e materiais voláteis. Quanto ao rendimento gravimétrico e à produtividade em carvão vegetal a *Prosopis juliflora* exibiu os maiores resultados, com valores médios de 42,33% e 329,77 kg.m⁻³, respectivamente. No geral, ambas as espécies apresentaram características satisfatórias para o uso energético, com melhores resultados para a madeira de *Prosopis juliflora*.

Palavras-chave: Caatinga; Carvão vegetal; Densidade energética.

ABSTRACT: The aimed of the research was to evaluate the physical-chemical, anatomical and energy characteristics of the wood of the *Prosopis juliflora* and *Leucaena leucocephala* species, with a view to using it as an energy source. To do this, five trees per species were selected and 5 cm thick disks were removed at 0 (base), 25, 50, 75 and 100% of the commercial height of the trunk, considering a minimum diameter of 5.0 cm. These disks were divided into four wedge-shaped parts, with two wedges used to determine basic density, bark content and heartwood: sapwood ratio and the others used for chemical and energy analysis and charcoal production. The *Prosopis juliflora* species had the highest dry mass (77.92 kg), basic density (779.31 kg.m⁻³) and C:A ratio (1.00). On the other hand, *Leucaena leucocephala* had a higher insoluble lignin content (28.17%), while *Prosopis juliflora* had higher percentages of extractives (9.75%) and ash in the wood (2.20%). The energy density of the wood was higher for *Prosopis juliflora* (3.73 Gcal.m⁻³). There was no significant difference between the species for the results of upper and lower calorific value, fixed carbon content and volatile materials. In terms of gravimetric yield and charcoal productivity, *Prosopis juliflora* showed the highest results, with average values of 42.33% and 329.77 kg.m⁻³, respectively. Overall, both species showed satisfactory characteristics for energy use, with better results for *Prosopis juliflora* wood.

Keywords: Caatinga; Charcoal; Energy density.

¹ Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural – UFCG/CSTR, Patos (PB), Brasil.

² Doutor em Ciências Florestais, docente do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural – UFCG/CSTR, Patos (PB), Brasil.

³ Doutor em Ciências Florestais, docente do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural – UFCG/CSTR, Patos (PB), Brasil.

⁴ Doutora em Ciências Florestais, docente da graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Piauí – UFPI, Bom Jesus (PI), Brasil.

⁵ Engenheira Florestal, Mestranda em Ciências Florestais na Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, UFCG/CSTR, Patos (PB), Brasil.

⁶ Engenheira Florestal, Mestranda em Ciências Florestais na Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, UFCG/CSTR, Patos (PB), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade, a madeira desempenhou um papel fundamental em várias aplicações, com destaque para sua utilização como fonte de energia (Carneiro *et al.*, 2014), sendo considerada o combustível mais antigo empregado para fins energéticos.

Aliado a isso, nos últimos anos, com o consumo excessivo da queima de combustíveis fósseis, que ocasionam emissões do dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, gerou uma crescente preocupação mundial quanto às mudanças climáticas correlacionadas com as fontes de energia não renováveis e conseqüentemente, à busca por fontes renováveis, como a energia hidráulica, eólica, fotovoltaica, lenha e carvão vegetal.

Com relação ao Brasil, a madeira é amplamente empregada como fonte de energia, especialmente nos setores industrial e comercial, bem como na cocção de alimentos, proveniente tanto de florestas nativas quanto de florestas plantadas (Dias Júnior *et al.*, 2015). Com relação ao carvão vegetal, o Brasil lidera a produção mundial, com 12% do total produzido, sendo que 94% desse subproduto da madeira provém de florestas plantadas (IBÁ, 2022).

Já no semiárido brasileiro, a exploração intensiva de recursos vegetais lenhosos para energia, muitas vezes, é proveniente de florestas nativas do bioma caatinga, o único exclusivamente brasileiro, sendo a lenha utilizada em cerâmicas vermelhas, olarias, casas de farinha, padarias, produção de carvão vegetal e na cocção de alimentos. Essa demanda energética gera altos níveis de supressão vegetal, principalmente de espécies nativas. Nesse sentido, a utilização da madeira de espécies florestais exóticas para fins energéticos se torna uma alternativa viável para substituir os indivíduos nativos.

Neste contexto, se destacam a madeira de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) e leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), espécies exóticas que se adaptaram ao bioma Caatinga, com rápido crescimento, menor ciclo de corte e madeiras densas, características importantes para espécies com potencial energético. Porém, por ser um material de origem orgânica, o uso da madeira de qualquer espécie florestal deverá ser baseado nas suas características físico-químicas, anatômicas, pois, segundo Soleymani, Shokrpour e Jaafarzadeh (2023) essas propriedades influenciam diretamente na qualidade energética do material.

Neste sentido, é essencial o desenvolvimento de pesquisas científicas que comprovem a eficiência energética da madeira de espécies florestais exóticas presentes no Nordeste brasileiro. Diante disso, o objetivo deste estudo avaliar as características físico-químicas, anatômicas e energéticas da madeira das espécies *Prosopis juliflora* e *Leucaena leucocephala*, visando a utilização como fonte de energia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ESPÉCIES ESTUDADAS E AMOSTRAGEM

Nesta pesquisa foram avaliadas as características físico-químicas e energéticas das madeiras de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw) D.C.) e leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.), espécies exóticas amplamente utilizadas para diversos fins, dentre estes, energéticos (lenha e carvão vegetal). O material utilizado neste estudo foi coletado no Horto Florestal do Centro de Saúde e Tecnologia Rural (CSTR) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizado no município de Patos, Paraíba. Para a coleta de amostras, foram selecionadas aleatoriamente cinco árvores de cada espécie, com boa fitossanidade e idades desconhecidas, porém, com aspectos de madeira adulta. De cada árvore, foram obtidos discos nas posições 0 (base), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial do tronco, com um diâmetro mínimo de 5,0 cm de espessura.

As amostras coletadas foram transportadas para o Setor de Tecnologia de Produtos Florestais (STPF) da UFCG, onde foram realizadas as análises. Os discos foram subdivididos em quatro partes em forma de cunha, passando pela medula. Duas destas partes, diametralmente opostas, foram usadas para determinar a densidade básica, teor e espessura de casca e relação cerne: alburno, enquanto o restante foi destinado às análises físico-químicas e energéticas da madeira e a produção de carvão vegetal.

2.2 CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA E FÍSICO-QUÍMICA

Foi realizado o cálculo dos volumes de madeira sem casca e do cerne utilizando o método de *Smalian*, conforme destacado por Silva e Paula Neto (1979). Para determinar da relação cerne: alburno das madeiras, mediu-se o diâmetro médio dos discos nas posições 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial das árvores, obtendo os diâmetros médios do cerne e sem casca ao medir o maior e menor diâmetro com régua graduada em milímetros. Os teores de cerne e alburno foram determinados por meio das Equações 1 e 2.

$$\%Cerne = \frac{V_{cerne}}{V_{madeira\ s/c}} * 100 \quad (1)$$

$$\%Alburno = \frac{V_{alburno}}{V_{madeira\ s/c}} * 100 \quad (2)$$

Em que V_{cerne} é o volume da secção (m^3); $V_{alburno}$ é o volume de alburno (m^3); $V_{madeira\ s/c}$ é o volume de madeira sem casca (m^3).

A relação cerne: alburno (C:A) foi delimitada seguindo os preceitos descritos por Evangelista (2007) e Silva (2018). Em cada disco, visualmente determinou-se a região limitante entre a região do cerne e alburno, com auxílio de uma lupa de aumento de 10x. Posteriormente, foram delineadas duas retas perpendiculares, passando pela medula, de aresta igual ao diâmetro em que foram medidas, bem como a região limítrofe, com o uso

de régua de aço graduada em milímetros. A relação C:A foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$C:A = \frac{Dc^c}{D^2 - Dc^2} \quad (3)$$

Em que C:A é a relação cerne: albarno; Dc é o diâmetro do cerne (cm); D é o diâmetro sem casca do disco (cm).

Na determinação da porcentagem de casca, utilizou-se a metodologia descrita por Oliveira (2015), medindo a circunferência do disco com e sem casca. Para determinação da densidade básica da madeira, o volume do corpo de prova foi medido por meio do método da balança hidrostática (Vital, 1984). Posteriormente, foram utilizadas as especificações da Norma Brasileira - NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003). A massa seca foi calculada em relação à densidade básica da madeira e ao volume comercial da madeira sem casca, para cada espécie, conforme destacado por Goulart *et al.* (2003).

Após a secagem ao ar, os cavacos destinados as análises químicas foram transformados em palitos e, posteriormente, em serragem utilizando um moinho do tipo Willey. A serragem foi classificada em peneiras de 40/60 *mesh*, mantida a uma umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, e armazenada em frascos de vidro.

A determinação do teor absolutamente seco seguiu a Norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* - TAPPI 264 om - 88 (TAPPI, 1996). O teor de extrativos e Álcool: Tolueno foi obtido conforme a Norma *American Society for Testing and Materials* - ASTM D1105 (2013), utilizando extratores tipo Soxhlet. O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason, modificado com base no procedimento de Gomide e Demuner (1986). A composição química imediata foi realizada conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986), incluindo a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

2.3 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA MADEIRA

O poder calorífico superior (PCS) da madeira e do carvão vegetal foi estimado com base em sua composição química imediata (Equação 4). O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado a partir do PCS usando a Equação 5 (Cordero *et al.*, 2001).

$$PCS = 0,3543 * CF + 0,1708 * MV \quad (4)$$

Em que PCS é o poder calorífico superior da madeira (MJ.kg); CF é o teor de carbono fixo da madeira (%); MV é o teor de materiais voláteis da madeira (%).

$$PCI = PCS * 324 \quad (5)$$

Em que PCI é o poder calorífico inferior (Kcal.kg⁻¹); PCS é o poder calorífico superior (Kcal.kg⁻¹).

A densidade energética (DE) foi obtida multiplicando a densidade básica da madeira (DBM) pelo seu poder calorífico superior (PCS), expressa em Gcal.m⁻³ de acordo com a Equação 6 (Carvalho *et al.*, 2020).

$$DE = \frac{PCS * DBM}{10^6} \quad (6)$$

Em que: DE é a densidade energética (Gcal.m⁻³); PCS é o poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹); DBM é a densidade básica da madeira (kg.m⁻³).

2.4 CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL

As cunhas destinadas à carbonização foram transformadas manualmente em cavacos e secas ao ar livre. Posteriormente, homogeneizaram-se por espécie e levaram-nas à estufa a 105 ± 3 °C até massa constante.

As carbonizações ocorreram em escala laboratorial com aproximadamente 350 g de cavacos, com cinco repetições para cada espécie, totalizando 10 carbonizações. Para isso, foi utilizado um forno elétrico (mufla) adaptado, com programação da temperatura de 100 °C inicial a 450 °C final, com aumento de 50 °C a cada 30 minutos, totalizando 4 horas. A captura dos gases condensáveis foi feita por um condensador ligado a uma cápsula metálica dentro do forno, com a coleta do líquido pirolenhoso em um kitassato e a liberação dos gases na atmosfera.

Os rendimentos de carvão vegetal e gases condensáveis e não condensáveis foram determinados em base seca conforme as equações 7 e 8.

$$RGCV = \frac{Mc}{Mm} * 100 \quad (7)$$

Em que RGCV é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Mc é a massa do carvão (g); Mm é a massa seca da madeira (g).

O rendimento em gases condensáveis e não condensáveis foi determinado através da seguinte relação (Equação 8):

$$RGCNC = 100 - RGCV \quad (8)$$

Em que RGCNC é o rendimento gravimétrico em gases condensáveis e não condensáveis (%); RGCV é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

A composição química imediata seguiu a norma NBR 8112 (ABNT, 1986), com determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O rendimento em carbono fixo foi obtido pelo produto entre o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico da carbonização.

A produtividade de carvão vegetal (kg.m⁻³) foi calculada com base na seguinte Equação 9 (Protásio *et al.*, 2015).

$$DPCV = \frac{RGCV}{100} * DMB \quad (9)$$

Em que PCV é a produtividade em carvão vegetal (kg.m^{-3}); RGCV = rendimento gravimétrico em carvão (%); DMB = densidade básica da madeira (kg.m^{-3}).

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Na avaliação do experimento, empregou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) para a análise tanto da madeira quanto do carvão vegetal, com dois tratamentos (espécies) e cinco repetições (árvores) para cada um. Para a análise dos resultados, utilizou-se o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para comparar as médias das diferentes interações que foram consideradas significantes pelo teste de F ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores das características dendrométricas, anatômicas e físicas na Tabela 1 foram geralmente superiores para a espécie algaroba, com a exceção do teor de alburno (%).

A algaroba mostrou-se superior em densidade básica, volume e massa seca em comparação com a leucena. Tais características da madeira de algaroba contribuem para mais energia armazenada por unidade de volume e um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Oliveira *et al.*, 2010; Loureiro *et al.*, 2021). Além disso, Protásio *et al.* (2021) ao avaliarem qualidade energética da madeira de clones de *Eucalyptus*, recomendaram o uso de clones com densidades superiores a 500 kg.m^{-3} na geração de energia. Assim, ambas as espécies avaliadas na presente pesquisa possuem aptidão para fins energéticos.

Tabela 1. Características dendrométricas, físicas e anatômicas das espécies algaroba e leucena

Características	Parâmetros	Espécie	
		Algaroba	Leucena
Dendrométricas	Diâmetro a altura do peito (cm)	18,2	12,5
	Altura comercial (m)	9,90	8,57
	Volume comercial sem casca (m^3)	0,099a	0,065a
Físicas	Massa seca (kg)	77,92a	46,02b
	Densidade básica média (kg.m^{-3})	779,31a	700,53b
Anatômicas	Espessura da casca (cm)	0,59	0,31
	Teor de casca (%)	10,37	6,21
	Teor de cerne (%)	55,95	37,91
	Teor de alburno (%)	44,05	62,09
	Relação C:A	1,00a	0,30b

Médias seguidas por uma mesma letra, em cada linha, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Comparando com as espécies catingueira (*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis), angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan) e jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.), frequentemente usadas para energia na região semiárida (Santos *et al.*, 2020), tanto a algaroba quanto a leucena apresentam densidades próximas. Essas densidades também são viáveis quando comparadas a espécies de *Eucalyptus*, amplamente utilizadas para geração de energia no Brasil (Carvalho *et al.*, 2020), que têm densidades acima de 500,00 kg.m⁻³ (Lima *et al.*, 2020).

Quanto às características anatômicas, em comparação com pesquisa desenvolvida por Pereira *et al.* (2013), ao avaliaram a relação C:A do gênero *Eucalyptus*, espécie mais utilizada para fins energéticos no Brasil, os valores médios firmam entre 0,49 a 1,01, próximos aos resultados para as duas espécies avaliadas no presente trabalho, com a madeira de leucena exibindo resultados inferiores. Menores valores para a relação C:A indicam uma secagem mais rápida devido à maior permeabilidade do alburno e menor geração de finos durante a produção de carvão vegetal (Pereira *et al.*, 2013). Neste estudo, a algaroba mostrou uma maior relação C:A, sugerindo que pode ser mais propensa à geração de finos.

Na Tabela 2 estão exibidos os resultados das características químicas e energéticas das espécies avaliadas. Pode ser observado que a madeira de teve maiores teores de extrativos e cinzas, enquanto a leucena apresentou um maior teor de lignina insolúvel, com diferenças significativas entre as espécies.

Tabela 2. Características químicas e energéticas das madeiras das espécies algaroba e leucena

Análises	Parâmetros	Espécie	
		Algaroba	Leucena
Química	Teor de Extrativos (%)	9,75a	2,84b
	Lignina insolúvel (%)	28,17b	31,17a
	Teor de Cinzas (%)	2,20a	1,15b
Rendimentos da madeira	Teor de carbono fixo (%)	19,45a	20,80a
	Rendimento em carbono fixo (%)	8,23	8,27
	Teor de materiais voláteis (%)	78,35a	78,05a
	Poder calorífico superior (Kcal.kg ⁻¹)	4842,47a	4944,06a
	Poder calorífico inferior (Kcal.kg ⁻¹)	4518,60a	4620,11a
	Densidade energética (Gcal.m ⁻³)	3,73a	3,46a

Médias seguidas por uma mesma letra, em cada linha, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Conforme observado por Silva e Trugilho (2003), a porcentagem de extrativos está diretamente relacionada à porcentagem de cerne na madeira, em que, a madeira de algaroba exibiu maior valor médio de percentual cerne (55,95%) e maiores teores de extrativos. Araújo *et al.* (2016) ao avaliarem a madeira de clones de *Eucalyptus*, os resultados do teor lignina insolúvel variaram de 20,93% a 29,50%. Espécies com maiores teores de extrativos e lignina geralmente, possuem maior poder calorífico, em virtude,

desses exibiram maior quantidade de carbono na sua composição química (Lima *et al.*, 2020). Além disso, a lignina contribui diretamente para o maior rendimento em carvão vegetal pela sua alta resistência de degradação térmica.

Para o teor de cinzas, a madeira de algaroba exibiu os maiores resultados médios. Quanto maior o teor de cinzas na madeira, menor a qualidade energética do material, pois, reduz o seu poder calorífico. Quanto ao teor de carbono fixo na madeira é fundamental para a combustão, aumentando o poder calorífico, já que a madeira libera energia por um período mais longo (Soares *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2014). Na madeira de leucena, o maior teor de carbono fixo resultou em valores superiores de poder calorífico superior e inferior em comparação com a espécie algaroba.

Carvalho *et al.* (2020) observaram teores de materiais voláteis na madeira entre 77,03% e 82,45% em espécies da Caatinga, enquanto os valores de carbono fixo para algumas espécies foram semelhantes aos deste estudo. Estes autores ainda relataram os valores de poder calorífico superior da madeira para *Mimosa tenuiflora* (4.897,00 kcal.kg⁻¹) e *Aspidosperma pyrifolium* (4.675,00 kcal.kg⁻¹), espécies comumente utilizadas no semiárido para fins energéticos.

No estudo de Protásio *et al.* (2015) sobre densidade energética da madeira em clones do gênero *Eucalyptus*, os valores variaram de 2,30 a 3,20 Gcal.m⁻³. Já em Santos *et al.* (2016), foi de 2,17 Gcal.m⁻³ para o *Eucalyptus urograndis*. Todos estes resultados foram inferiores aos exibidos para ambas as espécies estudadas nesta pesquisa, o que indica a capacidade energética destes materiais.

Os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal foram estatisticamente diferentes para as madeiras de algaroba e leucena (Tabela 3), com maior resultado para a primeira espécie, provavelmente, por possuir maior densidade da madeira. Quanto ao rendimento em carbono fixo, foi observada mesma tendência observada para o rendimento gravimétrico.

Tabela 3. Características energéticas do carvão vegetal das espécies algaroba e leucena

Rendimentos do carvão vegetal	Espécie	
	Algaroba	Leucena
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	42,33a	40,13b
Gases condensáveis e não condensáveis (%)	57,79b	59,86a
Teor de carbono fixo (%)	68,60a	67,25a
Rendimento em carbono fixo (%)	29,04a	26,73b
Teor de materiais voláteis (%)	29,10a	31,00a
Teor de cinzas (%)	2,30a	1,75b
Poder calorífico superior (Kcal.kg ⁻¹)	6992,21a	6955,19a
Poder calorífico inferior (Kcal.kg ⁻¹)	6674,88a	6631,19a
Produtividade de carvão vegetal (kg.m ⁻³)	329,77a	278,46b

Médias seguidas por uma mesma letra, em cada linha, não diferem entre si (Tukey, p > 0,05).

De acordo com Oliveira *et al.* (2010), maiores teores de lignina e extrativos na madeira aumentam o rendimento em carvão vegetal, devido à maior quantidade de carbono nesses constituintes. Assim, apesar da algaroba ter uma menor quantidade de lignina e maiores teores de extrativos que aos resultados da madeira de leucena, a sua maior densidade básica influenciou diretamente na quantidade de carvão vegetal produzida.

Em relação ao rendimento gravimétrico em carvão vegetal, os resultados foram próximos aos exibidos por Fonseca *et al.* (2020) ao avaliarem as espécies *Sarcomphalus joazeiro* (38,60%) e *Prosopis juliflora* (45,05%). Medeiros Neto *et al.* (2012) exibiram rendimentos gravimétricos de 43,03% para a espécie *Poincianella pyramidalis* e 37,90% para a madeira de *Handroanthus impetiginosus*.

Para o teor de carbono fixo, esse foi semelhante entre as duas espécies estudadas no presente trabalho. Ao analisarem outras espécies de ocorrência no semiárido brasileiro, Oliveira *et al.* (2006) demonstraram um resultado de 71,97% de carbono fixo no carvão vegetal de *Mimosa tenuiflora*. Já Medeiros Neto *et al.* (2012) exibiram valores de 60,58% e 67,68%, respectivamente, para as espécies *Poincianella pyramidalis* e *Handroanthus impetiginosus*. Assim, nota-se a aptidão energética das duas espécies estudadas nesta pesquisa, pois, altos teores de carbono fixo estão diretamente relacionados com mais energia disponível durante a combustão do carvão vegetal.

Quanto ao poder calorífico superior e inferior, ambas as espécies foram estatisticamente semelhantes. O poder calorífico é influenciado pelos teores de lignina e carbono fixo da matéria-prima de origem. Lins *et al.* (2020) obtiveram valores médios de PCS do carvão vegetal de *Mimosa caesalpiniiifolia* de 5837,49 kcal.kg⁻¹, valor inferior ao encontrado para o carvão de ambas as espécies avaliadas na presente pesquisa.

Com relação à produtividade em carvão vegetal, a madeira de algaroba exibiu o maior resultado, provavelmente, em virtude de possuir uma densidade básica mais elevada. Com isso, será necessária menor quantidade de madeira para produzir a mesma quantidade em carvão vegetal, quando utilizada a espécie leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) R. de Wit).

4 CONCLUSÕES

Tanto as características da madeira e do carvão vegetal, incluindo densidade básica, teor de lignina, rendimento gravimétrico, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e inferior, densidade energética da madeira e produtividade em carvão vegetal, indicaram o potencial energético de ambas as espécies.

Assim, a utilização de espécies exóticas adaptadas as condições do semiárido brasileiro para a geração de energia contribuirá para minimizar os efeitos causados pelo uso excessivo das espécies nativas da região.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. C.; OLIVEIRA, O.; CALEGARI, L.; MEDEIROS NETO, P. N.; PIMENTA, A.S. Avaliação físico-química e energética da madeira das espécies *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke e *Amburana cearensis* (Allemão) A. C. Smith de ocorrência no semiárido nordestino brasileiro. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 165-173, 2015. <https://doi.org/10.1590/1980-509820152505165>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D1105**: standard test method for preparation of extractive-free wood. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, 2013.

ARAÚJO, A. C. C.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BRAGA, P. P. C.; LIMA, R. V.; PROTÁSIO, T. P. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n110.13>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro: 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-11941**: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

BRUN, J. E.; BERSCH, A. P.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; BARBA, Y. R.; JUNIOR, J. R. D. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Floresta**, v. 48, n.1, p. 87-92, 2018. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v48i1>

CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A.F.N.M.; CASTRO, R.V.O.; SANTOS, R.C.; FERREIRA, L.P.; DAMÁSIO, B.R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>

CARVALHO, A. C.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, C. P. S.; COSTA, S. E. L.; CARVALHO, A. J. E.; PAREYN, F. G. C.; VIDAURRE, G. B.; DIAS JUNIOR, A. F.; ALMEIDA, M. N. F. Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1-13, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08>

CORDERO, T.; MARQUEZ, F.; MIRASOL-RODRIGUEZ, J.; RODRIGUEZ, J.J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. **Fuel**, v. 80, n. 11, p. 1567-1571, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5)

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

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

FONSECA, C. M. B.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, P. F.; JÚNIOR, D. S. C. Potencial energético do carvão do *Ziziphus joazeiro* (Martins) e da *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 613-619, 2020. <https://doi.org/10.5902/198050985070>

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESK, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003. <https://doi.org/10.5902/198050981753>

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES - IBÁ, **Relatório anual**, 2022.

LIMA, M. D. R.; BARROS JUNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; FIGUEIREDO, I. C. R.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>

LINS, T. R. S.; BRAZ, R. L.; SOUZA JÚNIOR, C. G. C.; CORREIA, H. T. V.; SILVA, T. C.; WALTER, L. S.; Rendimento e caracterização do carvão vegetal de galhos de *Mimosa caesalpinifolia* Benth. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 39-43, 2020. [dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394](https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67394).

LOUREIRO, B.A.; ASSIS, M.R.; MELO, I.C.N.A.; OLIVEIRA, A.F.F; TRUGILHO, P.F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia* spp para uso industrial. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509836120>

MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; ALMEIDA, A. M. C.; PIMENTA, A. S.; CARNEIRO, A. C. O. Características físico-químicas e energéticas de duas espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 579-588, 2012. <https://doi.org/10.5902/198050986624>

NASCIMENTO, M. D. do; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 104-117, 2010. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n3p104-117>

OLIVEIRA, A. C. **Secagem de toras de eucalipto**. 2015. 71 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A.C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; DELLA LUCIA, R. M.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v.30, n.2, p. 311-318, 2006.
<https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200018>

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B.; LIMA JUNIOR, P.H.; SILVA, M.M.O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 801-816, 2015. <https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6>

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p.34-45, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>

SANTOS, C. P. S.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. J. E.; CASTRO, R. V. O.; COSTA, S. E. L.; LOPES, L. I.; PAREYN, F. G. C.; DIAS JÚNIOR, A. F.; TRUGILHO, P. F.; CARVALHO, N. F. O.; MAGALHÃES, M. A. Estoque de energia da madeira em áreas sob manejo florestal no Rio Grande do Norte. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1-10, 2020.
<https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.06>

SANTOS, D. R. S.; SETTE JÚNIOR, C. R.; SILVA, M. F.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v 44, n. 111, p. 751-758, 2016. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.21>

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C. N.; CASTRO, A. F. N. M. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 491-502, 2013.
<https://doi.org/10.5902/198050989293>

SILVA, D. A.; MULLER, 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.
<https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>

SILVA, D. A.; TRUGILHO, P.F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alborno utilizando-se metodologia de análises de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Cerne**, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

SILVA, J. A. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1979.

SILVA, L. F. **Avaliação da aptidão da madeira de seis clones de híbridos de *Eucalyptus* para o processamento mecânico**. 2018. 90 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

SILVA, L. F.; PAES, J. B.; JESUS JUNIOR, W. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; FURTADO, E. L.; ALVES, F. R. Deterioração da madeira de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 393-400, 2014. <https://doi.org/10.1590/01047760201420031462>

SILVA, L. L. H.; OLIVEIRA, E.; CALEGARI, L.; PIMENTA, M. A. C.; PIMENTA, A. S.; DANTAS, M. K. L. Características energéticas do carvão vegetal de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) e leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) R. de Wit). **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 412-419, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509831619>

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015. <https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **Test methods T 264 om - 88**: preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. (Boletim Técnico, 1).