



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE GURUPI  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**KEROLLA MORGANA OLIVEIRA CUNHA**

**QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE *Diospyros hispida* DC.,  
*Xylopiã aromática* E *Mouriri pusa* Gardner NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS**

**GURUPI-TO  
2019**

KEROLLA MORGANA OLIVEIRA CUNHA

QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE *Diospyros hispida* DC.,  
*Xyloia aromática* E *Mouriri pusa* Gardner NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS

Artigo apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Gurupi, Curso de Engenharia Florestal para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal, sob orientação da Prof.<sup>a</sup> Dra. Raquel Marchesan.

GURUPI - TO  
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

C972q Cunha, Kerolla Morgana Oliveira.  
Qualidade do carvão vegetal de *Diospyros hispida* DC., *Xylopia aromática* e *Mouriri pusa* Gardner na região sul do Tocantins. / Kerolla Morgana Oliveira Cunha. – Gurupi, TO, 2019.  
34 f.

Artigo de Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus  
Universitário de Gurupi - Curso de Engenharia Florestal, 2019.  
Orientadora : Raquel Marchesan

1. Cerrado. 2. Biocarvão. 3. Pirólise. 4. Marchas de Carbonização. I. Título

**CDD 577.272**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

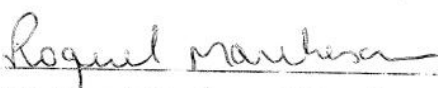
KEROLLA MORGANA OLIVEIRA CUNHA

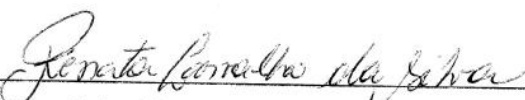
QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE *Diospyros hispida* DC.,  
*Xylopia aromática* E *Mouriri pusa* Gardner NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS

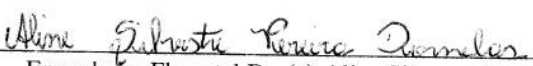
Artigo apresentado à UFT- Universidade Federal do Tocantins- Campus Universitário de Gurupi, Curso de Engenharia florestal, foi julgada adequada para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 29 / 06 / 2019

Banca Examinadora:

  
Prof.ª Dra. Raquel Marchesan. Orientadora, UFT.

  
Engenheira Florestal, Mestranda Renata Carvalho da Silva

  
Engenheira Florestal Dr. (a) Aline Silvestre Pereira Dornelas

*Dedico este trabalho a Deus por ter me permitido chegar até aqui. A minha mãe, meu irmão, minha irmã, meus avós e meu noivo, sempre amarei vocês. “Porque dEle e por Ele, e para ele, são todas as coisas, pois, a Ele eternamente, Amém.”*  
(Romanos 11:36)

## AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, toda honra e glória a Ele por tudo que passei até aqui, por todo crescimento, maturidade e experiências vividas. Pois sei que tudo esteve sempre dentro do seu propósito e no seu controle todo o tempo.

A minha mãe por toda força, apoio, por não me deixar desistir em nenhum momento, por ser minha base e meu maior exemplo de mulher e de mãe, sem ela nada desse sonho seria possível. Obrigado por sempre acreditar em mim, por passar tudo ao meu lado. Te amo.

Aos meus irmãos Manfrine e minha pequena Helena, que são meus motivos de sorrir sempre.

Aos meus sobrinhos e afilhados Henrique, João Lucas e Deidher Filho.

Agradeço aos meus avós Grimalda e Eustásio, que são minha fonte de sabedoria e vivência, são as pessoas que Deus me deu, e que não saberia viver sem eles. Meu amor eterno a eles.

Ao meu namorado e futuro noivo Aelton F., por todo amor e cuidado dedicados a mim. Você é o homem de Deus para minha vida, com quem quero passar todos os meus dias terrenos. Te amo.

Aos amigos que Gurupi me deu: Sara Bandeira, Jéssica Bandeira, Larissa, Nathan, Cássia, Tássila, Ádila, Marcela, Amanda, Ravenna, Alyne, Samara, Edson, Letícia, Laila, Byanca, Nayssa, João, Matheus e Gabriel Ximenes, Gaby, Dona “Tita”, e aos meus amigos do mesmo período Lucas Ferreira, Matheus, Pedro Henrique e Wanessa.

Aos meus amigos distantes, mas sempre presentes em minha vida: Stephanie, Gilliane (in memoriam), Flúvia, Rafael, Hyanny e Vitor.

Aos meus colegas que participaram de todos os processos na coleta de dados, Sorane e Manoel.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Raquel Marchesan, pela orientação, ensinamentos, cuidados e experiências passadas. Por ser um exemplo de profissional para mim.

À Universidade Federal do Tocantins- UFT, e em especial ao meu curso de Engenharia Florestal.

## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo a caracterização energética do carvão de três espécies naturais provenientes de resíduos florestais do município de Dueré - TO, avaliando suas potencialidades energéticas, bem como a influência das temperaturas finais de carbonização. Foram verificadas a densidade básica da madeira, densidade aparente do carvão, rendimento gravimétrico total do carvão, em licor pirolenhoso e em gases não condensáveis, análise química imediata e o poder calorífico superior. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 3 x 2, sendo três espécies e duas marchas de carbonização, com 2 repetições cada. As espécies *Mouriri pusa* Gardner, *Diospyros hispida* DC apresentaram os maiores rendimentos gravimétricos totais. A espécie *Mouriri pusa* Gardner apresentou maior densidade básica da madeira ( $0,741\text{ g.cm}^{-3}$ ) e maior teor de cinzas (1,855%) e *Diospyros hispida* DC apresentou maior densidade aparente do carvão ( $0,593\text{ g.cm}^{-3}$ ). A espécie *Xylopia aromatica* se destacou por apresentar menor teor de materiais voláteis (22,04%) e as espécies *Mouriri pusa* Gardner e *Diospyros hispida* DC apresentaram maior teor de carbono fixo (78,23%) e (79,12%) respectivamente, e maior poder calorífico superior ( $7537,29\text{ kcal.kg}^{-1}$  e  $7566,89\text{ kcal.kg}^{-1}$ ), com grande potencial para uso na siderurgia. Dentre o carvão vegetal produzido e analisado das três espécies avaliadas, recomenda-se a utilização das espécies *Xylopia aromatica* e *Diospyros hispida* DC como fonte de energia. Para a produção de carvão vegetal com essas espécies recomenda-se a marcha de carbonização de  $550^{\circ}\text{C}$ , pois notou-se grande influência da temperatura final de carbonização no aumento da qualidade do carvão vegetal produzido.

**Palavras-Chave:** Biocarvão. Pirólise. Marchas de carbonização.

## ABSTRACT

The present study aimed to characterize the energetic charcoal of three natural species from forest residues in the municipality of Dueré - TO, evaluating their energetic potentials, as well as the influence of the final carbonization temperatures. The basic wood density, apparent coal density, total gravimetric yield of coal, pyroligneous liquor and non-condensable gases, immediate chemical analysis and the higher calorific value were verified. The experiment was conducted in a completely randomized design in the 3 x 2 factorial scheme, with three species and two carbonization marches, with 2 replicates each. The species Mouriri pusa Gardner, Diospyros hispida DC showed the highest total gravimetric yields. The species Mouriri pusa Gardne presented higher wood density ( $0.741\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) and higher ash content (1.855%) and Diospyros hispida DC presented higher apparent density of coal ( $0.593\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). The species Xylopia aromatica was characterized by a lower content of volatile materials (22.04%) and the species Mouriri pusa Gardner and Diospyros hispida DC presented higher fixed carbon content (78.23%) and (79.12%) respectively, and higher higher calorific value ( $7537.29\text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $7566.89\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), with great potential for use in the steel industry. Among the charcoal produced and analyzed of the three species evaluated, it is recommended to use the species Xylopia aromatica and Diospyros hispida DC as an energy source. For the production of charcoal with these species it is recommended the carbonization march of  $550^{\circ}\text{C}$ , because it was noticed a great influence of the final carbonization temperature in the increase of the charcoal quality produced.

**Keywords:** Biocarbon. Pyrolysis. Carbonization marches.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Correlação de Pearson (r) para as variáveis: densidade básica da madeira (Db) e densidade aparente do carvão (Da).....	26
FIGURA 2. Correlação de Pearson (r) para as variáveis: Carbono fixo (%) e Materiais voláteis (%).....	26
FIGURA 3. Correlação de Pearson (r) para as variáveis: Poder Calorífico (Kcal/Kg) e Carbono Fixo (%).....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas e tempos de carbonização de duas marchas de carbonização.....	14
Tabela 1 - Densidade básica da madeira das espécies nativas: <i>Xylopia aromática</i> , <i>Mouriri pusa</i> Gardner, <i>Diospyros hispida</i> DC em diferentes marchas de carbonização.....	19
Tabela 3 - Valores médios de densidade aparente do carvão vegetal das espécies nativas: <i>Xylopia aromática</i> , <i>Mouriri pusa</i> Gardner, <i>Diospyros hispida</i> DC em diferentes marchas de carbonização.....	20
Tabela 4 - Rendimentos gravimétricos totais, em licor pirolenhoso, em gases não condensáveis das espécies nativas: <i>Xylopia aromática</i> , <i>Mouriri pusa</i> Gardner, <i>Diospyros hispida</i> DC, em diferentes marchas de carbonização.....	21
Tabela 5 - Valores médios de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior do carvão vegetal das espécies nativas: <i>Xylopia aromática</i> , <i>Mouriri pusa</i> Gardner, <i>Diospyros hispida</i> DC em diferentes marchas de carbonização.....	22
Tabela 6 - Valores médios de cinzas do carvão vegetal das espécies nativas: <i>Xylopia aromática</i> , <i>Mouriri pusa</i> Gardner, <i>Diospyros hispida</i> DC em diferentes marchas de carbonização.....	25

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Espécies estudadas.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Confeção das amostras de madeira.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Densidade básica da madeira.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Pirólise da madeira.....</b>	<b>14</b>
2.4.1 Rendimento gravimétrico total em carvão vegetal.....	14
2.4.2 Rendimento em licor pirolenhoso e em gases não condensáveis.....	15
<b>2.5 Densidade aparente do carvão vegetal.....</b>	<b>15</b>
<b>2.6 Análise química imediata (AQI).....</b>	<b>16</b>
2.6.1 Determinação do teor de materiais voláteis.....	16
2.6.2 Determinação do teor de cinzas.....	16
2.6.3 Determinação do teor de carbono fixo.....	17
<b>2.7 Determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal.....</b>	<b>17</b>
<b>2.8 Análises estatísticas.....</b>	<b>18</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Densidade básica da madeira.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Densidade aparente do carvão.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Pirólise da madeira.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 Propriedades energéticas e teor de cinzas do carvão.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5 Correlação de Pearson.....</b>	<b>25</b>
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil a madeira possui grande destaque no setor econômico, gerando diversos produtos e subprodutos como lenha, papel, briquetes e licor pirolenhoso. Dentre eles destaca-se o carvão vegetal, sendo utilizado principalmente como fonte de energia (CARVALHO et al, 2005). O Brasil possui enorme representatividade na produção e consumo do mesmo, respondendo por quase um terço de toda produção, sendo também único país a manter um parque industrial siderúrgico com essa fonte de energia renovável (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2015), estima-se que as fontes renováveis terão uma maior representatividade na matriz brasileira de 43,7% em 2024, sendo 19,2% hidroeletricidade e 24,5% energia de biomassa (lenha, carvão, bagaço de cana, etanol e biodiesel), testificando a importância da bioenergia em relação às hidrelétricas (PEDROSO et. al, 2018).

O setor florestal representa 19,06% das fontes fornecedoras de matéria prima das 516 termelétricas movidas à biomassa, sendo inferior apenas ao setor agroindustrial (80,33%), mas superior ao setor de resíduos de aterros sanitários ou dejetos de animais (0,58%) e em termoelétricas movidas à óleos vegetais (0,03%) de acordo com Pedroso et. al (2018).

De acordo com Oliveira et. al (2014), o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, onde grande parte da produção de carvão vegetal é consumida pelo próprio país. O IBGE no ano de 2014 em seu levantamento geográfico constatou que a produção de carvão que provém da extração vegetal e da silvicultura atingiu 7.240.387 toneladas. Dessa produção total 14,1 % (1.021.062 toneladas) corresponde a produção de carvão vegetal proveniente da extração vegetal (IBGE, 2015).

Segundo Nonato (2014), a produção de carvão vegetal no estado do Tocantins ainda é pequena e instável, pois quase toda a produção de carvão vegetal do Estado que provém de floresta nativa é consumida em outros estados. De acordo com o crescimento dos plantios florestais no estado, estimou-se que até 2014 a área plantada seja de 155 mil hectares.

Brand (2010) afirma com seus estudos que dentre as principais características de seleção para o carvão estão a densidade básica, poder calorífico, constituição química e umidade. Diante disso a qualidade da madeira é um fator importante na produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e elevada qualidade.

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro em extensão territorial, ocupando 21% do território (BORLAUG, 2002). Possui uma grande biodiversidade de acordo com Mendonça

et. al (1998), com mais de 7.000 espécies, somando plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas e cipós.

A *Xylopia aromática* também conhecida como *Xylopia grandiflora* A. St.Hil (1825) e *Xylopia longifolia* A.DC. (1832) pertence à família Annonaceae. É uma espécie arbórea, atingindo até 10 m de altura no Cerrado, com dimensões de 40 cm de DAP. Possui densidade de 0,60 g.cm<sup>-3</sup> a 0,70 g.cm<sup>-3</sup> e produz lenha de baixa qualidade (SILVA JÚNIOR et al, 2005; CARVALHO, 2010).

Segundo Lorenzi (1998), *Diospyros hispida* DC. é uma espécie arbórea, de 4-7 m de altura, com copa globosa e densa pertencente à família Ebenaceae. Tronco tortuoso, podendo chegar a 25 cm de DAP. Ela ocorre no bioma Cerrado, e possui madeira moderadamente pesada (densidade 0,62 g/cm<sup>3</sup>), pouco resistente e sujeita ao apodrecimento. Sua madeira possui algumas utilidades, como em construções rústicas, lenha e carvão.

*Mouirir pusa* Gardner, conhecida popularmente como puçá-preto pertence à família Melastomataceae, é uma espécie arbórea que possui 4-8 m de altura, tronco tortuoso e curto, com 20-30 cm de DAP e possui fruto bastante apreciado. Sua madeira é moderadamente pesada, dura ao corte, de textura grossa e grã direita. A aplicação mais comum da madeira é para lenha e carvão (LORENZI, 2009).

Apesar de que a maior parte das indústrias produzem carvão vegetal oriundos de plantios homogêneos, descentralizando a pressão sobre as florestas nativas, existem espécies naturais que podem conter um potencial energético maior do que as espécies utilizadas em plantios comerciais. Por isso há uma grande necessidade de pesquisa e estudos sobre a potencialidade energética das espécies nativas. Cerca de 50% do material para produção de carvão vegetal é oriundo de florestas naturais, em especial do cerrado, onde grande parte de produção de carvão vem do aproveitamento de resíduos do desmatamento gerado pela abertura de áreas para a monoculturas e pecuária (IBGE, 2006; DUBOC et al., 2007).

Nesse contexto, verificando a importância do carvão vegetal e a necessidade de mais informações sobre a potencialidade energética de espécies nativas do cerrado, este estudo teve como objetivo a caracterização energética do carvão de três espécies naturais provenientes de resíduos florestais do município de Dueré, TO.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Espécies estudadas

As amostras de madeiras nativas do cerrado *sensu stricto* utilizadas neste trabalho foram coletadas de árvores abatidas para abertura de área para pastagem, no município de Dueré, estado do Tocantins. As espécies avaliadas foram: *Xylopia aromatica* (pimenta de macaco), *Mouriri pusa Gardne* (puçá) e *Diospyros burchellii* (garoteira). A escolha das espécies foi definida de acordo com a distribuição residual das mesmas na área de coleta. O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da Universidade Federal do Tocantins, campus de Gurupi.

### 2.2 Confeção das amostras de madeira

As toras coletadas em campo foram processadas em marcenaria para confecção de doze corpos de prova, homoganeamente selecionados, de cada uma das três espécies, totalizando 36 amostras com dimensões aproximadas de 2,0 x 2,0 x 5,0 cm (largura x espessura x comprimento) para obtenção dos dados. Os mesmos corpos de provas foram utilizados para todos os testes realizados neste experimento.

### 2.3 Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi determinada segundo a norma ASTM D2395 (ASTM, 2005), em que o volume úmido foi determinado através método da balança hidrostática pela saturação total dos corpos de prova em água e o peso seco obtido através da pesagem dos corpos de prova após secos a 0% de umidade em estufa a uma temperatura de  $103 \pm 2$  °C, até atingir massa constante. A densidade básica foi calculada por meio da Equação 1.

$$Db = \frac{PS}{VU} \quad (1)$$

Em que:

Db = densidade básica da madeira ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

PS = peso seco da amostra de madeira (g);

VU = volume úmido ( $\text{cm}^3$ ).

## 2.4 Pirólise da madeira

Para a produção do carvão vegetal os corpos de prova foram colocados em estufa para secagem a 0% de umidade, a uma temperatura de  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , até atingir a massa constante. As amostras foram carbonizadas em forno elétrico tipo mufla com controle da temperatura final programada e adaptado para recuperar os gases condensáveis

O controle de temperatura foi realizado em duas diferentes marchas de carbonização conforme a Tabela 1.

Tabela 2- Temperaturas e tempos de carbonização de duas marchas de carbonização.

Marcha	Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )							Taxa de Aquecimento ( $^\circ\text{C}/\text{min}$ )	Tempo Total
	150	200	250	350	450	500	550		
1	1h	1h	1h30	1h30	1h	1h	-	1,2	7h
2	1h	1h	1h30	1h30	30min	30min	30min	1,4	6h30

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2010).

### 2.4.1 Rendimento gravimétrico total em carvão vegetal

O rendimento gravimétrico total é a relação percentual entre a massa seca do carvão e a massa seca da madeira, expresso em porcentagem, obtidos por meio da pesagem em balança analítica do reator contendo as amostras de madeira antes do processo de pirólise e após o processo contendo as amostras de carvão. O rendimento gravimétrico foi calculado conforme a equação 2.

$$\text{RGTC} = \left( \frac{M_{sc}}{M_{sm}} \right) * 100 \quad (2)$$

Em que:

RGTC = rendimento gravimétrico total em carvão (%);

Msc = massa seca do carvão (g);

Msm = massa seca da madeira (g).

#### 2.4.2 Rendimento em licor pirolenhoso

O licor pirolenhoso foi produzido por meio da condensação dos gases condensáveis, onde foi realizado uma adaptação ao forno mufla que permite a passagem dos gases por um condensador afim de liquefaze-los em um composto de ácido acético, fórmico, metanol e alcatrão chamado licor pirolenhoso. Os valores de massa do licor pirolenhoso foram obtidos através da pesagem dos aparelhos antes e após a carbonização.

O rendimento em licor pirolenhoso foi calculado pela equação 3.

$$RLP = \left( \frac{MI}{Mm} \right) * 100 \quad (3)$$

Em que:

RLP = rendimento em licor pirolenhoso (%);

MI = massa do licor pirolenhoso (g);

Mm = massa de madeira utilizada na carbonização (g).

#### 2.5 Densidade aparente do carvão vegetal

A densidade aparente do carvão foi determinada de acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 9165.

$$Da = \frac{PC}{VC} \quad (4)$$



Em que:

$D_a$  = densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P_C$  = peso do carvão (g);

$V_C$  = volume do carvão ( $\text{cm}^3$ ).

## 2.6 Análise química imediata (AQI)

Para a determinação da análise química imediata o carvão vegetal foi triturado e peneirado em peneiras de 16, 40 e 65 mesh, colocou-se em cada cadinho 1,2 gramas do material moído, que foram pesados e secos em estufa a  $103 \pm 2$  °C por 30 minutos. A composição química imediata foi realizada baseando-se nas normas ASTM D1762-84 (2007) e ABNT NBR 8112 (1983) onde foram determinados os percentuais de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas dos carvões vegetais.

### 2.6.1 Determinação do teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis foi calculado extraindo a quantidade do carvão que volatilizou através do aquecimento até a temperatura de aproximadamente 850°C em forno elétrico (tipo mufla). O teor de voláteis foi determinado conforme a Equação 5.

$$MV = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} * 100 \quad (5)$$

Em que:

MV = teor de materiais voláteis (%);

$m_1$  = massa da amostra seca + cadinho (g);

$m_2$  = massa da amostra após mufla a 850 °C + cadinho (g), sem materiais voláteis;

$m_3$  = massa do cadinho sem material (g).

### 2.6.2 Determinação do teor de cinzas

Para a obtenção de cinzas, os mesmos cadinhos, sem umidade e voláteis, foram levados ao interior da mufla por um período de 7 horas a 700°C. Ao final restaram apenas as cinzas nos cadinhos, sendo seu teor calculado através da Equação 6.

$$CZ = \frac{(m4 - m3)}{(m1 - m3)} * 100 \quad (6)$$

Em que:

CZ = teor de cinzas (%);

m4 = massa de cinzas + cadinho após 7 horas na mufla (g);

m3 = massa do cadinho vazio (g);

m1 = massa da amostra seca + cadinho (g).

### 2.6.3 Determinação do teor de carbono fixo

O carbono fixo é obtido pela subtração percentual dos materiais voláteis e das cinzas, conforme a Equação 9.

$$CF = 100 - MV - CZ \quad (7)$$

Em que:

CF = carbono fixo (%);

MV = teor de materiais voláteis (%);

CZ = teor de cinzas (%).

### 2.7 Determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal

O poder calorífico superior do carvão vegetal foi estimado utilizando a Equação 8, proposta por Vale et al. (2002) para madeira e derivados.

$$PCS = 4934,43 + 33,27 * CF \quad (8)$$

Em que:

PCS = poder calorífico superior do carvão (kcal.kg<sup>-1</sup>);

CF = teor de carbono fixo (%).

## **2.8 Análises estatísticas**

Os resultados foram avaliados estatisticamente por meio de um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) com arranjo em fatorial 3 x 2, três espécies e duas marchas de carbonização. Primeiramente foi testada a homogeneidade das amostras e em seguida o teste de normalidade dos dados. Constatada a normalidade foi realizada a análise das variâncias (ANAVA). Após a realização da ANAVA, para os fatores que apresentaram diferença significativa foi aplicado o teste de Tukey para a comparação das médias ao nível de 5% de probabilidade. Os programas estatísticos utilizados para as análises dos dados foram o Statgraphics Centurion XVI.I e o SISVAR 5.6. Para a tabulação dos dados, determinação do Coeficiente de Variação (CV%) e análise de correlação linear de Person (r) foi utilizado o programa Excel 2007 ®.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Densidade básica da madeira

Os valores de densidade básica da madeira estão apresentados na Tabela 2. Observou-se que os valores médios diferiram estatisticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre as espécies estudadas e, que a *Mouriri pusa* Gardner apresentou o maior valor médio ( $0,741 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e a *Xylopiá aromática* o menor valor ( $0,637 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Segundo Silveira et al. (2013) e Vale et al. (2005), as madeiras podem ser classificadas como madeiras de baixa densidade ( $<0,550 \text{ g.cm}^{-3}$ ), de média densidade (entre  $0,550$  e  $0,720 \text{ g.cm}^{-3}$ ), e de alta densidade ( $>0,730 \text{ g.cm}^{-3}$ ). A espécie *Mouriri pusa* Gardner apresentou alta densidade enquanto as outras espécies apresentaram média densidade.

Tabela 3 - Densidade básica da madeira das espécies nativas: *Xylopiá aromática*, *Mouriri pusa* Gardner, *Diospyros hispida* DC em diferentes marchas de carbonização.

Espécies	Db ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	F
<i>Xylopiá aromática</i>	0,637 (3,32) b	
<i>Mouriri pusa</i> Gardner	0,741 (4,54) a	45,41*
<i>Diospyros hispida</i> DC	0,644 (3,97) b	

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente (Teste de Tukey -  $P \geq 0,05$ ). Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ). Fonte: Autor (2019).

Os valores médios de densidade básica para as espécies *Xylopiá aromática* e *Diospyros hispida* DC (Tabela 2) foram próximos aos descritos na literatura para árvores das mesmas espécies ( $0,600 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $0,620 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Rodrigues et al. (2011) e Silva et al. (2018) encontraram valores de densidade básica para o Jatobá ( e  $0,730$  que se assemelha ao valor encontrado nesse trabalho para *Mouriri pusa* Gardner. Torres et al. (2016) encontrou valores médios de densidade básica da madeira para híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* de  $0,430 \text{ g.cm}^{-3}$ , aos 32 meses e Trugilho et al. (2015) encontrou valores de densidade básica para híbridos e espécies de eucalipto variando entre  $0,446$  a  $0,590 \text{ g.cm}^{-3}$  aos 4 anos, valores sendo inferiores aos encontrados nesse estudo para todas as espécies.

Segundo Silva (2001) e Pereira et al. (2016) o desejável para a produção de carvão vegetal é possuir densidade de valor considerável, uma vez que, quanto maior a densidade da madeira, maior a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume.

De acordo com os estudos realizados por Oliveira et al. (2010), o gênero *Eucalyptus* é o mais utilizado para a produção de carvão vegetal, e em seus estudos encontrou-se densidade básica de  $0,550 \text{ g/cm}^{-3}$ , valor inferior ao encontrado nesse estudo. Ladeira et al. (2018)

encontrou valor de  $0,410 \text{ g/cm}^{-3}$  de densidade básica para *Pinus sp*, valor inferior ao encontrado nesse estudo.

### 3.2 Densidade aparente do carvão

Os valores de densidade aparente do carvão das espécies estudadas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Densidade aparente do carvão das espécies nativas: *Xylopia aromática*, *Mouriri pusa* Gardner, *Diospyros hispida* DC em diferentes marchas de carbonização.

<b>Espécies</b>	<b>DA (<math>\text{g/cm}^{-3}</math>)</b>	<b>F</b>
<i>Xylopia aromática</i>	0,490 b (4,74)	118,75*
<i>Mouriri pusa</i> Gardner	0,467 c (3,00)	
<i>Diospyros hispida</i> DC	0,593 a (4,71)	
<b>Marchas de carbonização</b>	<b>DA (<math>\text{g/cm}^{-3}</math>)</b>	<b>F</b>
500°C	0,513 a (12,22)	1,04 <sup>ns</sup>
550°C	0,520 a (11,51)	
<b>Interação</b>	<b>DA (<math>\text{g/cm}^{-3}</math>)</b>	<b>F</b>
Espécies x Bateria	-	0,48 <sup>ns</sup>

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente (Teste de Tukey -  $P \geq 0,05$ ). Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ). Fonte: Autor (2019)

Ribeiro e Vale (2006) afirmam em seus estudos que um carvão vegetal de boa qualidade deve ter características como alta densidade aparente, alto teor de carbono fixo, baixo teor de materiais voláteis e baixo teor de cinzas.

Pode-se observar na Tabela 3 houve diferença estatística nível de 5% de probabilidade entre as espécies para a densidade aparente. Dentre os valores de densidade aparente entre as espécies, observa-se que o valor encontrado para *Diospyros hispida* DC foi superior as demais espécies. Veiga et al. (2018) encontrou valor de  $0,523 \text{ g/cm}^{-3}$  para *Corymbia citriodora*, valor semelhante ao encontrado nesse estudo, e encontrou valores de DA variando de 0,334 a  $0,382 \text{ g/cm}^{-3}$  para carvão de clones (MN 463 e MN 463) de *Eucalyptus urophylla*. Quando o carvão vegetal é destinado à siderurgia, deseja-se valores mais elevados de densidade aparente, pois quanto maior for a densidade, melhor será a ocupação do carvão no interior do forno e maior será a eficiência no processo de conversão do minério (ARAÚJO et al., 2018).

Oliveira E. et al (2006) em seus estudos encontrou valores de  $0,510 \text{ g/cm}^{-3}$  de densidade aparente do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir, pertencente a Caatinga, valores semelhantes ao encontrados nesse estudo para *Diospyros hispida* DC, o que indica uma boa

qualidade em termos energéticos e, portanto, um bom potencial para a produção de carvão e geração de energia.

### 3.3 Pirólise da Madeira

Os rendimentos em licor pirolenhoso, em gases não condensáveis e o rendimento gravimétrico do carvão vegetal provenientes da pirólise em relação as marchas de carbonização com temperaturas finais de 500 e 550°C estão expostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Rendimentos gravimétricos totais, em licor pirolenhoso, em gases não condensáveis das espécies nativas: *Xylopiá aromática*, *Mouriri pusa* Gardner, *Diospyros hispida* DC, em diferentes marchas de carbonização.

Espécies	Parâmetros	Marchas de Aquecimento	
		500 °C	550 °C
<i>Xylopiá aromática</i>	RG carvão (%)	31,15	30,16
	RGC (%)	43,47	40,68
	RGNC (%)	25,37	29,15
<i>Mouriri pusa</i> Gardner	RG carvão (%)	35,13	32,05
	RGC (%)	35,85	13,5
	RGNC (%)	25,00	54,44
<i>Diospyros hispida</i> DC	RG carvão (%)	29,23	31,06
	RGC (%)	50,15	48,44
	RGNC (%)	20,61	20,49

Nota: RG: rendimento gravimétrico em carvão vegetal, RGC: Rendimento em gases condensáveis, RGNC: rendimento em gases não condensáveis. Fonte: Dados trabalhados pelo autor (2019).

Na Tabela 4 podemos observar a redução nos valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal com o aumento da temperatura final, exceto para a espécie *Diospyros hispida* DC, que teve um comportamento inesperado, pois devido a decomposição dos constituintes químicos da madeira esperava-se a diminuição do rendimento gravimétrico em carvão (Araújo et al, 2018).

Santos (2017) em seus estudos encontrou valor de 26% para o rendimento gravimétrico nacional em carvão vegetal, valor inferior aos encontrados nesse estudo. Dentre as três espécies, a que obteve maior RG foi a *Mouriri pusa* Gardner com 32,05%, e a que obteve menor valor foi a espécie *Xylopiá aromática* com 30,16%. Santos et al. (2016) encontrou 30,21% de RG para clone de eucalipto a uma marcha de aquecimento de 450°C, assemelhando-se ao encontrado para *Xylopiá aromática* e inferior ao valor de *Mouriri pusa* Gardner. De acordo com

Arantes (2009) quanto maior o tempo de exposição da madeira ao calor, maior será sua degradação térmica e menor o rendimento em carvão vegetal.

Todas as espécies desse estudo apresentaram diminuição dos valores de RGC com o aumento da temperatura. Dentre as espécies estudadas, *Mouriri pusa* Gardner teve destaque com menor valor encontrado, com 13,5% de RGC a 550°C e *Diospyros hispida* DC obteve o maior valor de 48,44%, valor superior ao encontrado por Araújo et al. (2018) para *Cenostigma macrophyllum* com 41,53% a uma marcha de carbonização de 400°C.

Nesse estudo a única espécie que apresentou comportamento diferente na quantificação dos RGNC foi a espécie *Mouriri pusa* Gardner, que com aumento da temperatura também aumentou. Santos et al. (2016) afirma em seus estudos que materiais com maiores teores de celulose e hemicelulose produzem mais gases durante a carbonização por causa da baixa resistência à degradação térmica desses compostos, pois a diferença na composição química da madeira afeta diretamente o rendimento em gases condensáveis e não condensáveis. Frederico (2009) encontrou valores de RGNC que variam de 22,89-27,97% para clones de eucalipto que se aproximam dos valores encontrados de RGNC para *Diospyros hispida* DC (25,37-29,15%) e *Xylopi aromática* (20,61-20,49%).

### 3.4 Propriedades energéticas e teor de cinzas do carvão

Os valores médios dos materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior do carvão das espécies do Cerrado nas marchas de carbonização com temperaturas finais de 500 e 550°C encontram-se na Tabela 5 e os valores médios de cinzas estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 5 - Valores médios de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior do carvão vegetal das espécies nativas: *Xylopi aromática*, *Mouriri pusa* Gardne, *Diospyros hispida* DC em diferentes marchas de carbonização.

Parâmetros	Espécies	500°C	550°C	F da interação
MV (%) do carvão	<i>Xylopi aromática</i>	23,6 bA (2,22)	22,04 aB (5,48)	11,97*
	<i>Mouriri pusa Gardne</i>	26,02 aA (5,41)	19,97 bB (4,45)	
	<i>Diospyros hispida</i> DC	24,89 abA (6,69)	20,13 bB (4,28)	
CF (%) do carvão	<i>Xylopi aromática</i>	75,93 aB (0,62)	77,46 bA (1,59)	12,47*
	<i>Mouriri pusa Gardne</i>	72,07 bB (1,95)	78,23 aA (1,20)	

<b>PCS (Kcal/Kg) do carvão</b>	<i>Diospyros hispida</i> DC	74,39 aB (2,19)	79,12 aA (1,70)	12,45*
	<i>Xylopiá aromática</i>	7460,66 aB (0,21)	7511,38 bA (0,54)	
	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	7332,24 bB (0,64)	7537,29 abA (0,41)	
	<i>Diospyros hispida</i> DC	7409,45 aB (0,33)	7566,89 aA (0,40)	

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Fonte: Dados trabalhados pelo autor (2019).

Segundo Vale et al. (2010) e Mota (2013) a qualidade do carvão vegetal é um dos principais fatores para sua introdução no mercado. Existem vários fatores que influenciam na qualidade do carvão vegetal, mas a qualidade depende principalmente da espécie da madeira, tamanho das peças e o método de carbonização.

A análise de variância indicou que houve diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ) para os materiais voláteis dos carvões vegetais entre as espécies e para os valores de diferentes marchas de temperatura e na interação entre os fatores, onde todas as espécies obtiveram valores de MV na marcha de 500°C superior ao de 550°C. Para *Xylopiá aromática*, *Mouriri pusa Gardner* e *Diospyros hispida* DC, com respectivos valores de 23,6%, 26,02% e 24,89% a 500°C assemelha-se ao valor de 24,90% encontrado por Oliveira et al. (2015) e 26,27% encontrado por Paes et al. (2012) para jurema preta. Soares et al. (2014) em seus estudos para carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com idades diferentes, encontraram valores de 20,08% (3 anos) e 18,85% (5 anos) para MV, aproximando-se de valores encontrados para *Mouriri pusa Gardner* que obteve o menor valor de MV a temperatura final de 550°C, com valor de 19,97%.

Entende-se como carbono fixo, a quantidade de carbono presente na madeira. Segundo Carmo (1988), o teor de carbono fixo apresenta uma correlação direta com o rendimento gravimétrico do carvão. Os teores de carbono fixo encontrados nas análises foram significativos ( $p \leq 0,05$ ) entre os fatores de interação e entre as marchas de carbonização, exceto *Diospyros hispida* DC com 79,12% de CF, mesmo sendo o maior valor encontrado dentre as espécies e marchas de carbonização. Valores de 78,39% e 76,85% encontrados por Soares et al. (2014) para CF % de carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* respectivamente com idade de 3 e 7 anos, assemelham-se aos encontrados para *Mouriri pusa Gardner* (78,23%) e *Xylopiá aromática* (77,46%). Mendes (2018) em seus estudos encontrou valor de CF de 77,55% para *Xylopiá aromática*, valor idêntico ao encontrado nesse estudo para



a mesma espécie. O Teor de CF encontrado para o puçá foi superior ao encontrado por Barcellos (2007) para *E. camaldulenses* com 72,79%.

De acordo com Barcellos (2007) o poder calorífico corresponde ao número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível expressa em Kcal/kg para combustíveis sólidos e líquidos. Os valores do PCs deste estudo foram estatisticamente significativos ( $p \leq 0,05$ ), havendo diferenças entre as marchas de carbonização de cada espécie e na interação entre os fatores. Todas as espécies apresentaram valor de PCs da marcha 550°C superior à de 500°C. A *Xylopiá aromática* apresentou valor de PCs na marcha final de carbonização de 7511,38 Kcal/Kg, valor este superior ao encontrado por Vidaurre et al. (2012) de 4544,5 Kcal/kg para a *Schizolobium amazonicum* em função da idade e superior também à média de 4763 Kcal/Kg encontrada por Brasil et al. (2002) para 47 espécies do Cerrado, que variou de 4.516 kcal/kg para *Blepharocalix salicifoliusa* a 4.989 kcal/kg para *Acosmium dasycarpum*. Os valores de PCs de *Mouriri pusa* Gardner e *Diospyros hispida* DC de 7537,29 Kcal/Kg e 7566,89 Kcal/Kg respectivamente foram superiores a valores encontrados por Juízo et al. (2017) para casca de eucalipto carbonizada e também superiores aos valores encontrados por Assis et. al. (2018) para um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com marcha de carbonização final de 450°C. Segundo Oliveira et al. (1982), o teor de CF juntamente com o teor de MV, é a principal característica que determina o poder calorífico superior do carvão vegetal, mostrando uma relação diretamente proporcional, por isso quando o teor de CF aumenta com uma maior temperatura, o mesmo acontece com o poder calorífico superior.

De acordo com a Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003, estado de São Paulo, para um carvão vegetal obter o Selo Premium, precisa atender alguns quesitos como: umidade do carvão menor que 5%, teor de carbono fixo maior que 75%, teor de materiais voláteis menor que 23,5% e teor de cinzas abaixo de 5% (SÃO PAULO, 2003). Analisando os critérios verificamos que as espécies *Xylopiá aromática* e *Diospyros hispida* DC cumpriram totalmente as exigências do Selo Premium, sendo consideradas espécies indicativas de carvão vegetal com qualidade.

Tabela 6 - Valores médios de cinzas carvão vegetal das espécies nativas: *Xylopiá aromática*, *Mouriri pusa* Gardner, *Diospyros hispida* DC em diferentes marchas de carbonização.

<b>Espécies</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>F</b>
<i>Xylopiá aromática</i>	0,502 c (13,85)	282,14*
<i>Mouriri pusa</i> Gardner	1,855 a (12,06)	

<i>Diospyros hispida</i> DC	0,728 b (13,56)	
<b>Marchas de carbonização</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>F</b>
500°C	1,042 a (92,96)	0,29 <sup>ns</sup>
550°C	1,015 a (84,73)	
<b>Interação</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>F</b>
Espécies x Marchas	-	0,71 <sup>ns</sup>

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Fonte: Dados trabalhados pelo autor (2019).

Nota-se na tabela 6 que houve diferença significativa entre as espécies em relação aos teores de cinzas.

Segundo os estudos de Protásio et al. (2011) e Oliveira et al. (2017) altas quantidades de cinzas diminuem o poder calorífico, causando perda de energia, por isso o desejável é obter valores baixos de teor de cinzas, destacando nesse contexto os valores encontrados para *Xylopiá aromática* que foi de 0,502%, e contrariando esse conceito sobre valores encontrados para *Mouriri pusa* Gardner com 1,850% de teor de cinzas. Valores de 1,530%, 0,870% e 0,330% para híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com 3, 5 e 7 anos respectivamente encontrado por Soares (2014) foram inferiores aos valores encontrados nesse estudo para *Mouriri pousa* Gardner (1,850%), 0,870% superior ao encontrado para *Diospyros hispida* DC (0,720%) e o valor de 0,330% foi inferior ao encontrado para *Xilopia aromática*.

Valores encontrados para *Mouriri pusa* Gardner assemelha-se ao encontrados nos estudos de Figueiredo et al. (2018) com teor de cinzas de 1,920% para a espécie *Pterogyne nitens* à carbonização em 600°C e foi inferior ao valor encontrado por Araújo et al. (2018) com 2,220% de cinzas para a *Cenostigma macrophyllum* a 400 °C.

### 3.5 Correlação de Pearson

Na Figura 1 observa-se correlação positiva entre Db x Da, pois são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior valor de Db maior o valor de Da. O valor de  $r = 0,793$  foi inferior ao valor encontrado por Veiga et al. (2018) para madeira e carvão de *Eucalyptus urophylla* e de *Corymbia citriodora* com valor de  $r = 0,932$ , o que seria ideal no processo de seleção de espécies para produção de carvão vegetal, pois quanto mais densa a madeira mais energética ela será.

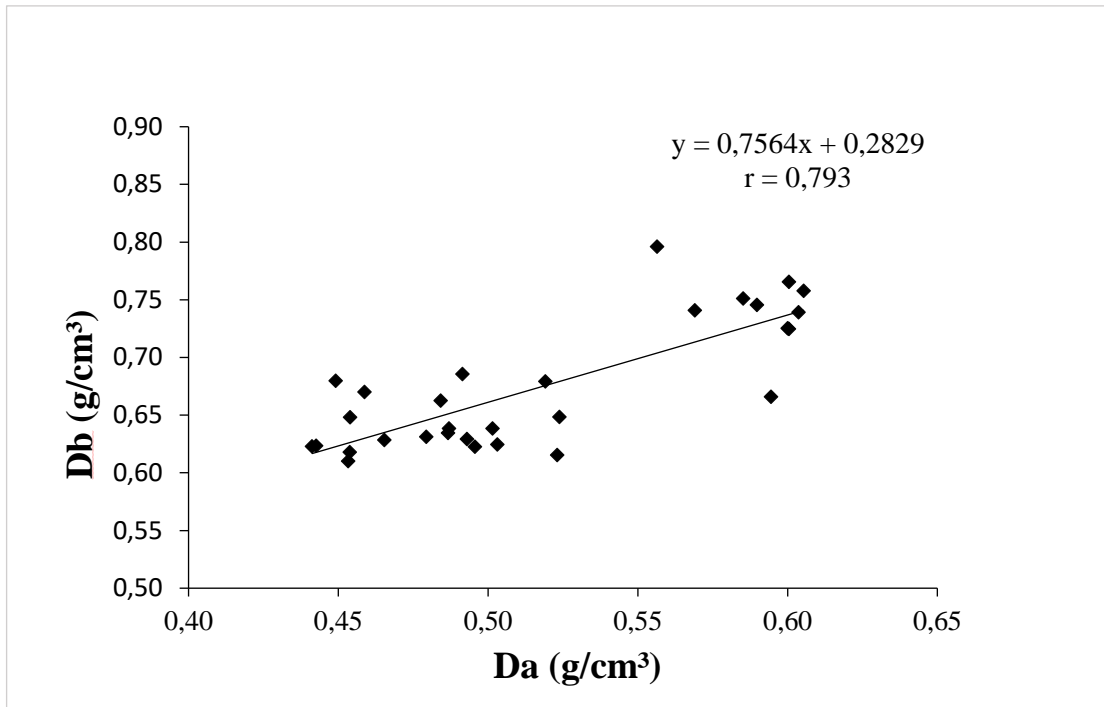


FIGURA 1. Correlação de Pearson (r) para as variáveis: densidade básica da madeira (Db) e densidade aparente do carvão (Da).

Na Figura 2 observa-se que houve forte correlação negativa (-0,974) entre carbono fixo e materiais voláteis, ou seja, quanto maior o teor de carbono fixo, menor o teor de materiais voláteis. O mesmo foi encontrado por Soares (2014) com uma correlação de  $r = -0,99$  para carvão vegetal de híbridos de eucalipto.

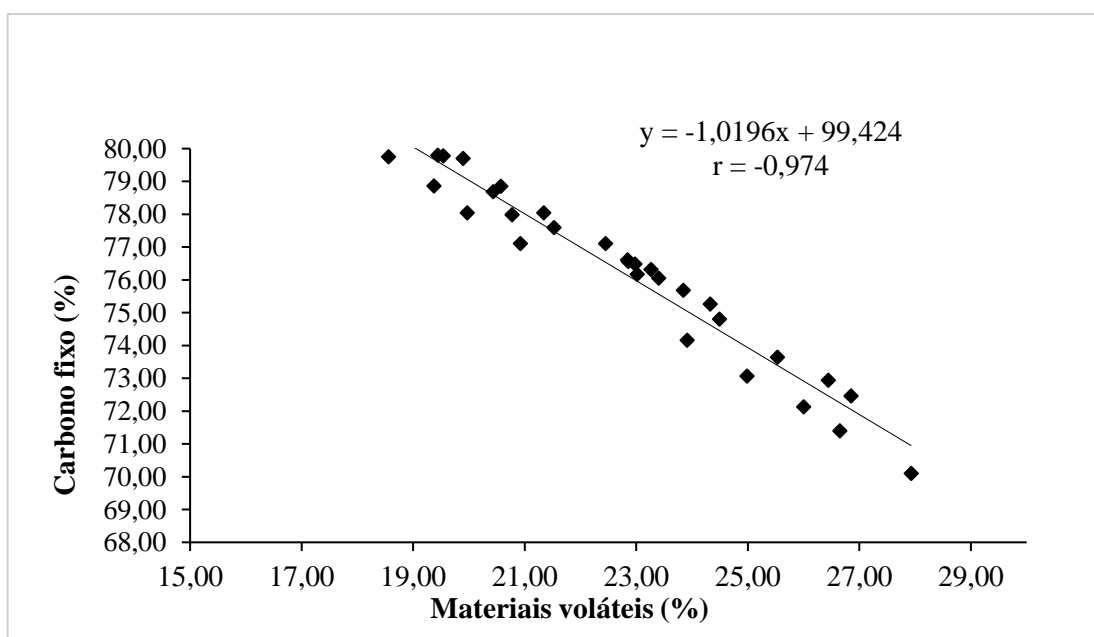


FIGURA 2. Correlação de Pearson (r) para as variáveis: Carbono fixo (%) e Materiais voláteis (%).

Segundo Barcellos (2007) existe uma correlação positiva entre o teor de carbono fixo e o poder calorífico, e uma correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de materiais voláteis, atestado nesse estudo de acordo com a Figura 3. O valor de  $r = 1$  da correlação de PCs x CF, foi superior ao encontrado por Oliveira et al.(2019), com valor de  $r = 0,66$  entre poder calorífico útil e carbono total para carvão comercial.

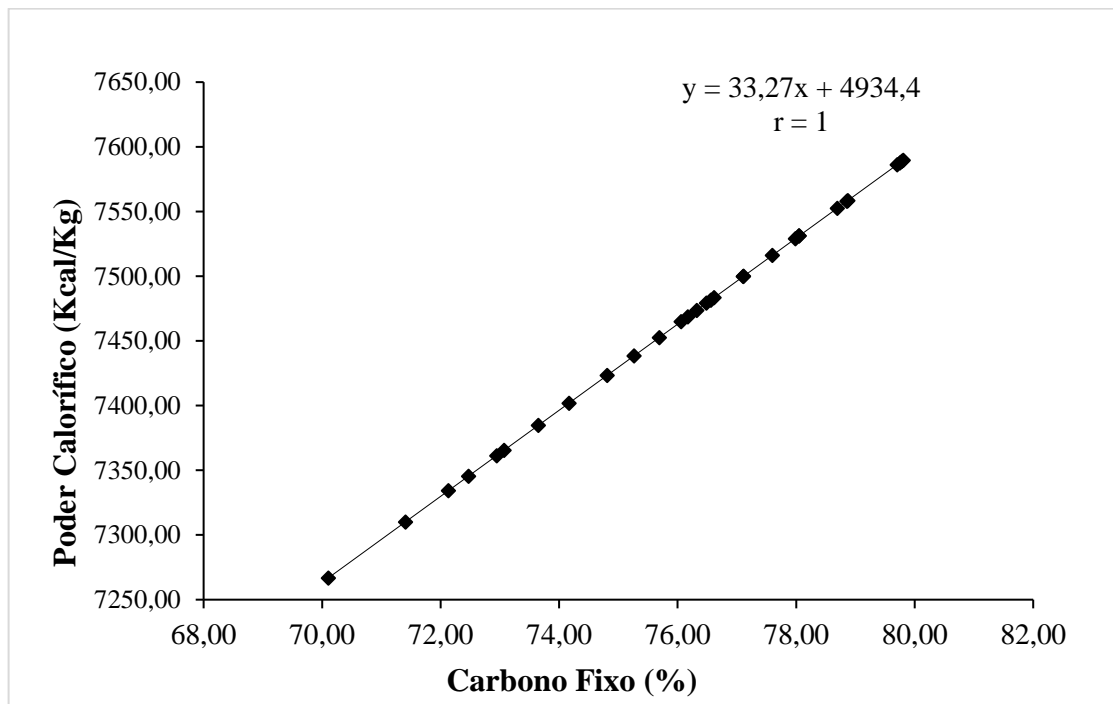


FIGURA 3. Correlação de Pearson (r) para as variáveis: Poder Calorífico (Kcal/Kg) e Carbono Fixo (%).

## CONCLUSÃO

Por meio dos resultados pode-se concluir que:

A densidade básica da madeira para as espécies *Xylopia aromática*, *Mouriri pusa* Gardner e *Diospyros hispida* DC atingiram os valores recomendados de carvão vegetal com boa qualidade, com valores médios de 0,637, 0,741 e 0,644 g/cm<sup>-3</sup> respectivamente, onde *Xylopia aromática* e *Diospyros hispida* DC classificam-se como média densidade e *Mouriri pusa* Gardner como alta densidade.

Dentre as espécies estudadas, *Diospyros hispida* DC apresentou valor de 0,593 g/cm<sup>-3</sup> para densidade aparente do carvão, sendo o maior, seguido da *Xylopia aromática* com 0,490 g/cm<sup>-3</sup> e *Mouriri pusa* Gardner com 0,467 g/cm<sup>-3</sup> atingindo valores necessários para uma boa qualidade de carvão.

Com o aumento da temperatura final de carbonização o rendimento gravimétrico total em carvão vegetal diminuiu para as espécies estudadas, exceto para a espécie *Diospyros hispida* DC em que ocorreu o aumento no rendimento total ao se aumentar a temperatura final.

O rendimento em gases condensáveis foi maior para marcha de 500°C para todas espécies, e os gases não condensáveis sofreram pouca influência da temperatura final das marchas de carbonização exceto para *Mouriri pusa* Gardner.

Os teores de materiais voláteis diminuíram de acordo com o aumento de temperatura.

O carbono fixo aumentou de acordo com o aumento da temperatura final para todas as espécies.

Os teores de cinzas encontrados para as espécies *Xylopia aromática* e *Diospyros hispida* DC encontraram-se dentro do recomendado pela literatura com valores médios de 0,502% e 0,728% respectivamente, propícios para geração de carvão. Mas a espécie *Mouriri pusa* Gardner apresentou valor de 1,855%, teor acima do valor aceito, não sendo recomendada para produção de carvão vegetal de boa qualidade.

O poder calorífico superior aumentou de acordo com o aumento da temperatura de carbonização final para todas as espécies avaliadas.

Dentre o carvão vegetal produzido e analisado das três espécies avaliadas, recomenda-se a utilização das espécies *Xylopia aromática* e *Diospyros hispida* DC como fonte de bioenergia e rejeita-se a espécie *Mouriri pusa* Gardner para a produção de carvão vegetal com boa qualidade, recomendando a temperatura final de carbonização de 550 °C.

As correlações de Pearson foram positivas para a DbxDa e para o CFxPC, apresentando uma tendência diretamente proporcional. Já, para o MVxCF a correlação foi negativa, ou seja, inversamente proporcional.

## REFERÊNCIAS

- ARANTES, MARINA DONÁRIA CHAVES. Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* ST Blake. 2009.
- ASSIS, Claudinéia Olímpia et al. Efeito da Aplicação de Nitrogênio na Produção e Qualidade da Madeira e Carvão Vegetal de um Híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. e00117914, 2018.
- BORLAUG, Norman E. Alimentando um mundo de 10 bilhões de pessoas: o milagre pela frente. **Planta de Biologia Celular e de Desenvolvimento In Vitro**, v. 38, n. 2, p. 221-228, 2002.
- BARCELLOS, DANIEL CAMARA. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. **Viçosa: Universidade Federal de Viçosa**, 2007.
- BRAND, Martha Andreia. **Energia de biomassa florestal**. Editora Interciência, 2010.
- BRASIL MOURÃO, Maria Aparecida et al. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, 2002.
- CARMO, J. S. Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado à siderurgia e metalurgia. 1988. 36p. **Monografia (Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa**, 1988.
- CARVALHO SOARES, Vássia et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, 2014.
- CARVALHO, Rosa Maria Miranda Armond; SOARES, Thelma Shirlen; VALVERDE, Sebastião Renato. Caracterização do setor florestal: uma abordagem comparativa com outros setores da economia. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 105-118, 2005.
- CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003.
- DE ARAGÃO PEDROSO, Luiz Lúcio et al. Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo/Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, p. 1980-1996, 2018.
- DE ARAÚJO, Ana Clara Caxito et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.
- DE OLIVEIRA, Elisabeth et al. Estrutura atômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.
- DE PAULA PROTÁSIO, Thiago et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273, 2011.

DA ROCHA SILVA, Alberto Jorge; ANDRADE, Laise de Holanda Cavalcanti. Etnobotânica nordestina: estudo comparativo da relação entre comunidades e vegetação na Zona do Litoral-Mata do Estado de Pernambuco, Brasil. **Acta bot. bras**, v. 19, n. 1, p. 45-60, 2005.

DOS SANTOS, Rosimeire Cavalcante et al. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

DUBOC, Eny et al. Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 2007.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE—Empresa. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Rio de Janeiro: EPE, 2015. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 15/04/2019.

EPE-EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (PDE 2024). **Brasília: EPE/MME**, 2015.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da extração vegetal e silvicultura 2005. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Agropecuária, 2006. v. 20. 47 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da extração vegetal e silvicultura 2015. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Agropecuária, 2015. v. 30, 48 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Statistics & Balances**. Paris: OECD/IEA, 2011.

JUIZO, Claudio Gumane Francisco; LIMA, Marcos Ramos; DA SILVA, Dimas Agostinho. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 3, p. 386-390, 2017.

LADEIRA, Lucas Abrantes et al. Determinação das propriedades físicas da madeira de pinus. sp./Determination of the physical properties of pinus. sp. wood. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 7, p. 2244-2251, 2018.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 2. Ed. Nova Odessa, SP: Editora Plantarum, 1998. 352 p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2009. v.3. 209 p.

MENDES, G. A. **Qualidade do carvão vegetal de cinco espécies nativas do bioma cerrado provenientes do município de Dueré, Tocantins**. 2018. 36 f. Artigo de graduação – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, TO, 2018.

MENDONÇA, RC de et al. Flora vascular do Cerrado. In: **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa-Cpac, 1998.



MOTA FCM. **Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de Eucalyptus sp. no Brasil** [dissertação]. Brasília: Universidade de Brasília; 2013.

NONATO, Carlos Tavares. Identificação de florestas destinadas à produção de bioenergia no Estado do Tocantins utilizando imagens de satélite e mineração de dados. 2014.

OLIVEIRA, Aylson Costa et al. 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, Aylson Costa et al. Viabilidade Económica Da Produção De Carvão Vegetal Em Dois Sistemas Produtivos. **Floresta**, v. 44, n. 1, p. 143-152, 2014.

OLIVEIRA, Adriana Ferla et al. Análise da qualidade do carvão para consumo doméstico de quatro Municípios do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 3, 2015.

OLIVEIRA FIGUEIREDO, Márcio Emanuel et al. Potencial da madeira de *pterogyne nitens* tul.(madeira-nova) para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal** (01039954), v. 28, n. 1, 2018.

OLIVEIRA, JB de et al. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. **Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC**, p. 60-73, 1982.

OLIVEIRA, Lucas Henrique et al. Aproveitamento de resíduos madeireiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017.

OLIVEIRA, Rudson Silva et al. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 62, 2019.

PAES, Juarez Benigno et al. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 3, n. 1, p. 10-12953/2177-6830. v03n01a01, 2012.

PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi et al. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

SILVA, C. Renata et al. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, e201801573, p. 1-10, 2018.

RIBEIRO, F. de A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF, Piracicaba**, v. 46, p. 76-85, 1993.

RODRIGUES, Pedro Lima et al. Participação popular na implantação da primeira concessão de floresta pública brasileira-Floresta Nacional do Jamari-RO (Flona Jamari). 2011.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda. Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal. 2017. 146 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciência e Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SÃO PAULO. Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003. **Diário Oficial do Estado de São**

**Paulo**, São Paulo, SP, 11 jul. 2003.

TORRES, C. M. et al. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. **Scientia Florestalis**, v. 44, n. 109, p. 137-148, 2016.

TRUGILHO, Paulo Fernando et al. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de Eucalyptus jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, 2015.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 2, p.179 – 184, 2013.

VALE, A. T.; SARMENTO, T. R.; ALMEIDA, A. N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília - DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

VALE A. T., Dias ÍS, Santana MAE. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal** 2010; 20(1): 137-145.

VEIGA, Tais Regina Lima Abreu et al. Propriedades mecânicas de amostras individualizadas da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla e de Corymbia citriodora. Mechanical properties of individual samples of wood and charcoal from Eucalyptus urophylla and Corymbia citriodora. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 117, p. 107-114, mar. 2018

VIDAURRE, Graziela Baptista et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (Schizolobium amazonicum). **Revista Árvore, Viçosa**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.