

SEBASTIANA RENATA VILELA AZEVEDO

**CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE  
CLONES DE *Eucalyptus* CULTIVADOS EM DIFERENTES  
ESPAÇAMENTOS NO SERTÃO PERNAMBUCANO**

RECIFE - PE  
2021

SEBASTIANA RENATA VILELA AZEVEDO

**CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE  
CLONES DE *Eucalyptus* CULTIVADOS EM DIFERENTES  
ESPAÇAMENTOS NO SERTÃO PERNAMBUCANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais.

**Orientador:** Prof. Dr. Rafael Leite Braz

RECIFE - PE  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A994c AZEVEDO, SEBASTIANA RENATA VILELA  
CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE CLONES DE *Eucalyptus*  
CULTIVADOS EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS NO SERTÃO PERNAMBUCANO / SEBASTIANA  
RENATA VILELA AZEVEDO. - 2021.  
80 f. : il.

Orientador: RAFAEL LEITE BRAZ.  
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Florestais, Recife, 2021.

1. Energia da biomassa. 2. Área útil. 3. Florestas energéticas. 4. Qualidade da madeira. 5. Caatinga . I.  
BRAZ, RAFAEL LEITE, orient. II. Título

CDD 634.9

---

**SEBASTIANA RENATA VILELA AZEVEDO**

**CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE  
CLONES DE *Eucalyptus* CULTIVADOS EM DIFERENTES  
ESPAÇAMENTOS NO SERTÃO PERNAMBUCANO**

**APROVADA em: 26 / 04 / 2021**

**Banca Examinadora:**

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Brunela Pollastrelli Rodrigues (Pós-Doutoral/UESB)

---

Prof. Dr. Marcelo Nogueira (DCFL/UFRPE)

**Orientador:**

---

Prof. Dr. Rafael Leite Braz (DCFL/UFRPE)

RECIFE - PE  
2021

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus que sempre direcionou a minha vida e Quem tem feito maravilhas por mim, e a minha mãe Maria da Glória Vilela Guimarães, mulher guerreira, que é a minha maior fonte de inspiração.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que foi minha maior força nos momentos de angústia e desespero. Sem ele, nada disso seria possível. Obrigada, Senhor, por colocar esperança, amor e fé no meu coração.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais que me proporcionou a chance de expandir os meus horizontes.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos durante o mestrado, a qual teve uma imensa colaboração para possibilitar o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores que acompanharam a minha jornada acadêmica de perto e deram muito apoio em sala de aula. Minha gratidão especial ao Prof. Dr. Rafael Leite Braz, meu orientador, pelas palavras de apoio e conselhos, e sobretudo pela pessoa e profissional que é. Obrigada por sua dedicação, e, principalmente, por ter acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo desses anos.

Agradeço imensamente à minha mãe e avós, pois não sei o que seria de mim sem vocês. São minhas heroínas e luz orientadora desde o dia em que nasci.

Aos meus irmãos (Aleciana, Ranielly e Adriel), tios e tias (Adriano, Cícero, Renato, Rinaldo, Nilton, Antenor, Antônio, Graciene, Danda, Damiana, Rosy e Bebeca), primos e primas (Janily, Anisia, Rafael, Aline, Alisson, Jesiedico, João Matheus) e afilhados (João Pedro, Paula e Etelvina) por todo o carinho, amor e força.

Meu eterno agradecimento a todos os meus amigos Felipe Freire, Paulo César, Rafael Duarte, Beatriz Ferreira, Marília Pinto, Julia Ohana, Sabrina Ribeiro, Brendo Frazão, Vinícius Staynne, Wesley Ferreira, Leandro Dias e Debora Almeida.

Agradeço a Lara Cristina e Marcelo, irmãos que Deus me concedeu durante essa jornada, e, em especial a Edmond Farhat por sua amizade e apoio incondicional. Obrigada por fazerem meus dias mais felizes.

À toda equipe do Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira, em especial a Igor Bitú, Israel Vicente, Irlan Campelo, Anderson Silva, Tony Cavalcantes. Vocês foram primordiais para realização dessa pesquisa.

Agradeço também aos professores Dr<sup>a</sup>. Brunela e Dr. Marcelo, membros da banca de qualificação e defesa do mestrado, pelos conselhos, sugestões e interesse em contribuir para o desenvolvimento desse projeto.

A todos vocês, o meu simples e sincero **OBRIGADA!**

AZEVEDO, SEBASTIANA RENATA VILELA. Caracterização da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes espaçamentos no sertão pernambucano. 2021. Orientador: Rafael Leite Braz.

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar a madeira e o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes espaçamentos no sertão do estado de Pernambuco para finalidades energéticas. Foram utilizados três clones de *Eucalyptus* spp. com 8 anos de idade submetidos a diferentes espaçamentos, provenientes de um plantio experimental localizado na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco na Chapada do Araripe, município de Araripina – PE. Foram amostradas seis árvores por espaçamento (2m x 1m, 3m x 2m e 4m x 2m) de cada clone (C41, C11 e C39), no qual, o fuste de cada árvore foi seccionado em seis posições longitudinais de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo de 5 cm) e na altura do DAP (1,30 m de altura acima do solo). Avaliou-se na madeira: dimensões das fibras; densidade básica e a granel; teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; poder calorífico superior, inferior e útil; e densidade energética. A madeira foi carbonizada e o carvão produzido foi avaliado quantitativamente (rendimento gravimétrico) e qualitativamente (densidade básica e a granel; teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo; poder calorífico superior, inferior e útil; e densidade energética). Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com 9 tratamentos e 6 repetições, totalizando 54 unidades amostrais. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-Knott e utilizou-se ainda a análise multivariada de componentes principais. Apenas os teores de materiais voláteis e carbono fixo da madeira, e o rendimento gravimétrico e o teor de cinzas no carvão vegetal não sofreram influência significativa dos tratamentos avaliados. Com base em todas as variáveis analisadas, os clones de *E. urophylla* (C41 e C39) e *E. brassiana* (C11) plantados no espaçamento 2 m x 1 m são os menos indicados para finalidades energéticas, e o clone C11 de *E. brassiana* instalado no espaçamento intermediário (3m x 2m) e o clone C39 de *E. urophylla* instalado nos espaçamentos 3m x 2m e 4m x 2m são os melhores materiais genéticos para essa finalidade.

**Palavras-chave:** Energia da biomassa, Área útil, Florestas energéticas, Qualidade da madeira, Caatinga.

AZEVEDO, SEBASTIANA RENATA VILELA. Characterization of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones grown in different planting spacing in the semi-arid region of Pernambuco State. 2021. Adviser: Rafael Leite Braz.

### ABSTRACT

The goal of this study was to characterize the wood and charcoal of *Eucalyptus* clones grown in different planting spacing in the semi-arid region of Pernambuco State, Northeastern Brazil, for energy purposes. To perform the study, three clones of *Eucalyptus* spp. were submitted to different spacing planting and collected when they were eight years old from an experimental planting located in the Experimental Station of the Agronomic Institute of Pernambuco located in Chapada do Araripe, municipality of Araripina, Pernambuco State. Six trees from each clone (C41, C11, and C39) were sampled from three different spacing (2m x 1m, 3m x 2m, and 4m x 2m). From each tree, disks were collected along the trunk in the following sections: 0% (basis), 1.30 m DBH, 25%, 50%, 75%, and 100% of the commercial height (minimum diameter of 5 cm). Once the wood samples were done, the wood and charcoal traits were evaluated. The wood properties evaluated were: the fiber dimensions, specific gravity, bulk density, moisture content, volatile matter, ash content, fixed carbon, calorific value, and energy density. For the product, charcoal, was evaluated: gravimetric yield, specific gravity, bulk density, moisture content, volatile matter, ash content, fixed carbon, calorific value, and energy density. A completely randomized design was used, considering nine treatments and six repetitions, totaling 54 sample units. The means of each treatment were compared by the Scott-Knott test, and the multivariate analysis of main components was also used. As a result, for wood traits analyzed, only the volatile matter and fixed carbon were not influenced by the spacing treatments. For charcoal analyses, it was also not observed the influence of the treatments on the gravimetric yield and ash content. Based on all variables analyzed, the *E. urophylla* (C41 and C39) and *E. brassiana* (C11) clones planted at 2 mx 1 m spacing were considered the poor properties for energy purposes, and the *E. brassiana* clone C11 at intermediate spacing (3m x 2m) and the *E. urophylla* clone C39 installed in the 3m x 2m and 4m x 2m spacings were considered the ones with the highest quality genetic materials for energy purposes.

**Keywords:** Biomass energy, Useful area, Energy forestry, Wood quality, Caatinga.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Biomassa florestal no setor energético .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Qualidade da madeira e do carvão vegetal.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Propriedades da madeira para produção do carvão vegetal.....</b>	<b>18</b>
2.3.1 Densidade básica .....	18
2.3.2 Teor de umidade .....	20
2.3.3 Dimensões das fibras .....	21
2.3.4 Composição Química Imediata.....	22
2.3.5 Poder Calorífico e Densidade Energética .....	23
<b>2.4 Propriedades do carvão vegetal.....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Densidade a Granel e Densidade Relativa Aparente .....	24
2.4.2 Rendimento gravimétrico .....	25
2.4.3 Química imediata.....	27
2.4.4 Poder Calorífico.....	27
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Origem do material.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Amostragem e preparo das amostras.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 Avaliações na madeira .....</b>	<b>32</b>
3.3.1 Dimensões das fibras .....	32
3.3.2 Densidade básica .....	34
3.3.3 Densidade a granel .....	34
3.3.4 Composição química imediata.....	34
3.3.5 Estimativa do Poder calorífico .....	37
3.3.6 Densidade energética.....	38
<b>3.4 Carbonizações e avaliação do carvão vegetal .....</b>	<b>38</b>
3.4.1 Rendimento gravimétrico.....	39
3.4.2 Densidade relativa aparente .....	39
3.4.3 Densidade a granel .....	39
3.4.3 Composição química imediata.....	40
3.4.4 Poder calorífico .....	40
3.4.5 Densidade energética.....	40
<b>3.5 Delineamento experimental e análise estatística .....</b>	<b>40</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 Propriedades da madeira.....</b>	<b>42</b>

4.1.1 Anatomia da madeira .....	42
4.1.2 Densidades da madeira.....	45
4.1.3 Química imediata da madeira .....	48
4.1.4 Poder calorífico e densidade energética.....	52
<b>4.2 Propriedades do carvão vegetal.....</b>	<b>55</b>
4.2.1 Rendimento gravimétrico e densidade.....	55
4.2.2 Química imediata do carvão vegetal.....	59
4.2.3 Poder calorífico e densidade energética.....	63
<b>4.3 Análise de Componentes Principais (PCA) .....</b>	<b>66</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plantio experimental localizado no Instituto Agronômico de Pernambuco, município de Araripina – PE.....	29
Figura 2 - Ilustração da amostragem longitudinal no fuste, destacando-se a retirada de discos em diferentes porcentagens da altura comercial (Hc) e na altura de 1,30 m do solo (DAP), e as análises que serão realizadas.....	30
Figura 3 - Etapas do processamento da madeira “ <i>in natura</i> ” para realização das análises.....	31
Figura 4 - Etapas do processamento da produção de carvão vegetal para realização das análises.....	32
Figura 5 - Etapas dos procedimentos adotados para realização da mensuração das fibras: transformação dos cavacos em palitos, e acondicionamento dos mesmos em tubo de ensaio (A – B); tubos de ensaios com amostras em banho-maria (C); lâminas provisórias preparadas.....	33
Figura 6 - Etapas dos procedimentos adotados para realização do teor de materiais voláteis: amostra no cadinho devidamente peneirada e pesada (A); cadinho com amostra na borda interna da mufla (B); mufla com o cadinho dentro (C); amostra ao termino da análise (D). .....	36
Figura 7 - Etapas dos procedimentos adotados para realização do teor de cinzas: amostra no cadinho devidamente peneirada e pesada (A); cadinhos com amostra dentro da mufla (B); amostra ao termino da análise (D). .....	37
Figura 8 - Produção de carvão vegetal através da carbonização da madeira “ <i>in natura</i> ”. Cavacos de madeira (A); mufla digital onde os mesmos foram carbonizados (B); carvão vegetal após a carbonização da madeira (C). .....	38
Figura 9 – Dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede) dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	44
Figura 10 - Densidade básica e densidade a granel dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	47
Figura 11 - Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	50
Figura 12 - Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e Densidade Energética (DE) dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	54
Figura 13 - Densidade Relativa Aparente (DRA) e Densidade a Granel (DG) do carvão vegetal obtido dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	58
Figura 14 – Teores de Materiais Voláteis (MV), Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF) do carvão vegetal obtido dos materiais genéticos de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	62
Figura 15 - Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e Densidade Energética (DE) do carvão vegetal obtido dos materiais genéticos de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11) em função da área útil (2 m <sup>2</sup> , 6 m <sup>2</sup> e 8 m <sup>2</sup> ). .....	65
Figura 16 - Contribuições das variáveis nas componentes principais da madeira do carvão vegetal.....	66

Figura 17 - Contribuições das variáveis nas componentes principais da madeira e do carvão vegetal.....	67
Figura 18 - Diagrama de ordenação dos tratamentos considerando os escores e autovetores das componentes principais 1, 2 e 3.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos a serem avaliados (3 clones x 3 espaçamentos). .....	29
Tabela 2 - Valores médios das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede) avaliados na madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	42
Tabela 3 - Valores médios de densidade básica e densidade a granel avaliados na madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	46
Tabela 4 - Valores médios de teores de umidade (TU), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) avaliados na madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	49
Tabela 5 - Valores médios de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (DE) avaliados na madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	52
Tabela 6 - Valores médios do rendimento gravimétrico (RG), densidade relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG) avaliados no carvão vegetal obtido de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	56
Tabela 7 - Valores médios dos teores de umidade (TU), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) avaliados no carvão vegetal obtidos de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	59
Tabela 8 - Valores médios de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (DE) avaliados no carvão vegetal de <i>Eucalyptus urophylla</i> (C41 e C39) e <i>Eucalyptus brassiana</i> (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.....	63

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da madeira para finalidades energéticas vem crescendo consideravelmente no Brasil e no mundo. Esse fator está ligado principalmente a necessidade de utilização de fontes de energias renováveis, pois além de inesgotáveis, estas oferecem inúmeros benefícios ambientais quando comparados aos combustíveis fósseis, como por exemplo: redução na emissão de gases do efeito estufa, em virtude da captação de CO<sub>2</sub> pelas florestas e diminuição no teor de enxofre produzido, uma vez que a madeira possui esse elemento em pouca quantidade.

As florestas plantadas para fins energéticos são uma alternativa para suprir a alta demanda de biomassa madeireira requerida para produção de energia. Estes plantios tem por objetivo reduzir a pressão sobre as florestas nativas, como também possibilitar a utilização de áreas degradadas. O gênero *Eucalyptus* é o mais utilizado em florestas energéticas, onde de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores - IBA (2020) de toda madeira plantada em 2019 cerca de 77% foi proveniente deste gênero.

No estado de Pernambuco estão concentradas aproximadamente 21% das reservas de gipsita do Brasil, no qual, as jazidas localizadas no Polo Gesseiro do Araripe são responsáveis por 81% da produção nacional de gesso. Para o processo produtivo a gipsita deve passar pela calcinação que demanda muita energia e que na grande maioria é proveniente das madeiras suprimidas da vegetação local (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, 2006; BALTAR; BASTOS; LUZ, 2008; SILVA, 2008-2009).

A exploração dos recursos florestais da Caatinga vem aumentando progressivamente sua degradação, pois as indústrias exigem uma elevada demanda de lenha para produção do gesso e os planos de manejo não são suficientes para suprir essa necessidade, desta forma refletindo na utilização de lenha ilegal (SILVA, 2008-2009; SILVA et al., 2013).

Espécies e/ou materiais genéticos de *Eucalyptus* constitui-se como uma excelente opção para plantios energéticos por apresentarem crescimento rápido, boas propriedades energéticas e adaptabilidade a condições edafoclimáticas distintas. Sem contar que árvores suprimidas em áreas nativas apresentam alta heterogeneidade da matéria-prima, fator não desejável na indústria madeireira, especialmente durante a queima direta da madeira e/ou para produção do carvão vegetal.

Inúmeros são os fatores que podem influenciar na produção e na qualidade da madeira para fins energéticos. Entre eles o espaçamento de plantio tem sido um instrumento importante para a silvicultura brasileira e mundial, uma vez que, a necessidade de informações acerca da influência do espaçamento nas propriedades finais será útil no planejamento florestal e no processo de automatização da indústria gesseira.

Portanto, a área útil influencia diretamente na qualidade da madeira e do carvão vegetal. E cada espécie, clone ou variedade responde de maneira particular as condições de crescimento impostas pelo espaçamento de plantio, acarretando variações nas propriedades da madeira e conseqüentemente no carvão vegetal.

Diante da franca expansão dos plantios de eucalipto, da necessidade de maior produção de biomassa florestal por hectare e da lacuna de conhecimento sobre as propriedades da madeira produzida para fins energéticos, plantios experimentais com eucalipto vêm sendo implantados no sertão pernambucano.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi caracterizar a madeira e o carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes espaçamentos no sertão do estado do Pernambuco para finalidades energéticas.

Os objetivos específicos foram: a) Determinar as propriedades anatômicas (dimensões das fibras), físicas (densidade básica e a granel) e químicas (composição imediata) madeira dos clones de *Eucalyptus*; b) Determinar as propriedades físicas (densidade relativa aparente) e químicas (composição imediata) do carvão vegetal e o rendimento gravimétrico em carvão; c) Estimar o poder calorífico e a densidade energética da madeira e do carvão vegetal; d) Analisar a influência da área útil nos clones de *Eucalyptus*; e) Obter a correlação entre as características da madeira e do carvão vegetal; f) Indicar o material genético com maior potencial energético dentre os clones de eucaliptos estudados.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Biomassa florestal no setor energético**

A biomassa florestal mostra-se como uma das principais fontes energéticas desde os primórdios da humanidade, no qual, era utilizada para atividades como cocção de alimentos, aquecimento e iluminação de ambientes. Ao passar do tempo outros usos foram acrescentados, como por exemplo: abastecimento de caldeiras das indústrias e trens a vapor.

Com a descoberta e ganho de relevância do petróleo, houve redução na utilização da madeira no setor energético, mas atualmente volta a ser priorizada como fonte energética alternativa aos combustíveis fósseis, especialmente pelo fato de ser renovável, apresentar baixa emissão de enxofre, e por absorver e fixar carbono durante o crescimento das florestas, favorecendo o balanço de carbono.

Diversos países vêm adicionando a biomassa florestal madeireira em sua matriz energética, por ser um recurso de extrema importância para a sociedade e muitos setores. No Brasil, o uso da madeira tem grande importância, onde de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (2020) das 180 principais unidades produtoras de ferro-gusa, ferro liga e aço, a maioria utiliza o carvão vegetal em sua produção.

Na região Nordeste do Brasil, está localizado o mais importante depósito de gipsita do país, a Chapada do Araripe, que se situa entre os estados de Pernambuco, Ceará e Piauí, sendo a indústria de calcinação do gesso uma grande consumidora de energia, a qual é obtida principalmente a partir da lenha proveniente do bioma Caatinga (SILVA, 2013). Desta forma é recomendável que se estabeleça um estoque regular de lenha para o abastecimento dos fornos do setor, tanto de espécies nativas, quanto de espécies de rápido crescimento, como o eucalipto (ALBUQUERQUE, 2002).

Em 2006, aproximadamente 73% de todo o consumo energético usado para produção de gesso era proveniente da biomassa florestal (lenha) (ATECEL, 2006). Essa necessidade alta e constante de lenha para o processo de calcinação da gipsita apresenta-se como o fator responsável pelo desmatamento dos recursos florestais do bioma, pois os planos de manejo não são suficientes



para suprir a demanda e conseqüentemente há utilização de lenha ilegal na região.

Portanto, o uso de espécies de rápido crescimento em plantios energéticos mostram-se como uma alternativa viável para reduzir a pressão da indústria do gesso sobre áreas naturais, produzir matéria-prima de melhor qualidade e ainda baratear o custo com o transporte (aumentando a disponibilidade em distâncias mais curtas). Segundo Silva (2013) devido as condições edafoclimáticas da região a cultura do eucalipto é apontada como uma das mais promissora, principalmente, pelo seu diversificado aproveitamento.

## **2.2 Qualidade da madeira e do carvão vegetal**

Os inúmeros produtos provenientes da madeira conseguem atender aos mais distintos usos e é está uma das vantagens desse recurso natural renovável. Isto só é possível graças a heterogeneidade, verificada não apenas entre e dentro espécies madeireiras, mas também na madeira de cada indivíduo arbóreo. Apesar dessa variabilidade permitir usos múltiplos da madeira, quando presente em nível individual ou dentro da espécie, causa uma série de transtornos para a indústria de transformação e processamento (SEVERO; CALONEGO; SANSÍGOLO, 2006; NEVES, 2012; ARRIEL, 2017).

Para determinar a qualidade da matéria-prima lenhosa e assim permitir formas de utilização corretas, as propriedades tecnológicas precisam ser estudadas. Barrichelo (1992) define qualidade como condição ou atributo que distingue um determinado produto por melhor adequar seu uso. O autor ainda comenta que os principais parâmetros de qualidade da madeira são os tecnológicos (físicos, químicos, mecânicos e anatômicos) e os não tecnológicos (espécie, procedência, idade, taxa de crescimento, forma, conicidade da árvore, etc).

Dessa maneira, para produzir carvão vegetal com alta qualidade e homogeneidade, é necessário qualificar a madeira a ser utilizada no processo de carbonização, uma vez que as propriedades da matéria-prima estão diretamente ligadas a qualidade do produto final. Das características físicas e químicas da madeira, a densidade básica e teor de lignina são consideradas, respectivamente, as que mais influenciam sobre a qualidade do carvão vegetal

(TRUGILHO; SILVA, 2001; OLIVEIRA et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2011; PEREIRA et al., 2012; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

Com o aumento do consumo de carvão vegetal o mercado está cada vez mais exigente no que diz respeito à qualidade do carvão vegetal produzido, devido o mesmo influenciar diretamente no produto final e nos custos do processo produtivo, sendo importante não apenas ter um padrão de qualidade na matéria prima usada (madeira) como também no controle total do processo (PROTÁSIO et al., 2011).

Inúmeros são os fatores que podem influenciar na produção e na qualidade da madeira para fins energéticos, como por exemplo: densidade, dimensões das fibras, teor de umidade, espécie/material genético, idade, madeira juvenil, inclinação da grã e madeira de reação (fatores inerentes a espécie); sítio de crescimento, localização geografia, espaçamento, desbaste, poda, adubação, irrigação e drenagem (fatores inerentes ao meio); entre outros. Tornando-se importante o estudo dessas propriedades e técnicas para melhor aplicação das plantações florestais.

As principais características da madeira "*in natura*" e do carvão vegetal que devem ser levadas em consideração quando seu uso for destinado para finalidades energéticas, serão apresentadas a seguir.

## **2.3 Propriedades da madeira para produção do carvão vegetal**

### **2.3.1 Densidade básica**

Densidade básica da madeira é uma propriedade física definida como a relação entre a massa seca da madeira por seu volume saturado (GRUNDELIUS, 1990; ZOBEL, 2012). Essa propriedade é um índice de qualidade muito importante, pois têm relação direta com as outras propriedades da madeira, é de fácil obtenção e custo relativamente baixo (CASTELO, 2007; BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010).

A densidade tem influência direta da anatomia da madeira e seus valores podem variar de acordo com a proporção dos vasos e espessuras das paredes celulares das fibras. Com relação as fibras, maiores valores de espessura de parede celular ou maiores proporções das fibras em relação à proporção de

vasos podem ocasionar acréscimos nos valores de densidade básica. Em contrapartida, o inverso pode ocasionar a redução desses valores (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

De acordo com Pereira et al. (2000) o uso de madeiras mais densas, para fins energéticos, apresenta algumas vantagens como: menor área de estocagem e manuseio da madeira; maior rendimento energético no transporte; maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira; maior rendimento dos gaseificadores da madeira para produção de gasogênio ou gás de síntese do metanol; maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida.

Para produção de carvão vegetal é desejável madeiras com maior densidade básica, visto que, o carvão apresentará maior densidade relativa aparente. Essa característica proporciona ao carvão maior capacidade calorífica por unidade de volume e maior resistência mecânica (NEVES, 2012; SEREGHETTI et al., 2015).

Tomazello Filho (1985) ao estudar espécies de *Eucalyptus* aos 10 anos de idade verificou variação radial na densidade básica, na qual, há aumento no valor da densidade no sentido medula-casca. Esse comportamento é observado na maioria das espécies do gênero *Eucalyptus*, como pode ser verificado nos trabalhos de Lazaretti et al. (S.D), Oliveira e Silva (2003), Silva et al. (2004), Trevisan et al. (2008) e Melo et al. (2016).

Sette Junior et al. (2012) estudando diferentes idades de *Eucalyptus grandis* concluíram que a idade influencia na densidade básica média da madeira, onde há o aumento da densidade com o avanço da idade. Os autores comentam que isto ocorre em função das alterações do meristema cambial e das exigências mecânico-fisiológicas resultantes do processo de desenvolvimento das árvores. Esse resultado é encontrado na literatura por inúmeros autores, como Trugilho, Lima e Mendes (1996), Silva et al. (2004) e Rocha (2011).

Em alguns estudos com árvores do gênero de *Eucalyptus*, observa-se maiores valores médios de densidade básica em espaçamentos mais amplos, à exemplo, os trabalhos de Moulin et al. (2017) e Rocha (2011). Enquanto Sereghetti et al. (2015) não verificaram influência do espaçamento na densidade, embora tenham observado tendência de menores espaçamentos apresentarem maiores valores de densidade. Goulart et al. (2003) verificaram (com exceção

dos menores espaçamentos) redução da densidade básica com o aumento do espaçamento.

### 2.3.2 Teor de umidade

A água participa da constituição química e preenche os espaços vazios celulares e intracelulares do lenho, sendo responsável por grande parte do peso total de uma árvore (CASTELO, 2007). Como a quantidade de água presente na madeira influencia suas propriedades é essencial, para quase todo o mercado consumidor de madeira, conhecer e controlar seu teor de umidade, para assim obter economia nos processos e produtos de melhor qualidade (DONATO et al., 2015).

Teor de umidade (TU) é uma propriedade física que varia muito dentro da própria árvore e expressa a quantidade de água presente na biomassa em relação ao seu peso total. Essa variável é um fator a ser levado em consideração quando se trabalha com madeira para finalidades energéticas. E o método mais utilizado para determiná-la é conhecido como método gravimétrico.

Neves (2012) comenta que é pertinente a madeira apresentar baixos teores de umidade, com o propósito de elevar a poder calorífico do combustível e reduzir custos com manejo e transporte. De acordo com Valente (1986) citado por Donato (2013) para produção de um carvão vegetal de boa qualidade, a madeira a ser carbonizada deve apresentar umidade, na base seca, entre 20% e 30%, pois madeira úmida produz um carvão friável e quebradiço.

Canal et al. (2016) não recomendam processos de carbonização com teores de umidade, na base seca, acima de 30%, pois além de reduzir o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e aumentar a produção de gases condensáveis, provoca elevação na emissão de gases de efeito estufa. Os mesmos autores estudando madeira de *Eucalyptus* spp., verificaram incrementos na emissão dos gases monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e metano com aumento no TU até 60%.

### 2.3.3 Dimensões das fibras

Além de auxiliar na identificação das espécies, os estudos das características anatômicas possibilitam o melhor conhecimento da madeira e utilização de maneira mais precisa e correta (SILVA, 2002; ARRIEL, 2017). Dentre os elementos anatômicos é importante avaliar principalmente as dimensões das fibras, pois a maior parte do lenho, na maioria das espécies, são compostas pelas mesmas (PEREIRA et al., 2016).

Segundo Arriel (2017) muitos autores ao analisar os parâmetros anatômicos em madeira de *Eucalyptus* levam em consideração: posições de amostragem no caule, idade das plantas e o local onde ocorrem. Neste contexto, Silva et al. (2007a) ao avaliarem a influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis*, verificaram correlação positiva da idade e a posição no sentido medula-casca com o comprimento e espessura da parede das fibras, e negativa com a largura e diâmetro das fibras.

Este aumento crescente no sentido radial das dimensões de comprimento e espessura das fibras é verificado na literatura por diversos autores, tais como: Tomazello Filho (1985), Tomazello Filho (1987), Rocha, Florsheim e Couto (2004), Florsheim et al. (2009), Sette Junior et al. (2012), Carrillo et al. (2015) e Trevisan et al. (2017).

Na área de geração de energia, seja utilizando a madeira “*in natura*” ou o carvão vegetal, é essencial estudar os elementos anatômicos, especialmente devido a relação deles com a densidade básica. Pereira et al. (2016) verificaram em seus estudos correlação significativa entre os parâmetros anatômicos e a densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal, no qual recomendaram para finalidades energéticas, madeiras ricas em fibras de alta fração parede.

Takarada (2015) ao analisar a correlação entre as características anatômicas da madeira e do carvão vegetal em *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora* aos 6 anos de idade, concluiu que a densidade relativa aparente do carvão apresentou correlação negativa com o diâmetro do lume e a largura das fibras. Porém, o autor não verificou correlação significativa entre as dimensões das fibras com o rendimento gravimétrico, a composição química imediata e o poder calorífico superior.

Pereira et al (2016) verificaram em seu trabalho que a maioria das características estruturais não foram afetadas pelo processo de carbonização, tornando a análise anatômica como um auxílio para identificação da madeira que lhe deu origem. Diante dessa observação, verifica-se a importância de estudar as características anatômicas da madeira como subsídio para fiscalização ambiental.

#### 2.3.4 Composição Química Imediata

Para utilização da madeira como fonte energética devem ser analisados os teores de carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e cinzas (CZ), pois estes apresentam correlação direta com seu poder calorífico. De acordo com Silva et al. (2015), através do conhecimento do percentual da química imediata pode-se estimar o grau de combustão da madeira, no qual, materiais com altos índices de carbono fixo (baixo teor de voláteis) queimarão mais lentamente. Portanto, um maior teor de CF acarreta em um maior tempo de residência no aparelho de queima.

As cinzas é o material residual da combustão, composto por substâncias inorgânicas, e geralmente presentes nas espécies de *Eucalyptus* em baixos teores (menores que 1%). Materiais voláteis correspondem a parte do combustível que evapora quando o mesmo é submetido a elevadas temperaturas, com faixa aceitável para a biomassa entre 75% e 85%. O carbono fixo é a fração de carvão que permanece na amostra após a combustão e o seu teor depende principalmente, da quantidade de materiais voláteis, uma vez que, o teor de cinzas para madeiras de *Eucalyptus* são baixos (BRITO; BARRICHELO, 1978; CHAVES et al., 2013).

Nones et al. (2015) e Silva et al. (2015) ao avaliarem material madeireiro de *Eucalyptus benthamii* aos 5 anos de idade plantados no espaçamento 2,5 m x 2 m, obtiveram valores médios para materiais voláteis de 81,47% e 84,18%, carbono fixo de 18,28% e 15,78%, e cinzas de 0,25% e 0,24%, respectivamente. Silva et al. (2015) também verificaram em seu trabalho uma correlação negativa de -0,993 entre as variáveis carbono fixo e materiais voláteis, confirmando que elas são inversamente proporcionais.

Brito e Barrichelo (1978) ao avaliarem clones de *Eucalyptus* com idade entre 4 e 5 anos, obtiveram valores para carbono fixo de 9,6% a 24,3%, materiais voláteis de 74,1% a 89,9% e cinzas 0,3% a 0,53%. Arriel (2017) trabalhando com 39 clones de *Eucalyptus* com quase 7 anos de idade instalados em espaçamento 3 m x 3 m, verificaram teores de materiais voláteis e carbono fixo dentro do recomendado pela literatura (83,61% e 16,25%, respectivamente).

### 2.3.5 Poder Calorífico e Densidade Energética

Poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia por unidade de massa (ou volume) liberado na combustão de um determinado material (NEVES, 2012). Então, o poder calorífico também é uma característica a ser considerada quando se utiliza madeira para fins energéticos, seja ela “*in natura*” ou na forma de carvão vegetal. De acordo com Rocha e Klitzke (1998) e Santos (2010) existem três formas de considerar o poder calorífico: poder calorífico superior (PCS), podendo este ser determinado em base seca (material combustível a 0% de umidade) ou em base úmida (material combustível a um determinado teor de umidade); poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU).

O PCS é a energia total da madeira, no qual é considerado a energia liberada na forma de calor, como também a energia necessária para evaporar a água da umidade (quando determinado na base úmida) e água formada durante a combustão do hidrogênio de constituição numa reação de oxidação. O PCI é a energia liberada na forma de calor, desconsiderando o calor necessário para evaporar a água. No caso da madeira o valor do PCS sempre será superior ao PCI, porém em casos de combustíveis sem umidade e onde não há formação de água durante a combustão, seu PCI será igual ao PCS (ROCHA; KLITZKE, 1998). Já o PCU é a quantidade de calor útil liberado na combustão, utilizado para troca térmica e geração de vapor.

De acordo com Rocha e Klitzke (1998) o poder calorífico da madeira na base seca gira em torno de 4.500 Kcal kg<sup>-1</sup>. Soares et al. (2015) avaliando madeiras de *Eucalyptus* verificaram independentemente da idade, poder calorífico superior com valores entre 4.200 e 4.800 Kcal kg<sup>-1</sup>. Resultados semelhantes também podem ser verificados nos trabalhos de Soares et al.

(2014), Dias Júnior et al. (2015) e Castro et al. (2016) ao analisarem materiais genéticos de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade.

Algumas propriedades da madeira apresentam correlação com o poder calorífico, como por exemplo a quantidade de carbono presente no material e teor de umidade. Em muitos trabalhos com o gênero *Eucalyptus* (NEVES et al. 2011; REIS et al. 2012; CASTRO et al. 2016; BRUN et al. 2018) são constatadas correlações positivas entre o poder calorífico e o teor de carbono fixo. Além disso, o poder calorífico também é influenciado por outros fatores, como o material genético/espécie utilizado, tempo de estocagem da madeira (BRAND, 2010) e o espaçamento inicial de plantio (ROCHA et al., 2016).

Segundo Barros et al. (2019) a densidade energética demonstra a quantidade de calor em um volume definido na biomassa, estimando o desempenho do material como combustível e avaliando o rendimento da madeira para processos siderúrgicos ou para queima, influenciado por propriedades físico-químicas da madeira, como a densidade básica, teor de lignina, extrativos e cinzas.

A densidade energética avalia a quantidade de energia armazenada em um determinado volume de material. No caso do carvão vegetal, os valores de densidade energética são superiores aos da biomassa em função do aumento do poder calorífico no material pirolisado, apesar da redução da densidade nos carvões (COUTO et al., 2004).

Além desta correlação, a densidade da madeira também afeta a quantidade de energia produzida, ocorrendo o aumento da densidade energética proporcionalmente a densidade básica da madeira de eucalipto, assim, madeiras mais densas apresentam maior quantidade de energia disponível (JESUS et al., 2017).

## **2.4 Propriedades do carvão vegetal**

### **2.4.1 Densidade a Granel e Densidade Relativa Aparente**

A densidade expressa a quantidade de massa ocupada em uma unidade de volume. E no que diz respeito ao carvão vegetal, essa propriedade é



influenciada diretamente tanto pela origem da madeira quanto pelo processo de produção, o que torna um importante índice de qualidade para fins energéticos.

De acordo com a circular técnica do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (BRITO et al., 1982) existem três métodos para se expressar a densidade do carvão vegetal e entre eles está a densidade a granel e a densidade relativa aparente (DRA). A densidade a granel considera o volume dos vazios existentes entre os pedaços de carvão e a DRA exclui esses espaços e considera o volume da porosidade interna. Quando desconta-se a porosidade interna é denominada de densidade verdadeira do carvão vegetal (BRITO et al., 1982; FROEHLICH; MOURA, 2017).

Silva et al. (2007b) relatam que a densidade a granel está relacionada diretamente com a granulometria, e segundo Brito et al. (1982) essa propriedade tem grande importância em termos práticos, especialmente quando se trabalha com carvão vegetal para uso em siderurgia, pois ela determina o espaço útil a ser ocupado pelo redutor no alto forno.

Quando se trabalha com carvão vegetal para uso energético sua densidade aparente deve ser a mais alta possível. De acordo com Andrade, Tomazello Filho e Moutinho (2018) o carvão para indústria siderúrgica deve possuir densidade maior que  $0,300 \text{ g cm}^{-3}$ , além de alta resistência mecânica e baixo teor de umidade.

Trugilho et al. (2005), Pereira et al. (2012), Reis et al. (2012), Castro et al. (2016) e Andrade, Tomazello Filho e Moutinho (2018) ao avaliarem clones de *Eucalyptus* com idades maiores que 5,5 anos verificaram valores para a densidade relativa aparente superiores à  $0,300 \text{ g cm}^{-3}$  ( $0,31 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,36$  a  $0,41 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,306$  a  $0,325 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,322$  a  $0,355 \text{ g cm}^{-3}$  e  $0,321$  a  $0,371 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente).

#### 2.4.2 Rendimento gravimétrico

Ao se trabalhar com produção energética é desejável a obtenção de um maior rendimento gravimétrico (RG). Essa propriedade expressa a quantidade de massa em carvão vegetal gerado a partir da madeira após a carbonização e é influenciada não apenas pela matéria prima, mais também pelo processo de carbonização.

Em relação a matéria prima, Souza (2018) comenta sobre a importância da utilização de madeiras com boas propriedades para produção de carvão vegetal, pois irão proporcionar maiores rendimentos e melhorar as propriedades do mesmo. Dentre as propriedades da madeira o teor de lignina é o que mais contribui para o RG, e isto ocorre devido a sua alta resistência a degradação térmica, já explicada anteriormente (BRITO; BARRICHELO, 1997).

Além do teor de lignina deve-se avaliar também a relação siringil/guaiacil, uma vez que são preferíveis madeiras com maiores unidades de guaiacila (SOARES et al., 2014). De acordo com Neves (2012) a seleção de materiais madeireiros com a menor relação S/G é uma das tendências do setor de produção de carvão vegetal para aumentar o rendimento gravimétrico e, conseqüentemente, diminuir os custos com a matéria prima.

No processo de carbonização, a taxa de aquecimento (aumento da temperatura ao longo do tempo) e a temperatura final de carbonização influenciam o RG. No qual, segundo relatos da literatura, quanto menor a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento, maior o rendimento gravimétrico. Oliveira et al. (2010) ao avaliarem o efeito de diferentes marchas de carbonização em clones de *Eucalyptus*, verificaram decréscimo no rendimento em carvão na medida em que se aumentou a temperatura final de carbonização. Comportamento este também observado por Vieira et al. (2013) e Siebeneichler et al. (2017).

Ao estudarem a influência de diferentes processos de carbonização na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* oriundos de espaçamento 3 m x 2 m, Azevedo et al. (2013) concluíram que a temperatura de carbonização afeta significativamente o rendimento gravimétrico, sendo o maior rendimento verificado na temperatura final de 450°C. Assim como Oliveira et al. (2010) que observaram maior rendimento (32,11%) também nesta mesma temperatura.

Trugilho et al. (2005), Reis et al. (2012), Soares et al. (2014) e Castro et al. (2016) ao avaliarem clones de *Eucalyptus* com 7 anos de idade, todos utilizando a temperatura final de carbonização de 450°C em diferentes taxas de aquecimento (1,67°C min<sup>-1</sup>, 1,56°C min<sup>-1</sup>, 1,67°C min<sup>-1</sup> e 1,56°C min<sup>-1</sup>, respectivamente) obtiveram rendimento em carvão vegetal superior à 25% (36,49% a 38,56%, 35,18% a 37,07%, 28,39% e 33,53% a 34,96%, respectivamente).

### 2.4.3 Química imediata

Após a transformação da madeira em carvão vegetal, através do processo de carbonização, também é indicado avaliar os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, uma vez que os mesmos apresentam correlação com o poder calorífico do carvão, já explicado anteriormente.

É desejável um carvão vegetal com baixo teor de cinzas (< 1%), pois além de não contribuírem com o poder calorífico, provocam desgaste no alto forno e quando utilizado para produção do ferro-gusa compromete sua qualidade (SANTOS, 2010). De acordo com a literatura, carvão com alto teor de carbono fixo (> 75%) e baixo teor de voláteis (< 25%), é preferível.

O comportamento inverso não é verificado apenas entre os teores de materiais voláteis e carbono fixo, como também entre o carbono fixo e o rendimento gravimétrico, ou seja, quanto maior for o rendimento em carvão vegetal menor será o teor de carbono fixo. Esse fato pode ser observado no trabalho de Soares et al. (2014), no qual, ao avaliarem a correlação entre as propriedades do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* verificaram correlações negativas significativas entre o CF e o RG (-0,94) e o CF e MV (-0,99). Ainda neste trabalho, os autores constataram correlação positiva de 0,95 entre o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis.

### 2.4.4 Poder Calorífico

O poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou volume) liberado durante a combustão de determinado material, tendo em muitos casos correlação com o teor de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas, espécie e espaçamento utilizado.

Protásio et al. (2014) verificou valores entre 7621 kcal kg<sup>-1</sup> e 8017 kcal kg<sup>-1</sup> para o poder calorífico superior e 7462 kcal kg<sup>-1</sup> a 7855 kcal kg<sup>-1</sup> para o poder calorífico inferior, ao analisarem dois diferentes clones de *Eucalyptus* spp. aos 46 e 58 meses de idade provenientes de um plantio em MG. Os mesmos concluíram ainda no estudo que a idade causa acréscimo ao PCI, porém, não

tem influência ao PCS e que o efeito de clone não tem influência sobre o PCS e PCI.

Para o carvão de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* o PCS verificado foi de 7803 kcal kg<sup>-1</sup> para plantio no oeste do Pará com idade aproximada de 9 anos (CARMONA et al., 2020) e de 7062 kcal kg<sup>-1</sup>, 7215 kcal kg<sup>-1</sup> e 7193 kcal kg<sup>-1</sup> aos 3, 5 e 7 anos respectivamente, no estado de São Paulo (SOARES et al., 2015). Já para o carvão proveniente de *Eucalyptus benthamii*, plantados em Santa Catarina, o poder calorífico superior foi de 6928 kcal kg<sup>-1</sup> para 5 anos e 6676 kcal kg<sup>-1</sup> para 13 anos (NONES et al., 2015).

Reis et al (2012) ao avaliarem clones de *Eucalyptus urophylla* de 7 anos de idade e espaçamento 3m x 3m, localizados em 3 diferentes municípios de Minas Gerais, encontraram um poder calorífico superior variando de 6997 kcal kg<sup>-1</sup> a 7297 kcal kg<sup>-1</sup>, determinando que, devido a homogeneidade dos valores para PCS do carvão vegetal, se pode afirmar que os diferentes locais de cultivo não afetam essa propriedade energética.

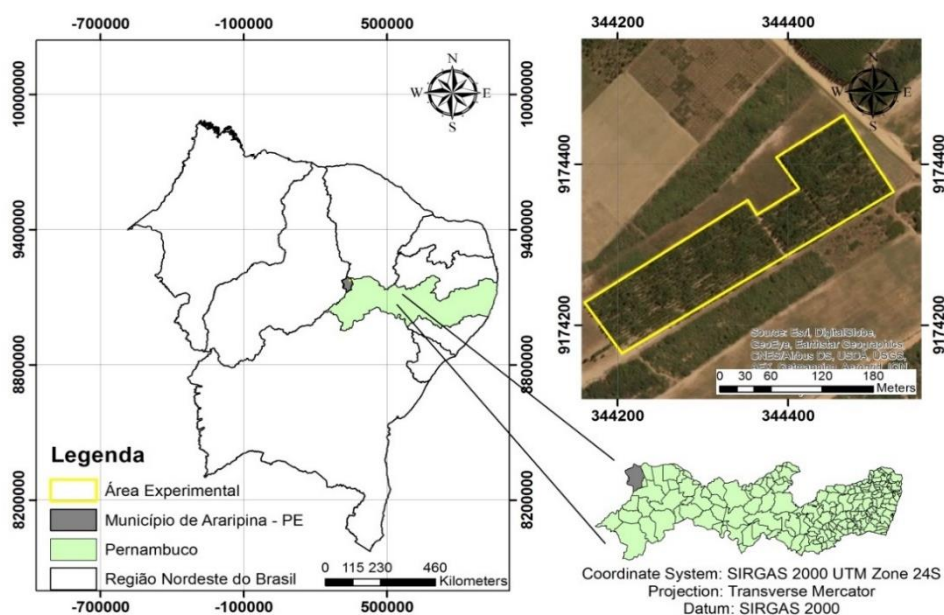
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Origem do material

Foram utilizados três clones de *Eucalyptus* spp. com 8 anos de idade submetidos a diferentes espaçamentos (Tabela 1), provenientes de um plantio experimental localizado na Estação Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) na Chapada do Araripe, município de Araripina – PE (Figura 1).

**Tabela 1** - Descrição dos tratamentos a serem avaliados (3 clones x 3 espaçamentos).

Trat.	Clone	Descrição	Espaçamento	Altura total (m)	DAP (cm)
1	C41	<i>Eucalyptus urophylla</i>	2m x 1m	12,09	7,40
2	C41	<i>Eucalyptus urophylla</i>	3m x 2m	11,29	7,97
3	C41	<i>Eucalyptus urophylla</i>	4m x 2m	12,80	5,37
4	C11	<i>Eucalyptus brassiana</i>	2m x 1m	12,35	6,22
5	C11	<i>Eucalyptus brassiana</i>	3m x 2m	10,66	8,60
6	C11	<i>Eucalyptus brassiana</i>	4m x 2m	13,69	7,32
7	C39	<i>Eucalyptus urophylla</i>	2m x 1m	12,59	6,77
8	C39	<i>Eucalyptus urophylla</i>	3m x 2m	12,39	8,90
9	C39	<i>Eucalyptus urophylla</i>	4m x 2m	12,90	9,10



**Figura 1** - Plantio experimental localizado no Instituto Agrônomo de Pernambuco, município de Araripina – PE.

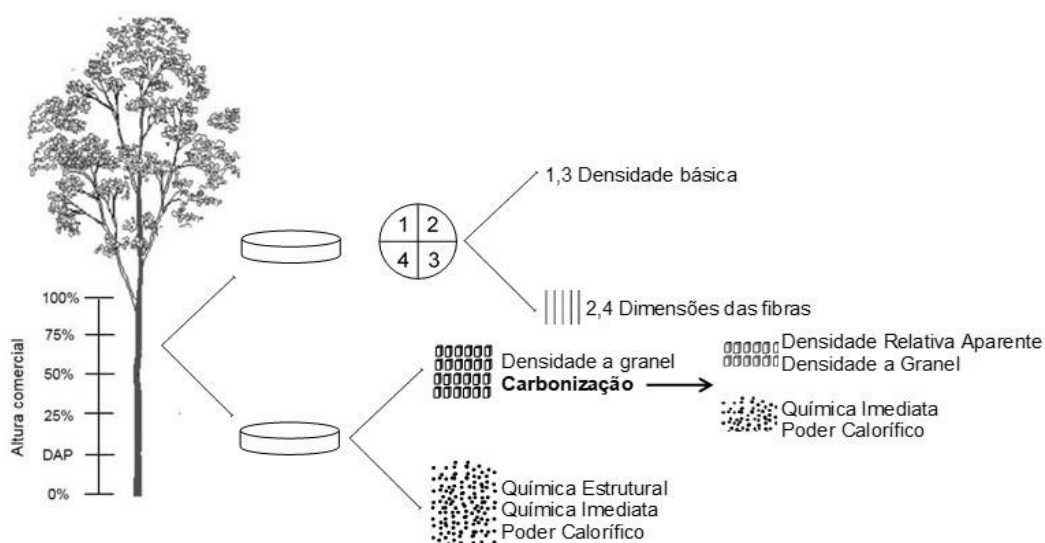
Fonte: Araújo (2019).

O município de Araripina está localizado na mesorregião Sertão e na Microrregião Araripina e representa 1,93% do Estado de Pernambuco. Sua sede encontra-se a 683,2 km da capital, tem uma altitude de aproximadamente 622 metros e coordenadas geográficas de 07°34'34" S e 40°29'54" W. O clima da região é classificado por Koppen como do tipo BSh (semiárido quente e seco), apresentando temperatura média anual de 24° C e pluviosidade média anual de 719 mm com chuvas concentradas entre os meses de dezembro a abril (BELTRÃO et al., 2005; CLIMADATA, 2019).

### 3.2 Amostragem e preparo das amostras

As parcelas experimentais possuíam tamanho de 14 m x 21 m e foram implementadas considerando três clones e três espaçamentos e por um total de 49 árvores. Desse total, apenas 25 compunham a parcela de árvores disponíveis para o estudo, uma vez que as árvores da bordadura foram desconsideradas. Assim, para compor os nove tratamentos do estudo foram abatidas aleatoriamente 6 árvores, resultando um total de 54 árvores.

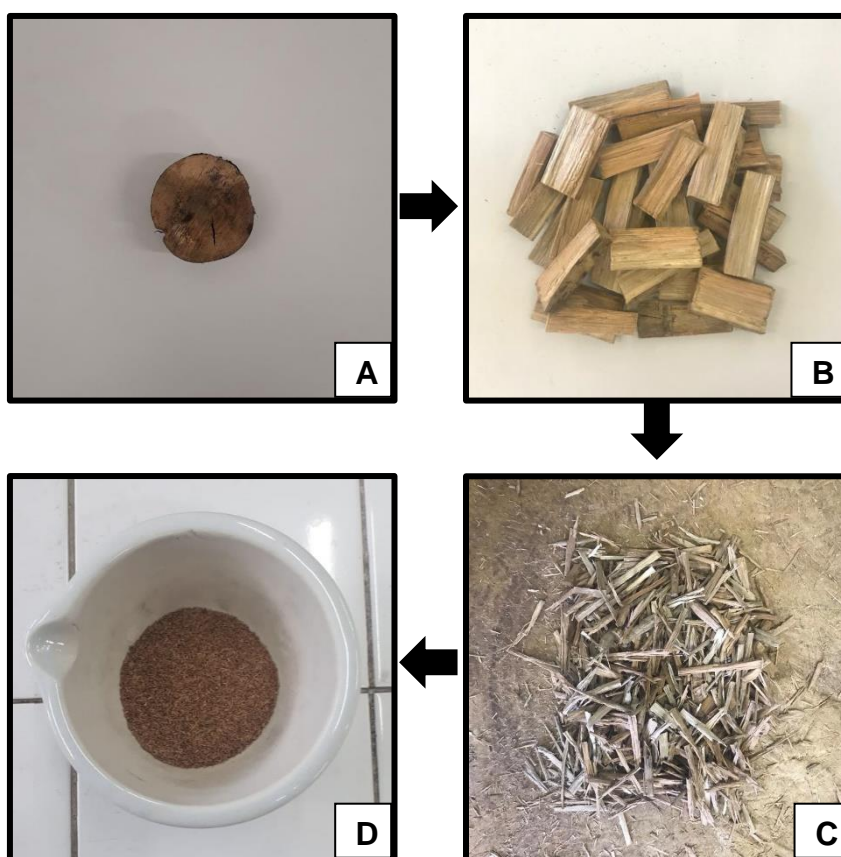
O fuste de cada árvore foi seccionado em seis posições longitudinais de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo de 5 cm) e na altura do DAP (1,30 m de altura acima do solo), no qual, foram retirados dois discos com cerca de 5 cm de espessura (Figura 2).



**Figura 2** - Ilustração da amostragem longitudinal no fuste, destacando-se a retirada de discos em diferentes porcentagens da altura comercial (Hc) e na altura de 1,30 m do solo (DAP), e as análises que serão realizadas.

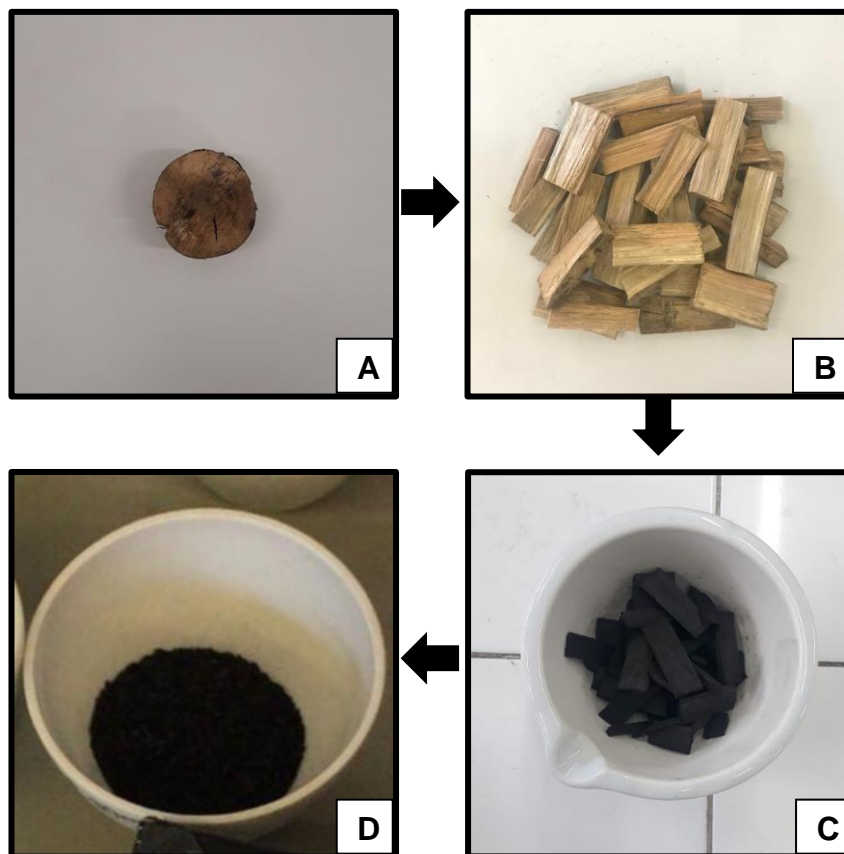
Um dos discos de cada altura foi subdividido em 4 cunhas passando pela medula, no qual, duas cunhas opostas foram destinadas a análise da densidade básica da madeira e as outras duas reduzidas a palitos para análise de dimensões das fibras (propriedade anatômica). Os demais discos foram transformados em cavacos e destinados para carbonização como também para as outras análises (Figura 2).

Para a determinação da densidade a granel da madeira, utilizou-se os cavacos “*in natura*” (Figura 3 B) e para as análises químicas (estrutural e imediata), os mesmos foram reduzidos em dimensões menores e em seguida transformados em serragem utilizando moinho de facas do tipo Willey (Figura 3 D).



**Figura 3** - Etapas do processamento da madeira “*in natura*” para realização das análises.

Para determinação das propriedades do carvão, os cavacos de madeira foram carbonizados, e após essa etapa, determinou-se a densidade relativa aparente e a densidade a granel. Posteriormente os carvões foram triturados e destinados para análise da composição da química imediata (Figura 4).



**Figura 4** - Etapas do processamento da produção de carvão vegetal para realização das análises.

Para realização dessas análises utilizou-se amostras compostas, ou seja, os cavacos de madeira de todas as alturas foram misturados e homogeneizados, representando uma amostra por árvore.

As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira do Departamento de Ciência Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco – *Campus* Sede.

### 3.3 Avaliações na madeira

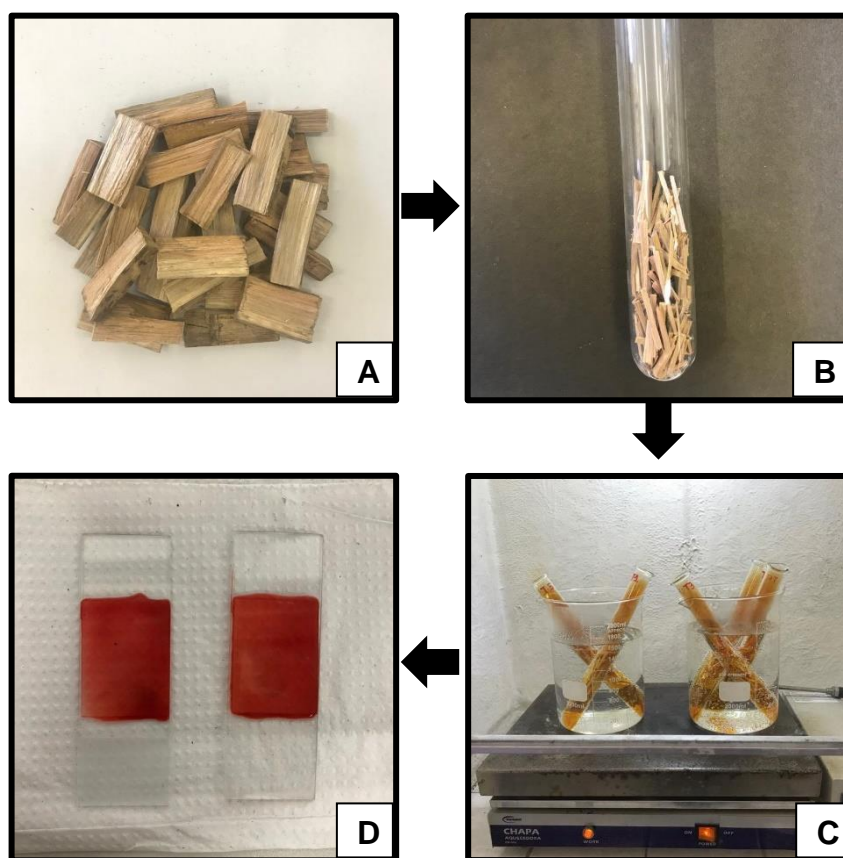
#### 3.3.1 Dimensões das fibras

Para mensuração das fibras, as mesmas foram dissociadas da madeira pelo método descrito por Barrichelo e Foelkel (1983). Seguiu-se para mensuração a Comissão Panamericana de Normas Técnicas – COPANT (1974).

Para obtenção do macerado, os palitos de madeira foram transferidos



para tubos de ensaios (Figura 5 B) contendo solução macerante (ácido nítrico e ácido acético, na proporção 1:3) com volume suficiente para que as amostras ficassem totalmente submersas. Os tubos foram levados para banho-maria a 100°C, onde permaneceram por 4 horas (Figura 5 C). Posteriormente, o macerado foi lavado, colorido com Safranina aquosa a 1% e realizada a preparação das lâminas provisórias em glicerina para obtenção das fotomicrografias contendo as fibras dissociadas (Figura 5 D).



**Figura 5** - Etapas dos procedimentos adotados para realização da mensuração das fibras: transformação dos cavacos em palitos e acondicionamento dos mesmos em tubo de ensaio (A – B); tubos de ensaios com amostras em banho-maria (C); lâminas provisórias preparadas.

As fotomicrografias foram realizadas com o sistema de aquisição de imagens Honestech TVR 25®, por meio de uma câmera acoplada ao microscópio óptico. Após a obtenção das imagens, as fibras foram mensuradas com o auxílio do software ImageProPlus®.

Foram realizadas medições de comprimento, largura e diâmetro do lume de 40 fibras individualmente por tratamento. A espessura de parede da fibra da

madeira foi obtida pela subtração do diâmetro da fibra com o diâmetro do lume e o resultado dividido por dois.

### 3.3.2 Densidade básica

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método da imersão em água, conforme a NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

Desta forma, as cunhas de madeira foram saturadas com água para obtenção do seu volume saturado com auxílio de uma balança de precisão. Posteriormente, as cunhas foram secas ao ar durante alguns dias e depois conduzidas a uma estufa de ventilação forçada a  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  para obtenção da massa seca. Então, foi determinada a densidade básica das mesmas, através da relação da massa seca e seu respectivo volume saturado.

A densidade básica média da árvore foi considerada a média aritmética das posições longitudinais de amostragem.

### 3.3.3 Densidade a granel

A densidade a granel foi determinada conforme descrito no trabalho de Brito et al. (1982) com adaptações. Para isso, utilizou-se um recipiente de volume conhecido, no qual, foram adicionados os cavacos de madeira até o respectivo volume e posteriormente pesados em balança de precisão. Então, foi determinada a densidade a granel das mesmas, através da relação da massa e o respectivo volume conhecido.

### 3.3.4 Composição química imediata

A composição química imediata da madeira foi determinada seguindo os procedimentos preconizados na American Society for Testing and Materials (ASTM) D1762 - 84 (1995), com algumas adaptações.

Para o teor de umidade, utilizou-se a fração de madeira que passou na peneira de 20 mesh e ficou retida na de 40 mesh. Pesou-se 1g do material em

umidade ambiente e levou-o para estufa, onde permaneceu até massa constante. A porcentagem do TU foi obtida pela seguinte equação:

$$\text{TU (\%)} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (1)$$

Onde:

A = massa seca ao ar (g);

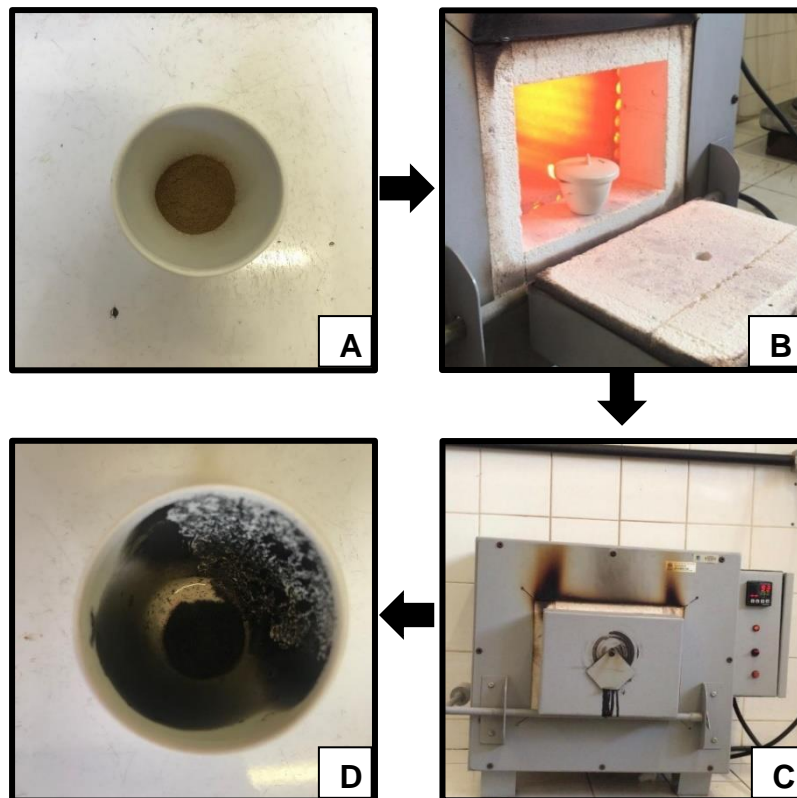
B = massa seca a 105°C (g).

Para determinação do teor de materiais voláteis utilizou-se a fração que passou na peneira de 60 mesh e ficou retido na de 100 mesh. As análises foram realizadas com 1 g do material isento de umidade e em mufla digital à 950°C, no qual, com a porta da mufla aberta o cadinho com a amostra permaneceu 2 min na borda externa da mufla, depois 3 min na borda interna. Em seguida, a amostra permaneceu 6 min dentro da mufla (com a porta fechada) (Figura 6). Transcorrida o tempo, as mesmas esfriaram em um dessecador, foram pesadas em balança e calculado a porcentagem de MV pela seguinte equação:

$$\text{MV (\%)} = [(B - C) / B] \times 100 \quad (2)$$

Onde:

C = amostra seca a 950°C.



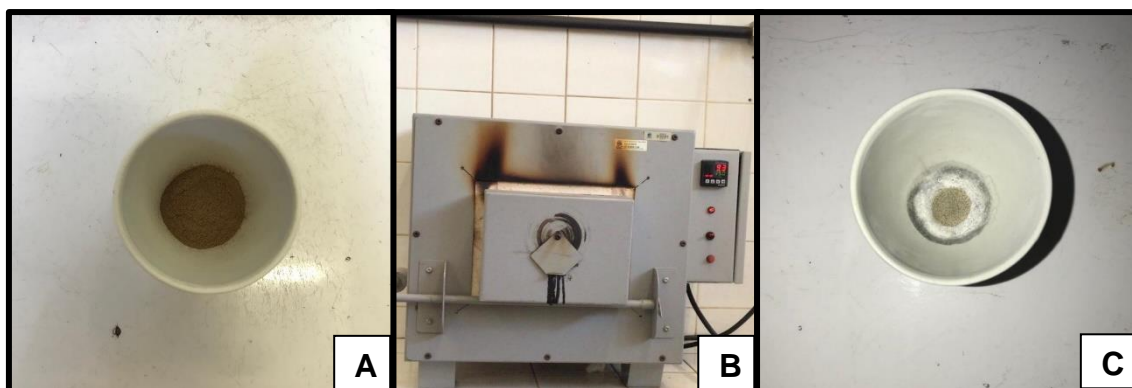
**Figura 6** - Etapas dos procedimentos adotados para realização do teor de materiais voláteis: amostra no cadinho devidamente peneirada e pesada (A); cadinho com amostra na borda interna da mufla (B); mufla com o cadinho dentro (C); amostra ao termino da análise (D).

Para determinação do teor de cinzas utilizou-se a fração que passou na peneira de 100 mesh. As análises foram realizadas com 1g do material isento de umidade e em mufla digital a 750°C, no qual, colocou-se a amostra no cadinho com tampa e em seguida na mufla (com a porta fechada), permanecendo por 6h (Figura 7). Transcorrido o tempo, as mesmas esfriaram em um dessecador, foram pesadas em balança de precisão e calculada a porcentagem de cinzas pela seguinte equação:

$$\text{CZ (\%)} = (\text{D} / \text{B}) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

D = massa residual (g).



**Figura 7** - Etapas dos procedimentos adotados para realização do teor de cinzas: amostra no cadinho devidamente peneirada e pesada (A); cadinho com amostra dentro da mufla (B); amostra ao termino da análise (D).

O teor de carbono fixo foi calculado indiretamente pela equação abaixo, através dos valores obtidos para materiais voláteis e cinzas.

$$CF (\%) = 100 - (MV + CZ) \quad (4)$$

### 3.3.5 Estimativa do Poder calorífico

O poder calorífico superior, inferior e útil foi estimado a partir dos valores obtidos na análise imediata da madeira (teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) pelas equações (5), (6) e (7), propostas por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005). Essas equações foram obtidas através de modelagem da análise imediata e do poder calorífico de diversas biomassas carbonáceas sólidas com erro absoluto de 3,74%.

$$PCS (\text{kcal/kg}) = 84,5104 \times (\% CF) + 37,2601 \times (\% MV) - 1,8642 \times (\% CZ) \quad (5)$$

$$PCI (\text{kcal/kg}) = PCS - (600 \times 0,09 \times \% H) \quad (6)$$

$$PCU (\text{kcal/kg}) = (PCI \times (1 - (0,01 \times \% TU))) - (600 \times 0,01 \times \% TU) \quad (7)$$

Onde:

PCS = Poder calorífico superior, base seca (kcal/kg);

PCI = Poder calorífico inferior, base seca (kcal/kg);

PCU = Poder calorífico útil, base úmida (kcal/kg);

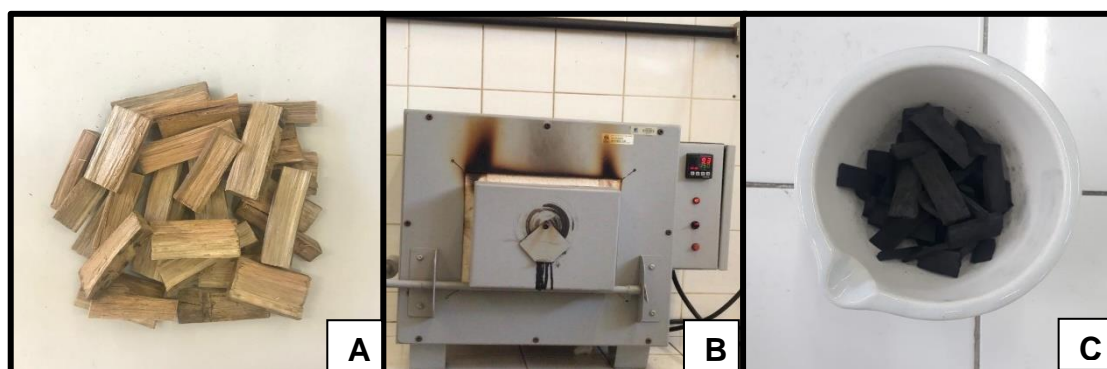
H = teor de hidrogênio considerado de 5,99%.

### 3.3.6 Densidade energética

A densidade energética foi determinada pelo produto entre a densidade básica da madeira e seu respectivo poder calorífico superior estimado.

### 3.4 Carbonizações e avaliação do carvão vegetal

Foram utilizados por árvore aproximadamente 200g de cavaco de madeira previamente seco em estufa a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . As carbonizações foram realizadas em um forno do tipo mufla digital, com taxa de aquecimento de  $1,4 ^\circ\text{C}/\text{min}$ , tempo de carbonização total de 3,5 horas (210 min) e temperatura final de  $460 \pm 10 ^\circ\text{C}$  (Figura 8). A mufla permaneceu por 30 min em temperatura de  $150^\circ\text{C}$  e mais 30 min em  $250^\circ\text{C}$ . Transcorrido esse tempo, adicionou-se a taxa de aquecimento, onde o processo foi finalizado quando atingido a temperatura final.



**Figura 8** - Produção de carvão vegetal através da carbonização da madeira “*in natura*”. Cavacos de madeira (A); mufla digital onde os mesmos foram carbonizados (B); carvão vegetal após a carbonização da madeira (C).

### 3.4.1 Rendimento gravimétrico

Após as carbonizações, foi determinado o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (em %) através da relação entre a massa do carvão seco e a massa da madeira seca.

### 3.4.2 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRA) foi determinada pelo método da imersão em água, conforme a NBR 9165 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1985), com algumas adaptações.

Os cavacos foram secos em estufa a  $(105 \pm 5)$  °C até atingir massa constante e posteriormente secos em dessecador e pesados. Em seguida, emergidos durante 15 min em recipiente cilíndrico com água e com orifício para saída e captação da mesma. Transcorrido o tempo, a massa da água, como também dos cavacos úmidos, foi determinada. Desta forma, obteve-se a DRA do carvão vegetal.

$$\text{DRA (g cm}^{-3}\text{)} = A / [B + (C - A)] \quad (8)$$

Onde:

A = massa do carvão seco (g);

B = massa da água deslocada (cm<sup>3</sup>);

C = massa do carvão úmido (g).

### 3.4.3 Densidade a granel

A densidade a granel foi determinada conforme descrito no trabalho de Brito et al. (1982) com adaptações. Para isso, utilizou-se um recipiente de volume conhecido, no qual, foram adicionados os cavacos de carvão até o respectivo volume e posteriormente pesados em balança de precisão. Então, foi determinada a densidade a granel dos mesmos, através da relação da massa e o respectivo volume conhecido.

### 3.4.3 Composição química imediata

Os procedimentos adotados para determinação da composição química imediata do carvão vegetal foram os mesmos já descritos para a madeira, nos quais, seguiu-se a American Society for Testing and Materials (ASTM) D1762 - 84 (1995), com algumas adaptações.

### 3.4.4 Poder calorífico

O poder calorífico superior, inferior e útil foi estimado a partir dos valores obtidos na análise imediata do carvão vegetal (teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) pelas equações (5), (6) e (7), propostas por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005).

### 3.4.5 Densidade energética

A densidade energética foi determinada pelo produto entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e seu respectivo poder calorífico superior.

## 3.5 Delineamento experimental e análise estatística

Foi adotado o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com 9 tratamentos (3 clones x 3 espaçamentos) e 6 repetições (árvores), totalizando 54 unidades amostrais.

As diferenças entre os tratamentos para todas as variáveis foram verificadas por meio da análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância. Quando significativo as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Para validação dos pressupostos da análise de variância foram empregados, para os resíduos, os testes de Shapiro-Wilk (normalidade), Breush-Pagan (homogeneidade das variâncias) e Durbin-Watson (autocorrelação).

Foi analisado o efeito da área útil (proveniente de três espaçamentos) nas propriedades da madeira e do carvão vegetal dos três clones de eucalipto.



Utilizou-se a análise multivariada de componentes principais (PCA) com o objetivo de explicar a estrutura de variância do vetor aleatório composto pelas características e propriedades avaliadas na madeira e no carvão dos tratamentos estudados. Foram consideradas as repetições de cada variável, e a análise de componentes principais foi realizada considerando-se a matriz de correlação dos dados.

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando o software estatístico R versão 3.6.3 (2020).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedades da madeira

#### 4.1.1 Anatomia da madeira

Na Tabela 2 verifica-se os valores médios das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede) para os tratamentos analisados (clones x espaçamentos). Todas as variáveis diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 2** - Valores médios das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede) avaliados na madeira de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS Clone x Espaçamento		VARIÁVEIS ( $\mu\text{m}$ )			
		COM*	LAR*	DIALUM*	ESP*
T1	2 m x 1 m	810,42 b	16,77 a	7,53 a	4,62 a
T2	<b>C41</b> 3 m x 2 m	822,75 b	15,06 a	5,55 b	4,76 a
T3	4 m x 2 m	748,21 b	15,42 a	6,99 a	4,22 b
T4	2 m x 1 m	753,98 b	16,19 a	8,41 a	3,89 b
T5	<b>C11</b> 3 m x 2 m	883,80 a	14,76 b	5,67 b	4,55 a
T6	4 m x 2 m	826,23 b	14,01 b	4,91 b	4,55 a
T7	2 m x 1 m	834,69 b	13,84 b	4,66 b	4,59 a
T8	<b>C39</b> 3 m x 2 m	875,42 a	15,15 a	6,02 b	4,57 a
T9	4 m x 2 m	868,18 a	15,85 a	5,59 b	5,13 a
<b>MÉDIA</b>		824,85	15,23	6,15	4,54
<b>DESVIO PADRÃO</b>		144,836	3,015	2,775	1,083
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</b>		17,559	19,798	45,139	23,849

\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

As fibras dos tratamentos avaliados são consideradas muito curtas ( $< 2000 \mu\text{m}$ ) (SILVA, 2005), pois os valores encontrados para o comprimento variaram de  $748,22 \mu\text{m}$  a  $883,80 \mu\text{m}$ , com média de  $824,85 \mu\text{m}$ . Esse resultado é esperado para materiais do gênero *Eucalyptus*, uma vez que, as fibras da madeira das folhosas geralmente variam de  $500 \mu\text{m}$  a  $2.500 \mu\text{m}$ .

O comprimento é uma propriedade que sofre mais influência da idade da árvore em comparação ao material genético e/ou condições de crescimento. Esse fato é verificado por inúmeros autores e é decorrente do aumento do comprimento das células que a originam, denominadas fusiformes iniciais. Além disso, de acordo com Bisset e Dadswello (1949) o comprimento das fibras para inúmeras espécies de *Eucalyptus* tende a estabilizar quando as células do câmbio atingir comprimento máximo, iniciando a formação da madeira caracterizada como adulta.

O valor médio para largura foi de 15,23  $\mu\text{m}$ , variando de 13,84  $\mu\text{m}$  a 16,77  $\mu\text{m}$  (Tabela 2). As fibras de todos os tratamentos são consideradas estreitas (SILVA, 2005), visto que apresentaram resultados inferiores a  $< 25 \mu\text{m}$ . Para essa variável os tratamentos 5, 6 e 7 apresentaram os melhores resultados, pois para finalidades energéticas são requeríveis madeira com fibras de menor largura.

Os valores médios para diâmetro do lume variaram de 4,66  $\mu\text{m}$  a 8,41  $\mu\text{m}$  e a espessura da parede de 3,90  $\mu\text{m}$  a 5,13  $\mu\text{m}$ , no qual, independente do tratamento, as fibras apresentaram diâmetro do lume estreito e paredes de delgadas a espessas. Os tratamentos 3 e 4 apresentaram fibras com paredes de menor espessura e maior diâmetro do lume, o que não é requerido em madeiras destinadas para energia.

Os resultados verificados para o diâmetro do lume e espessura da parede mostraram-se semelhantes aos encontrados por Carvalho (2000), Evangelista (2007), Santos et al. (2011) e Pereira et al. (2016) ao estudarem clones de *Eucalyptus* com 8, 7 e 7,5 anos de idade, respectivamente.

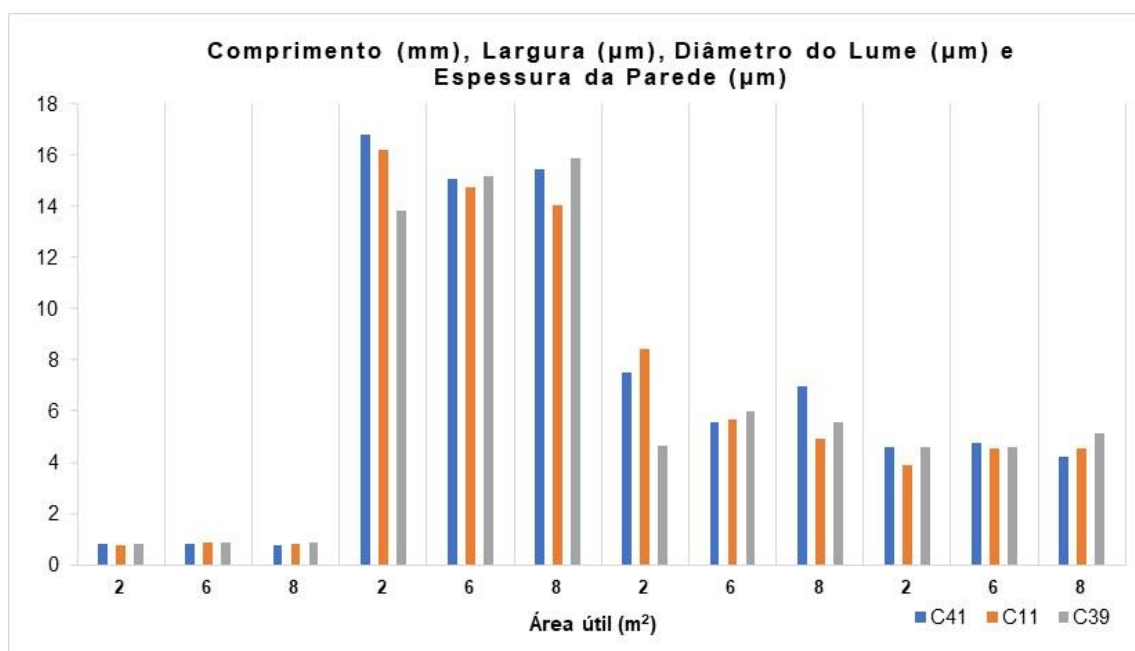
O estudo dos elementos anatômicos das folhosas, especialmente em relação às dimensões das fibras é essencial, uma vez que, por constituírem a maior porcentagem do lenho as fibras são consideradas os componentes principais das mesmas. Portanto, madeiras ricas em células parenquimáticas e vasos apresentam baixo teor dos componentes estruturais, em particular de lignina, não sendo assim recomendados para produção de energia.

Por isso, para geração de energia, seja utilizando a madeira "*in natura*" ou visando a produção de carvão vegetal, são recomendadas madeiras com fibras de menores diâmetros e paredes espessas e também ricas em fibras com elevada fração parede. Essas características conferem a madeira maior massa

e, conseqüentemente, densidade mais elevada. Isto irá influenciar no poder calorífico, que está relacionando ao tempo de queima e liberação de calor, assim proporcionando uma combustão duradoura, o que favorecerá principalmente o retorno econômico.

No presente trabalho observa-se que as dimensões das fibras influenciaram em outras características da madeira e do carvão vegetal. Por exemplo: o tratamento com maior diâmetro do lume e menor espessura da parede (T4) também apresentou as menores densidades (básica e relativa aparente).

Os três clones de *Eucalyptus* avaliados apresentaram comportamentos distintos em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) para as dimensões das fibras (Figura 9).



**Figura 9** – Dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede) dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>).

Os dois clones de *E. urophylla* apresentaram comportamento iguais para o comprimento das fibras, onde os valores aumentaram até o espaçamento intermediário (3 m x 2 m) e depois decresceram (Figura 9). Para o *E. brassiana* a área útil de 6 m<sup>2</sup> também proporcionou os melhores resultados para o comprimento.

Autores como Tienne et al. (2009) e Feuchard (2015) observaram tendências no aumento do comprimento das fibras com a ampliação do espaçamento de plantio ao estudarem *E. urophylla* x *E. grandis* com idade inferior a 5 anos. Moulin (2013) estudando clones jovens deste mesmo híbrido verificou que os valores do comprimento das fibras tenderam a aumentar com o adensamento do espaçamento.

O clone C41 apresentou o mesmo comportamento para a largura e diâmetro do lume, com o espaçamento mais adensado proporcionando fibras mais largas e com lume de maior diâmetro. A espessura da parede exibiu comportamento semelhante ao comprimento, com fibras de parede mais espessas na área útil de 6 m<sup>2</sup>. Para os demais clones, essas variáveis apresentaram comportamento semelhante, sendo que, a largura e diâmetro do lume para o clone C39 apresentou tendência de aumento com a ampliação do espaçamento, já o clone C11 reduziu com o aumento do espaçamento.

A partir da avaliação dos materiais genéticos em função do espaçamento, pode-se observar de maneira geral que as variáveis largura e o diâmetro do lume das fibras correlacionam-se positivamente entre si, ou seja, quando uma aumenta a outra também aumenta. O mesmo ocorre para o comprimento e a espessura da parede das fibras.

Com isso, fibras de menor largura e diâmetro do lume tendem a ter parede mais espessa, o que é requerido para o setor energético, pois quanto maior a largura e o diâmetro do lume das fibras, maior a quantidade de espaços vazios e conseqüentemente menor será a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal, interferindo negativamente na qualidade.

#### 4.1.2 Densidades da madeira

Na Tabela 3 verifica-se os valores médios de densidade básica e densidade a granel dos tratamentos analisados (clones x espaçamentos). Para ambas as densidades, os valores médios diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 3** - Valores médios de densidade básica e densidade a granel avaliados na madeira de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS Clone x Espaçamento			VARIÁVEIS (g cm <sup>-3</sup> )	
			Densidade básica*	Densidade a granel*
T1		2 m x 1 m	0,584 c	0,288 a
T2	C41	3 m x 2 m	0,603 c	0,284 a
T3		4 m x 2 m	0,642 b	0,270 a
T4		2 m x 1 m	0,574 c	0,237 b
T5	C11	3 m x 2 m	0,684 a	0,295 a
T6		4 m x 2 m	0,649 b	0,269 a
T7		2 m x 1 m	0,672 a	0,277 a
T8	C39	3 m x 2 m	0,626 b	0,277 a
T9		4 m x 2 m	0,628 b	0,288 a
MÉDIA			0,629	0,276
DESVIO PADRÃO			0,047	0,024
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)			7,435	8,702

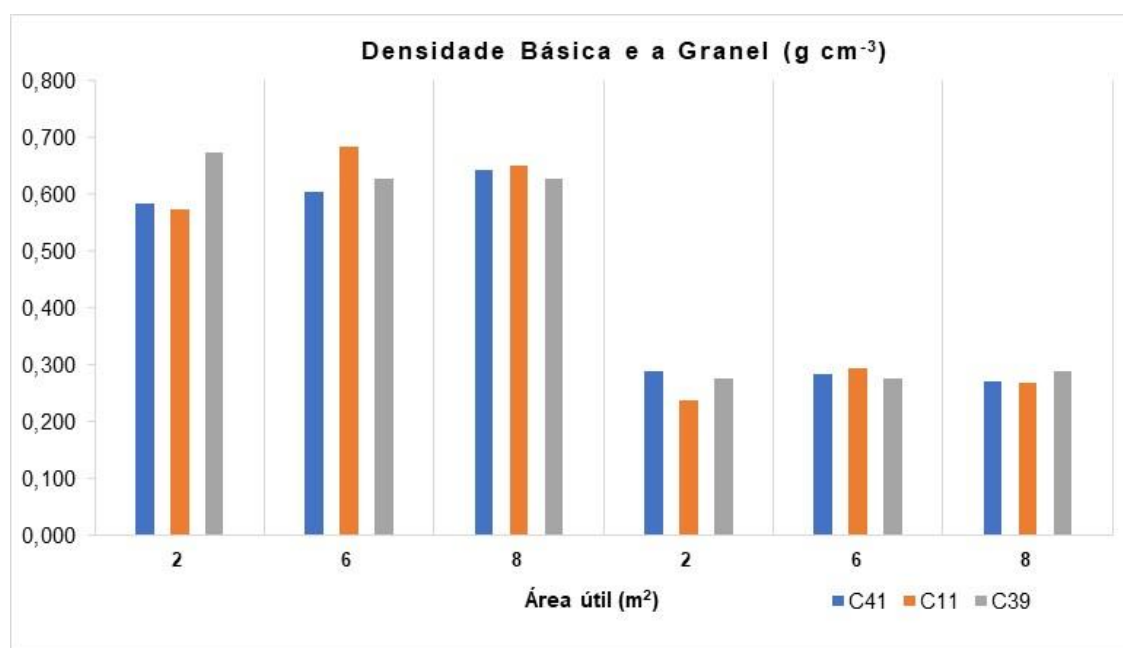
\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

O valor médio da densidade básica para os nove tratamentos analisados foi de 0,629 g cm<sup>-3</sup>, variando de 0,574 g cm<sup>-3</sup> a 0,684 g cm<sup>-3</sup>. As maiores médias foram verificadas nos tratamentos T5 e T7, com 0,684 e 0,672 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. O clone C11 plantado no menor espaçamento (T4) proporcionou árvores de menor densidade média quando comparado aos demais, todavia, os resultados obtidos independentes dos tratamentos analisados estão dentro da faixa considerada como satisfatória para produção de carvão vegetal (0,4 g cm<sup>-3</sup> a 1,2 g cm<sup>-3</sup>) (BRITO; BARRICHELLO; SEIXAS, 1983; CARNEIRO et al., 2014; TRUGILHO et al., 2001).

Madeiras com altos valores para densidade básica, são requeríveis, pois durante a produção do carvão vegetal cerca de 60% da sua massa é perdida durante o processo de degradação térmica. Então densidades elevadas proporcionam carvões de maior densidade relativa aparente, além de conferir ao mesmo uma maior resistência mecânica e capacidade calorífica por unidade de volume (SANTOS et al., 2011; NEVES, 2012; SEREGHETTI et al., 2015).

Castro et al. (2016) ao estudarem dois clones de *E. urophylla* com 7 anos de idade e plantados no espaçamento 3,5 m x 2,5 m no estado de Minas Gerais, obtiveram valores inferiores ( $0,46 \text{ g cm}^{-3}$  a  $0,56 \text{ g cm}^{-3}$ ) aos clones C41 e C39 de *E. urophylla* analisados neste trabalho. Inúmeros autores como Oliveira et al. (2010), Santos et al. (2011), Protásio et al. (2014), Silva et al. (2015) e Fialho et al. (2019) ao analisarem clones de *Eucalyptus* com mais de 5 anos de idade verificaram valores médios para a densidade básica inferiores ao deste estudo ( $0,558 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,540 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,462 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $0,471 \text{ g cm}^{-3}$  e  $0,51 \text{ g cm}^{-3}$  a  $0,62 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente).

Os três clones de *Eucalyptus* avaliados apresentaram comportamentos distintos em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) para a densidade básica e a densidade a granel (Figura 10).



**Figura 10** - Densidade básica e densidade a granel dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>).

Como exemplo, pode-se observar o clone 41 de *E. urophylla* que aumentou a densidade básica em função da área útil, enquanto o outro clone da mesma espécie apresentou comportamento inverso (C39) (Figura 10). Brito (2017) menciona que mesmo com condições semelhantes de desenvolvimento, os incrementos de densidade em virtude do espaçamento de plantio são peculiares a cada material genético.

Acréscimos na densidade básica com o aumento da área útil podem ser verificados para esse gênero nos trabalhos de Moulin et al. (2017) e Rocha (2011), no qual, esse comportamento pode estar relacionado a maior disponibilidade de nutrientes para as árvores, uma vez que, quanto maior o espaçamento entre as mesmas, menor a competição e melhores são as condições de sobrevivência. Todavia, a densidade básica apresentou tendência de diminuir com o aumento da área útil em *E. urophylla* aos 9 anos de idade (MIGLIORINI et al., 1980) e *E. grandis* com 10 anos de idade (GOULART et al., 2003).

Em relação a densidade a granel, os tratamentos 5 e 4 proporcionaram as melhores e piores médias, respectivamente (Tabela 3).

Quando se trabalha com densidade a granel espera-se que a mesma apresente comportamento semelhante a densidade básica, em razão de serem duas variáveis direta e positivamente correlacionadas. Porém, isso não foi constatado neste estudo, especialmente quando se observa a densidade a granel em função da área útil (Figura 10). Geralmente, este comportamento ocorre quando a umidade e a granulometria dos cavacos não são padronizados (como no presente estudo), mas ao analisar o teor de umidade dos cavacos de madeira, observa-se diferença entre as umidades de apenas 1,9% (TU médio dos cavacos = 12,4%), então pode-se confirmar que a granulometria dos cavacos influenciou nos resultados obtidos.

Granulometria distintas são interessantes do ponto de vista da acomodação do material e transporte, pois as partículas menores preenchem os espaços vazios gerados entre as partículas maiores, desta forma cooperando para a densidade a granel. Todavia, de acordo com Nogueira (2019) quando se considera a combustão na caldeira, diferentes granulometrias torna-se um aspecto negativo, visto que, a eficiência da combustão está ligada a homogeneidade das partículas quanto ao seu tamanho.

#### 4.1.3 Química imediata da madeira

Na Tabela 4 verifica-se os valores médios para teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos tratamentos analisados (clones x



espaçamentos). Com exceção dos teores de materiais voláteis e carbono fixo, as demais variáveis diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 4** - Valores médios de teores de umidade (TU), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) avaliados na madeira de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS Clone x Espaçamento			VARIÁVEIS (%)			
			TU*	MV <sup>ns</sup>	CZ*	CF <sup>ns</sup>
T1		2 m x 1 m	10,12 b	79,69	0,84 b	19,47
T2	C41	3 m x 2 m	10,02 b	79,98	0,82 b	19,20
T3		4 m x 2 m	10,94 a	80,31	1,22 a	18,55
T4		2 m x 1 m	11,29 a	79,90	1,14 a	18,88
T5	C11	3 m x 2 m	10,22 b	80,10	0,99 b	18,91
T6		4 m x 2 m	8,91 b	80,06	0,96 b	18,98
T7		2 m x 1 m	9,57 b	81,87	0,74 b	17,40
T8	C39	3 m x 2 m	9,74 b	80,26	0,42 c	19,32
T9		4 m x 2 m	10,30 b	79,70	0,39 c	19,91
<b>MÉDIA</b>			10,12	80,21	0,84	18,96
<b>DESVIO PADRÃO</b>			1,096	1,320	0,334	1,380
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</b>			10,825	1,652	39,898	7,281

\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

De modo geral, os teores de materiais voláteis variaram de 79,69% a 81,87%, os teores de cinzas de 0,39% a 1,22% e os teores de carbono fixo de 17,40% a 19,91%. Vale salientar que todas as propriedades analisadas na química imediata da madeira apresentaram valores médios dentro do esperado para o gênero de *Eucalyptus* (cinzas < 1%, materiais voláteis de 75% a 85% e carbono fixo de 15% a 25%), apenas os tratamentos T3 e T4 exibiram resultados levemente acima de 1% para o teor de cinzas.

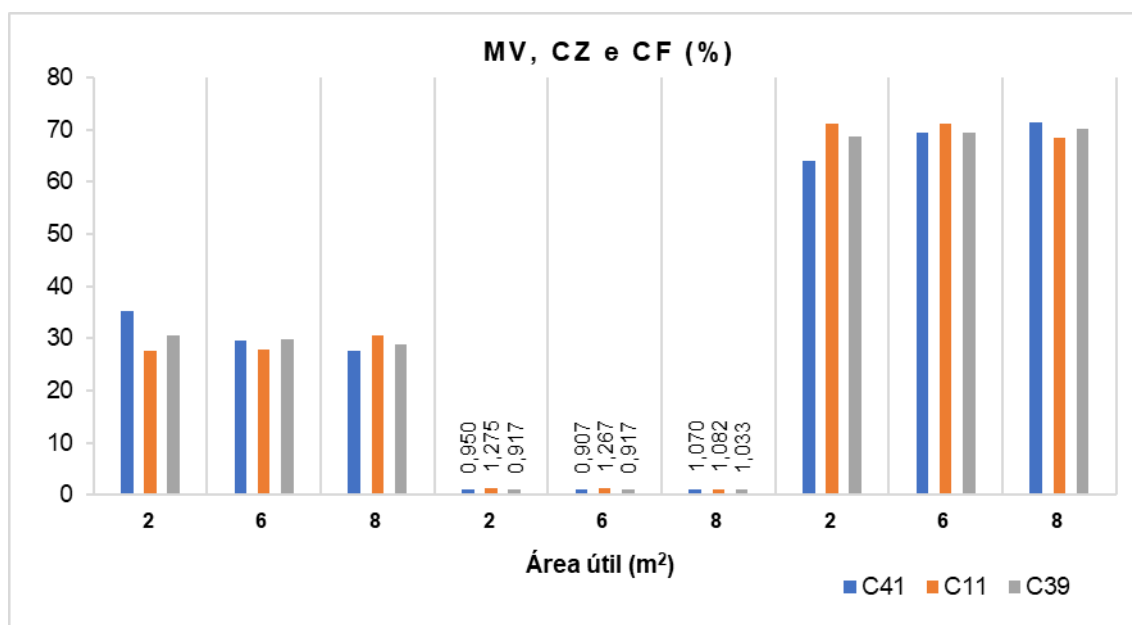
Entre os tratamentos analisados, o T9 (clone C39 por espaçamento 4m x 2m) proporcionou o maior teor de carbono fixo (19,91%) e como esperado um menor teor de materiais voláteis e cinzas, uma vez que, materiais voláteis e cinzas são variáveis inversamente proporcionais ao carbono fixo. Madeiras com altos teores de carbono fixo são requeríveis para finalidades energéticas, pois

apresentam relação direta com o poder calorífico, já os teores de materiais voláteis e cinzas interferem negativamente.

Os materiais voláteis representam a parte do combustível que se volatiliza quando ele é submetido a altas temperaturas, então, se a madeira e/ou o carvão vegetal apresentarem altos teores deste componente, durante a queima eles irão volatilizar rapidamente e assim o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão será reduzido, colaborando para uma baixa eficiência energética. E as cinzas são as substâncias que não entram em combustão, permanecendo na forma sólida e interferindo negativamente no poder calorífico, pois, segundo Klautau (2008) causam perda de energia e afetam a transferência de calor.

Arriel (2017) ao avaliar 39 clones de *Eucalyptus*, entre eles o *E. urophylla*, com 81 anos de idade e instalados em espaçamento 3m x 3m no estado de Minas Gerais, obteve resultados inferiores ao deste estudo, com valores médios para carbono fixo de 16,25% e materiais voláteis de 83,61%.

Com exceção do clone 41 (*E. urophylla*) os demais apresentaram comportamento semelhantes para o teor de carbono fixo e teor de cinzas em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) (Figura 11).



**Figura 11** - Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>).

Com o aumento da área útil o clone 41 da espécie *E. urophylla* apresentou redução no teor de carbono fixo e, conseqüentemente, acréscimo nos teores de cinzas e materiais voláteis. Esse comportamento para o teor de cinzas também foi verificado por Souza (2012) e Brito (2017) ao avaliarem clones de *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla* mesmo com idades inferiores (4,5 anos e 4 anos, respectivamente).

De acordo com Souza (2012) o acréscimo do teor de cinzas com o aumento do espaçamento pode estar associado a maior disponibilidade de nutrientes e água no solo, uma vez que, as cinzas representam a fração inorgânica (substâncias minerais) presente na madeira. Porém isto geralmente ocorre nas idades mais jovens, quando as árvores apresentam uma maior taxa de absorção de nutrientes.

Já os clones C11 (*E. bassiana*) e C39 (*E. urophylla*) apresentaram o mesmo comportamento em função da área útil, no qual, ambos tiveram acréscimos no teor de carbono fixo e decréscimo do teor de cinzas com o aumento do espaçamento (Figura 11).

Os resultados obtidos podem estar relacionados ao próprio material genético, uma vez que, não apenas os fatores externos exercem influência sobre as propriedades da madeira, como também os inerentes ao próprio material. Porém como todos os clones têm a mesma idade e foram plantados em condições edafoclimáticas semelhantes, esperava-se que pelo menos os materiais genéticos de *E. urophylla* apresentassem comportamentos semelhantes para essas variáveis, o que não foi observado.

Segundo Rocha (2011) com aproximadamente 7 anos de idade as árvores já possuem uma estagnação do seu crescimento, e, conseqüentemente, redução das suas atividades fisiológicas em todos os espaçamentos, o que acarretará na estabilização e até redução do teor de minerais. Então, os teores de carbono fixo e materiais voláteis permanecem variáveis, tornando-se importante buscar a redução dos materiais voláteis para assim aumentar a porcentagem de carbono fixo. Todavia, não se observou a estabilização do teor de cinzas dos clones em função ao espaçamento, necessitando de mais estudos dos mesmos em relação especialmente a idade fisiológica.

#### 4.1.4 Poder calorífico e densidade energética

Na Tabela 5 verifica-se os valores médios estimados para o poder calorífico superior, inferior e útil, e densidade energética dos tratamentos analisados (clones x espaçamentos). Todas as variáveis diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 5** - Valores médios de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (DE) avaliados na madeira de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS Clone x Espaçamento		VARIÁVEIS			
		PCS*	PCI*	PCU*	DE*
			kcal kg <sup>-1</sup>		kcal m <sup>-3</sup>
<b>T1</b>	2 m x 1 m	4613,24 a	4289,78 a	3794,94 a	2695,75 b
<b>T2</b>	<b>C41</b> 3 m x 2 m	4601,16 a	4277,70 a	3789,50 a	2770,61 b
<b>T3</b>	4 m x 2 m	4557,68 b	4234,22 b	3705,50 b	2927,80 a
<b>T4</b>	2 m x 1 m	4570,08 b	4246,62 b	3699,67 b	2625,85 b
<b>T5</b>	<b>C11</b> 3 m x 2 m	4580,74 b	4257,28 b	3761,04 b	3135,06 a
<b>T6</b>	4 m x 2 m	4585,23 b	4261,77 b	3828,54 a	2974,11 a
<b>T7</b>	2 m x 1 m	4519,15 b	4195,69 b	3736,91 b	3035,14 a
<b>T8</b>	<b>C39</b> 3 m x 2 m	4622,86 a	4299,34 a	3822,52 a	2894,88 a
<b>T9</b>	4 m x 2 m	4651,54 a	4328,08 a	3820,28 a	2920,93 a
<b>MÉDIA</b>		4589,08	4265,61	3773,21	2886,68
<b>DESVIO PADRÃO</b>		70,042	70,042	86,476	209,264
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</b>		1,527	1,642	2,292	7,249

\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

O poder calorífico superior e o inferior apresentaram o mesmo comportamento, com o tratamento 9 apresentando as melhores médias (4.651,54 kcal kg<sup>-1</sup>) e o tratamento 7 as piores (4.519,15 kcal kg<sup>-1</sup>). Todavia, independente dos tratamentos, todos mostraram poder calorífico superior acima do valor recomendado por Rocha e Klitzke (1998) (4.500 kcal kg<sup>-1</sup>).

Santos et al. (2012) estudando clones de *E. urophylla* aos 6 anos plantados em espaçamento 3m x 3m, Dias Jr. et al. (2015) avaliando a mesma espécie, porém com 7 anos de idade e instalados no espaçamento 3m x 2m, e

Nones et al. (2015) analisando *E. benthamii* com 5 anos e plantado em espaçamento 2,5m x 2m, verificaram resultados médios inferiores para o PCS. Já Silva et al. (2015) e Castro et al. (2016) ao avaliarem clones de *Eucalyptus* com 5 anos e 7 anos de idade respectivamente, obtiveram resultados superiores para o PCS e PCI.

O poder calorífico sofre influência direta de outras propriedades, como por exemplo: do teor de carbono fixo e teor de umidade. Com relação ao teor de carbono fixo, observa-se influência linear e direta do mesmo com o PCS e PCI, no qual, os tratamentos com maiores teores de carbono fixo, proporcionaram consequentemente maior poder calorífico (Tabela 4 e Tabela 5).

Com relação ao teor de umidade, segundo Neves (2012) ele é o grande redutor do poder calorífico nos combustíveis convencionais. Contudo, no presente estudo não se observou efeito da umidade sob o poder calorífico, já que a diferença de umidades entre os tratamentos foi apenas de 2,37% e o teor de umidade médio (10,12%) encontra-se dentro do recomendado pela literatura.

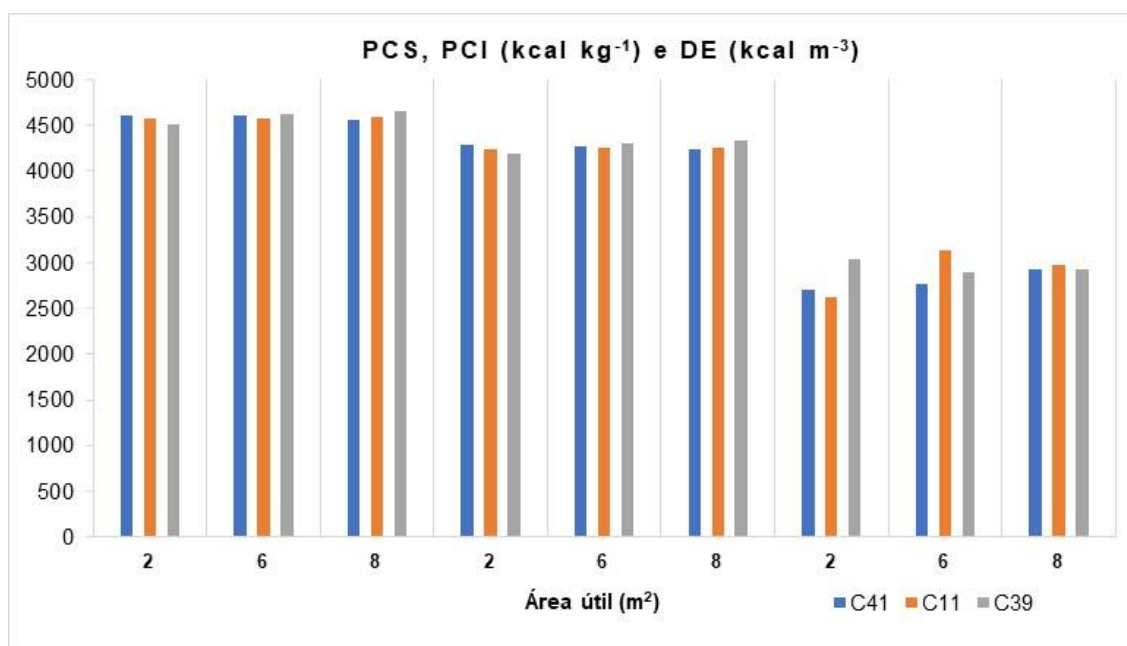
A realização de análises para quantificação do teor de lignina, como também dos componentes elementares (especialmente C, H e O) devem ser realizadas posteriormente para os tratamentos estudados, pois são variáveis de fundamental importância quando se trabalha com seleção de clones para produção energética, sendo desejáveis madeiras com altos teores de lignina, carbono e hidrogênios, e baixos teores de oxigênio, devido as correlações existentes entre esses componentes com o poder calorífico.

A densidade energética apresentou o mesmo comportamento da densidade básica, com o tratamento 5 exibindo as melhores médias e o tratamento 4 as piores (Tabela 5). Esta mesma correlação direta e linear entre a DE e DB também foi verificada por Jesus et al. (2017). Desta forma, percebe-se que a densidade básica interfere mais na densidade energética do material em comparação ao poder calorífico superior, fato corroborado por Silva et al. (2015), que verificaram correlação positiva de 0,96 entre a DE e DB, e entre a DE e o PCS de apenas 0,57.

Resultados inferiores para a densidade energética foram obtidos por Silva et al. (2015) e Jesus et al. (2017) ao avaliarem clones de *Eucalyptus* com 5 anos e 6 anos de idade, respectivamente. A densidade energética é importante pois

demonstra a quantidade de calor em um volume conhecido de biomassa, estimando o desempenho do material como combustível (BARROS et al., 2019).

Com exceção do clone 41 (*E. urophylla*) os demais apresentaram comportamento semelhantes para o poder calorífico superior e inferior em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) (Figura 12).



**Figura 12** - Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e Densidade Energética (DE) dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>).

Com o aumento da área útil o clone 41 apresentou redução no poder calorífico superior e, conseqüentemente, no poder calorífico inferior (Figura 12). Esse comportamento é esperado, visto que o teor de carbono fixo também decresceu com o aumento do espaçamento. Já para os clones 11 e 39 observa-se acréscimos no PCS e PCI com o aumento da área útil. Assim como para o clone 41, estes apresentaram o mesmo comportamento do teor de carbono fixo.

Rocha (2011), Sartório (2014), Rocha et al. (2016) e Brito (2017) ao estudarem o efeito do espaçamento inicial de plantio em clones de *Eucalyptus*, não verificaram efeito significativo para o poder calorífico superior. Contudo, Rocha (2011) observou aumento do poder calorífico superior com o aumento do espaçamento, no qual, o mesmo relaciona esse comportamento as alturas das árvores. Esse autor menciona que as árvores mais altas tem uma maior porcentagem de lenho juvenil, e, portanto, possui maior conteúdo de lignina em

relação a madeira adulta. Neste trabalho, o espaçamento mais amplo (4 m x 2 m), proporcionou árvores de maior altura para os três clones avaliados, e com exceção do clone C41, os maiores PCS e PCI.

Segundo Rocha et al. (2016) o espaçamento de plantio pode influenciar indiretamente o poder calorífico da madeira, através da densidade básica e conteúdo de lignina, no qual, espera-se que as maiores áreas úteis resultem em árvores com maior densidade e conteúdo de lignina. No presente estudo, não foi verificada essa correlação entre o espaçamento, densidade e poder calorífico, ou seja, os espaçamentos mais amplos não necessariamente proporcionaram materiais com maiores densidades e poderes caloríficos.

As diferenças verificadas nos resultados do presente estudo, como também em outros trabalhos quando se avalia o poder calorífico, podem ser justificadas por fatores que atuam associados com o espaçamento de plantio, tais como: idade das árvores, material genético, local de crescimento (fatores edafoclimáticos) e outros tratamentos silviculturais como a adubação (BRITO, 2017).

Acréscimos na densidade energética são observados com o aumento do espaçamento para o clone C41, já os clones C11 e C39 não apresentaram tendência de aumentar ou diminuir em função da área útil (Figura 12). Contudo, ambos os materiais genéticos exibiram comportamento igual a densidade básica, indicando que há correlação linear e positiva entre essas variáveis e que materiais mais densos tendem a apresentar maior quantidade de energia disponível.

## **4.2 Propriedades do carvão vegetal**

### **4.2.1 Rendimento gravimétrico e densidade**

Na Tabela 6 verifica-se os valores médios para o rendimento gravimétrico, a densidade relativa aparente e a densidade a granel dos tratamentos analisados (clones x espaçamentos). Com exceção do rendimento gravimétrico, as outras variáveis diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 6** - Valores médios do rendimento gravimétrico (RG), densidade relativa aparente (DRA) e densidade a granel (DG) avaliados no carvão vegetal obtido de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS		VARIÁVEIS			
Clone x Espaçamento		RG <sup>ns</sup> (%)	DRA* (g cm <sup>-3</sup> )	DG* (g cm <sup>-3</sup> )	
T1	2 m x 1 m	34,21	0,372 c	0,200 a	
T2	<b>C41</b> 3 m x 2 m	32,52	0,409 b	0,199 a	
T3	4 m x 2 m	32,38	0,415 b	0,181 b	
T4	2 m x 1 m	32,93	0,357 c	0,155 c	
T5	<b>C11</b> 3 m x 2 m	33,88	0,494 a	0,209 a	
T6	4 m x 2 m	33,70	0,485 a	0,180 b	
T7	2 m x 1 m	33,34	0,461 a	0,193 a	
T8	<b>C39</b> 3 m x 2 m	34,50	0,521 a	0,176 b	
T9	4 m x 2 m	34,83	0,462 a	0,201 a	
<b>MÉDIA</b>		33,59	0,442	0,188	
<b>DESVIO PADRÃO</b>		1,586	0,088	0,022	
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</b>		4,723	19,877	11,957	

\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

O rendimento gravimétrico não sofreu interferência significativa dos clones de *Eucalyptus* instalados em diferentes espaçamentos, no qual o valor médio foi de 33,59%, variando de 32,38% a 34,83%. Rocha (2011) e Rocha et al. (2017) verificaram valores médios inferiores ao deste estudo (28,01% a 30,08% e 28,01% a 30,80%, respectivamente), já Trugilho et al. (2005) e Reis et al. (2012) obtiveram valores superiores (36,49% a 38,56% e 35,18% a 37,07%, respectivamente), porém todos os autores supracitados não observaram efeito do espaçamento nos materiais genéticos de *Eucalyptus* com 7 anos de idade.

Para produção energética é desejável um carvão vegetal com elevado rendimento gravimétrico, valores estes observados no processo de carbonização para os tratamentos T1, T8 e T9, pois de acordo com Protásio et al. (2012) o aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização é maior e, conseqüentemente, maior é a produção de energia e menores os rendimentos em líquido e em gases não condensáveis (subprodutos do processo de pirólise).

Essa propriedade sofre influência da matéria prima de origem, como também do processo de carbonização. De acordo com Brito e Barrichelo (1997) dentre as propriedades da madeira o teor de lignina é a que mais contribui para



o RG e isto ocorre devido a sua alta resistência a degradação térmica, além de colaborar para maiores teores de carbono fixo. No processo de carbonização, a taxa de aquecimento e a temperatura final de carbonização influenciam o RG, sendo que maiores temperaturas implicam em menores rendimentos e maior teor de carbono fixo e, conseqüentemente, maior poder calorífico (PROTÁSIO et al., 2012).

Castro et al. (2016) ao trabalharem com dois clones de *E. urophylla* aos 7 anos de idade plantadas no espaçamento 3,5m x 2,5m, utilizando temperatura final de carbonização de 450°C e taxa de aquecimento de 1,56°C/min, verificaram médias para o RG de 33,53% e 34,81%. Reis et al. (2012) também estudando *Eucalyptus* com 7 anos e sob essa mesma marcha de carbonização, porém instalados em espaçamento 3m x 3m, obtiveram rendimento em carvão vegetal entre 35,18% e 37,07%.

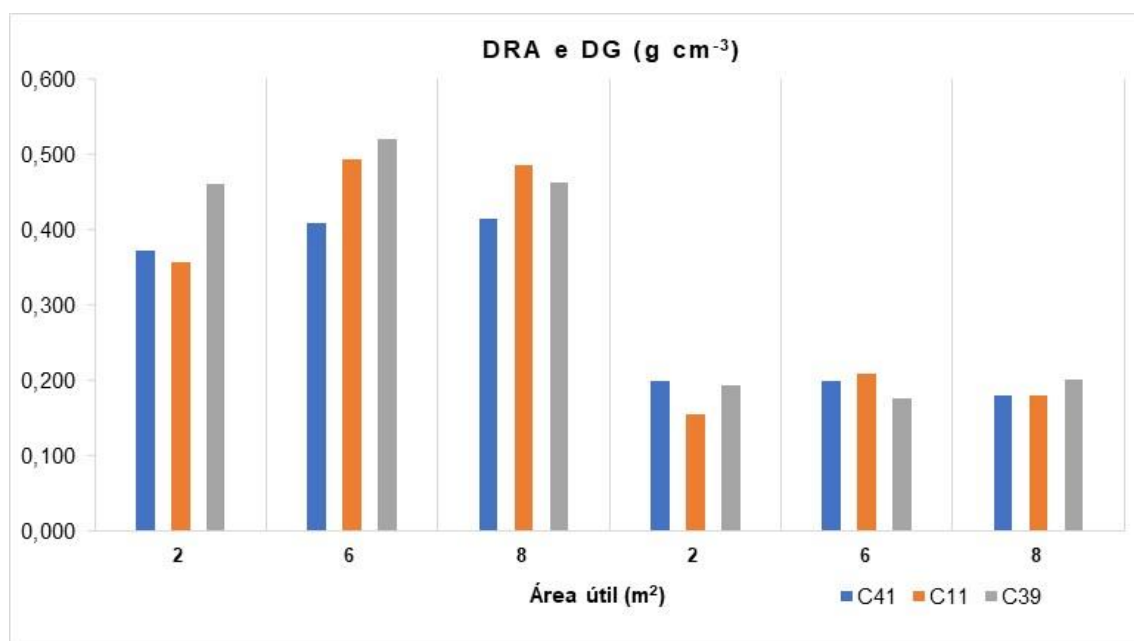
Tanto para densidade relativa aparente como para a densidade a granel, o tratamento 4 (clone 11 por espaçamento 2m x 1m) proporcionou as menores médias (Tabela 6), fato também observado para a DB e DG da madeira. De acordo com Santos (2008) é desejável que a densidade relativa do carvão vegetal destinado para energia não seja inferior a 0,400 g cm<sup>-3</sup>, no qual, no presente estudo a média geral dos tratamentos foi 0,442 g cm<sup>-3</sup>, com apenas os tratamentos 1 e 4 apresentando valores inferiores ao supracitado.

Brito e Barrichelo (1980) afirmaram que quanto maior a densidade da madeira, maior a densidade aparente do carvão vegetal e maior será a sua resistência mecânica. No presente estudo, foram observadas semelhanças no comportamento estatístico entre as duas densidades avaliadas do carvão vegetal e as densidades básica e a granel da madeira, porém os aumentos nas densidades das madeiras não foram acompanhados, de uma forma contínua, de aumentos nas densidades do carvão vegetal. Isto ocorre, principalmente pela quantidade de cerne e alburno presente nos materiais madeireiros, uma vez que, os cavacos utilizados para análise das densidades do carvão vegetal foram provenientes de amostras compostas, não havendo distinção das partes de cerne e alburno, e sabe-se que densidade da madeira aumenta no sentido medula-casca.

Resultados inferiores para a DRA foram verificados por Trugilho et al. (2005), Reis et al. (2012a), Reis et al. (2012b), Pereira et al. (2012), Soares et

al. (2014), Dias Jr et al. (2015), Castros et al. (2016) e Andrade et al. (2018), avaliando clones de *Eucalyptus* em diferentes idades e espaçamentos.

Os três clones de *Eucalyptus* avaliados apresentaram comportamentos distintos em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) para a densidade relativa aparente e a densidade a granel (Figura 13).



**Figura 13** - Densidade Relativa Aparente (DRA) e Densidade a Granel (DG) do carvão vegetal obtido dos materiais genéticos (C41, C11 e C39) em função da área útil (2 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>).

Os dois clones de *E. urophylla* apresentaram comportamento distintos quando se compara a densidade relativa do carvão com a sua respectiva densidade a granel (Figura 13). Como já mencionado para a madeira, este comportamento não é esperado, pois são variáveis que apresentam correlação direta e positiva.

Rocha (2011) ao avaliar clones de *Eucalyptus* (híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis*) sob diferentes espaçamentos, não verificou efeito significativo para a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Reis et al. (2012b) estudando clones de *E. urophylla* aos 7 anos de idade plantados no estado de Minas Gerais em diferentes espaçamentos e locais de plantio, assim como Rocha (2011) não observaram efeito do espaçamento na densidade relativa aparente.

O crescimento da densidade a granel do carvão vegetal não acompanhou o aumento da densidade relativa aparente, para os clones e os espaçamentos avaliados (Tabela 6). Como já mencionado, esse comportamento da densidade a granel pode estar associado a granulometria dos cavacos, uma vez que não foram padronizados.

Segundo Brito et al. (1982) a não padronização do grau granulométrico das partículas pode interferir nos resultados da densidade a granel. Os mesmos autores ao avaliarem materiais genéticos de *Eucalyptus* verificaram a existência de uma correlação altamente significativa entre a densidade relativa aparente e a densidade a granel do carvão vegetal, no qual, obtiveram uma DG média de  $0,188 \text{ g cm}^{-3}$ .

#### 4.2.2 Química imediata do carvão vegetal

Na Tabela 7 verifica-se os valores médios para teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos tratamentos analisados (clones x espaçamentos). Com exceção do teor de cinzas, as demais variáveis diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 7** - Valores médios dos teores de umidade (TU), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) avaliados no carvão vegetal obtidos de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS		VARIÁVEIS (%)			
Clone x Espaçamento		TU*	MV*	CZ <sup>ns</sup>	CF*
<b>T1</b>	2 m x 1 m	4,79 b	35,11 a	0,95	63,94 c
<b>T2</b>	<b>C41</b> 3 m x 2 m	5,84 a	29,64 b	0,91	69,46 b
<b>T3</b>	4 m x 2 m	4,97 b	27,49 c	1,07	71,45 a
<b>T4</b>	2 m x 1 m	5,23 a	27,65 c	1,28	71,08 a
<b>T5</b>	<b>C11</b> 3 m x 2 m	4,23 b	27,72 c	1,27	71,02 a
<b>T6</b>	4 m x 2 m	5,52 a	30,54 b	1,08	68,38 b
<b>T7</b>	2 m x 1 m	5,37 a	30,52 b	0,92	68,57 b
<b>T8</b>	<b>C39</b> 3 m x 2 m	5,02 b	29,78 b	0,92	69,30 b
<b>T9</b>	4 m x 2 m	4,66 b	28,76 c	1,03	70,21 a
<b>MÉDIA</b>		5,07	29,69	1,05	69,27
<b>DESVIO PADRÃO</b>		0,679	2,766	0,364	2,697
<b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</b>		13,389	9,315	34,803	3,893

\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

No presente estudo, as cinzas não sofreram influência dos tratamentos e a média geral foi levemente acima do verificado para o gênero (Tabela 7). Geralmente são encontrados baixos teores de cinzas para carvão vegetal proveniente de materiais genéticos de *Eucalyptus*, no qual, de acordo com Santos (2010) o teor recomendado deverá ser inferior a 1%.

As cinzas no carvão vegetal além de não contribuírem para aumento do poder calorífico, ainda provocam desgaste no alto forno e quando utilizado para produção do ferro-gusa comprometem sua qualidade, pois uma alta presença das mesmas no carvão pode indicar possível contaminação do carvão com resíduos minerais do solo (SANTOS, 2010).

Santos et al. (2011) ao avaliarem a química imediata do carvão obtido de diferentes clones de *Eucalyptus* com 7 anos de idade e plantados no espaçamento 3m x 3m, não verificaram diferença significativa para o teor de cinzas. Pereira et al. (2012) também não observaram influência dos materiais de *E. urophylla* com 7 anos de idade e instalados em 3,8m x 2,4m para teor de cinzas do carvão.

Resultados inferiores para o teor de cinzas foram verificados para Ramos et al. (2019), Castro et al. (2016), Soares et al. (2015), Soares et al. (2014), Pereira et al. (2012), Neves (2012), Reis et al. (2012) e Santos et al. (2011) ao avaliarem materiais genéticos de *Eucalyptus* com mais de 7 anos de idade. Andrade et al. (2018) obtiveram valor médio para o *E. urophylla* com 6 anos de idade semelhante a este trabalho.

O tratamento 1 (clone 41 instalado no espaçamento 2m x 1m) foi o único que se diferenciou estatisticamente dos demais, apresentando o maior teor de materiais voláteis e o menor teor de carbono fixo (Tabela 7). Os demais tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, porém é importante ressaltar que foi verificado comportamento inversamente proporcional entre os teores de carbono fixo e materiais voláteis.

De maneira geral, foram observados altos teores de materiais voláteis para todos os tratamentos analisados, pois de acordo com Santos (2008) o teor de MV no carvão situa-se entre 20% e 25%, e o menor teor obtido no presente estudo foi de 27,49%. Um alto teor de materiais voláteis é indesejável quando se

trabalha com carvão vegetal para finalidades energéticas, uma vez que o mesmo é inversamente proporcional ao teor de carbono fixo.

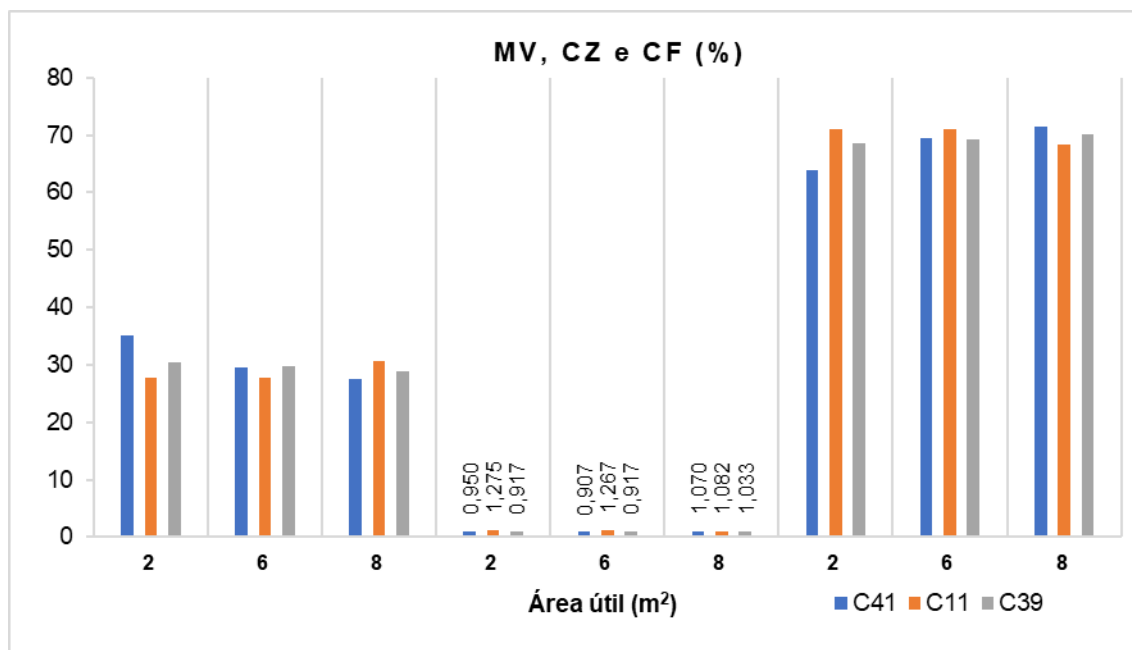
Frederico (2009) comenta que um alto teor de materiais voláteis além de ocasionar uma menor eficiência energética, produz muita fumaça, fator não desejável ao visar o uso doméstico do carvão. E de acordo com Santos (2008) teores inferiores a 25% são desejados para uso siderúrgico. Todavia, para o uso siderúrgico é necessário a presença de uma fração significativa de materiais voláteis, uma vez que, essa característica determina a estabilidade da chama e a velocidade da combustão, pois proporciona a diminuição da reatividade do carvão vegetal e o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno (SANTOS, 2010).

Os resultados verificados para os teores de carbono fixo e materiais voláteis, podem estar relacionados ao processo de carbonização, no qual, para melhorar estes valores pode-se aumentar a temperatura final de carbonização e/ou a taxa de aquecimento. Segundo Oliveira et al. (2010) a temperatura é o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo no carvão, com isso, aumentando a temperatura final de carbonização, menores serão o rendimento gravimétrico e o teor de materiais voláteis, maior o teor de carbono fixo e conseqüentemente maior o poder calorífico superior (NEVES, 2011).

Os valores médios para o teor de carbono fixo variaram de 63,94% a 71,45% (Tabela 7), resultados inferiores ao recomendado pela literatura (CF > 75%) ao trabalhar com carvão vegetal para energia. Esses resultados devem, de fato, estar ligados ao processo de carbonização, no qual, a degradação térmica incompleta do material proporcionou altos teores de RG e MV e teor de baixo CF (OLIVEIRA et al., 2010).

Rocha (2011) e Nones et al. (2015) também obtiveram resultados abaixo de 75% para o teor de carbono fixo ao analisarem o carvão de um híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* aos 7 anos de idade, e *E. benthamii* aos 5 anos de idades, respectivamente. Porém, em muitos trabalhos são verificados resultados superiores ao presente estudo ao avaliarem materiais genéticos de *Eucalyptus* com mais de 7 anos de idade, como por exemplo: Ramos et al. (2019), Castro et al. (2016), Soares et al. (2015), Soares et al. (2014), Neves (2012), Reis et al. (2012) e Santos et al. (2011).

Com exceção do clone 11 (*E. brassiana*) os demais apresentaram comportamento semelhante para o teor de carbono fixo e teor de materiais voláteis em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) (Figura 14).



**Figura 14** – Teores de Materiais Voláteis (MV), Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF) do carvão vegetal obtido dos materiais genéticos de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11) em função da área útil (2 m<sup>2</sup>, 6 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>).

Os dois clones de *E. urophylla* estudados apresentaram acréscimos no teor de carbono fixo e conseqüentemente redução no teor de materiais voláteis com o aumento da área útil. Já para o clone de *E. brassiana* o aumento do espaçamento proporcionou decréscimo no teor de carbono fixo e acréscimo do teor de voláteis (Figura 14). O comportamento inverso entre o CF e MV é esperado uma vez que são variáveis inversamente proporcionais. Já para o teor de cinzas, não foi observado relação com as demais variáveis, isso pode ser justificado pelo fato de o mesmo não ser estatisticamente significativo.

Reis et al. (2012) ao estudarem o efeito do espaçamento de plantio sob as propriedades do carvão vegetal provenientes de clones de *E. urophylla*, não observaram efeito significativo dos espaçamentos (3m x 3m e 4m x 3m) para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Rocha (2011) também não verificou efeito dos espaçamentos de plantio (3m x 0,5m, 3m x 1m, 3m x 1,5m,

3m x 2m e 3m x 3m) na química imediata do carvão vegetal de *E. grandis* x *E. camaldulensis*.

Em relação ao clone C39 (*E. urophylla*) os acréscimos no teor de carbono fixo com o aumento do espaçamento são inferiores a 1%, então são indicados para o plantio das árvores os menores espaçamentos, uma vez que, maior será a produção volumétrica por unidade de área sem afetar a composição química imediata do carvão vegetal. O mesmo comportamento é verificado para o clone de *E. brassiana*, já para o clone C41 o acréscimo no teor de CF proporcionado do menor espaçamento de plantio (2m x 1m) em comparação ao maior (3m x 2m) é superior a 7%.

#### 4.2.3 Poder calorífico e densidade energética

Na Tabela 8 verifica-se os valores médios para o poder calorífico e densidade energética do carvão vegetal para os tratamentos analisados (clones x espaçamentos). Todas as variáveis diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

**Tabela 8** - Valores médios de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (DE) avaliados no carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), considerando três espaçamentos iniciais de plantio.

TRATAMENTOS Clone x Espaçamento		VARIÁVEIS			
		PCS*	PCI*	PCU*	DE*
		kcal kg <sup>-1</sup>			kcal m <sup>-3</sup>
<b>T1</b>	2 m x 1 m	6710,14 d	6386,68 d	6051,98 b	2493,21 c
<b>T2</b>	<b>C41</b> 3 m x 2 m	6972,52 b	6649,06 b	6226,07 b	2850,67 b
<b>T3</b>	4 m x 2 m	7060,11 a	6736,65 a	6372,05 a	2925,33 b
<b>T4</b>	2 m x 1 m	7034,89 a	6711,43 a	6329,48 a	2510,00 c
<b>T5</b>	<b>C11</b> 3 m x 2 m	7032,15 a	6708,69 a	6399,81 a	3474,96 a
<b>T6</b>	4 m x 2 m	6914,55 c	6591,09 c	6194,09 b	3356,30 a
<b>T7</b>	2 m x 1 m	6930,16 c	6606,70 c	6219,91 b	3195,33 a
<b>T8</b>	<b>C39</b> 3 m x 2 m	6964,87 b	6641,41 b	6277,74 b	3162,69 a
<b>T9</b>	4 m x 2 m	7003,05 b	6679,59 b	6340,65 a	3238,21 a
<b>MÉDIA</b>		6958,048	6634,588	6267,976	3074,654
<b>DESVIO PADRÃO</b>		126,420	126,420	134,159	437,879
<b>COEFICIENTE DE VARIANÇA (%)</b>		1,817	1,905	2,140	14,485

\*médias seguidas da mesma letra na mesma coluna não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste de Scott-Knott.

Os valores verificados para o poder calorífico superior e inferior variaram de 6710,14 kcal kg<sup>-1</sup> a 7060,11 kcal kg<sup>-1</sup> e 6386,68 kcal kg<sup>-1</sup> a 6736,65 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente, com os tratamentos T3, T4 e T5 apresentando os melhores resultados. Todos os tratamentos analisados exibiram valores médios para o PCS inferiores ao recomendado pela literatura para o carvão vegetal quando destinado para finalidades energéticas (7.500 kcal kg<sup>-1</sup>).

Frederico (2010), Santos (2010) e Oliveira et al. (2010) ao estudarem o poder calorífico superior de carvão vegetal, provenientes de clones de *Eucalyptus*, obtiveram resultados superiores a 8.000 kcal kg<sup>-1</sup> (8.129 kcal kg<sup>-1</sup> a 8.389 kcal kg<sup>-1</sup>, 8.210 kcal kg<sup>-1</sup> a 8.515 kcal kg<sup>-1</sup> e 8.023 kcal kg<sup>-1</sup> a 8.339 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente). Já autores como Reis et al. (2012), Nones et al. (2015), Soares et al. (2015) e Castro et al. (2016) verificaram valores inferiores a 7.500 kcal kg<sup>-1</sup> ao trabalharem com carvão de *Eucalyptus*.

Resultados para o poder calorífico abaixo do verificado por outros autores ao trabalharem com o gênero *Eucalyptus*, podem ser atribuídos aos baixos teores de carbono fixo no carvão vegetal e, conseqüentemente, altos teores de materiais voláteis, como também a determinação teórica do PC realizada através da composição química imediata do carvão. Portanto, para resultados mais precisos para o PC, indica-se a determinação experimental através de bomba calorimétrica, uma vez que as equações para estimativa das variáveis imediatas apresentam uma margem de erro considerável.

Através dos resultados obtidos, verifica-se também que a distribuição dos tratamentos para PCS e PCI foram iguais, formando inclusive a mesma quantidade de grupos (4 grupos). Para o PCU e DE a distribuição dos tratamentos não seguiram o mesmo padrão, em contrapartida, para todas as variáveis supracitadas observa-se o T5 exibindo os maiores valores e o T1 os menores.

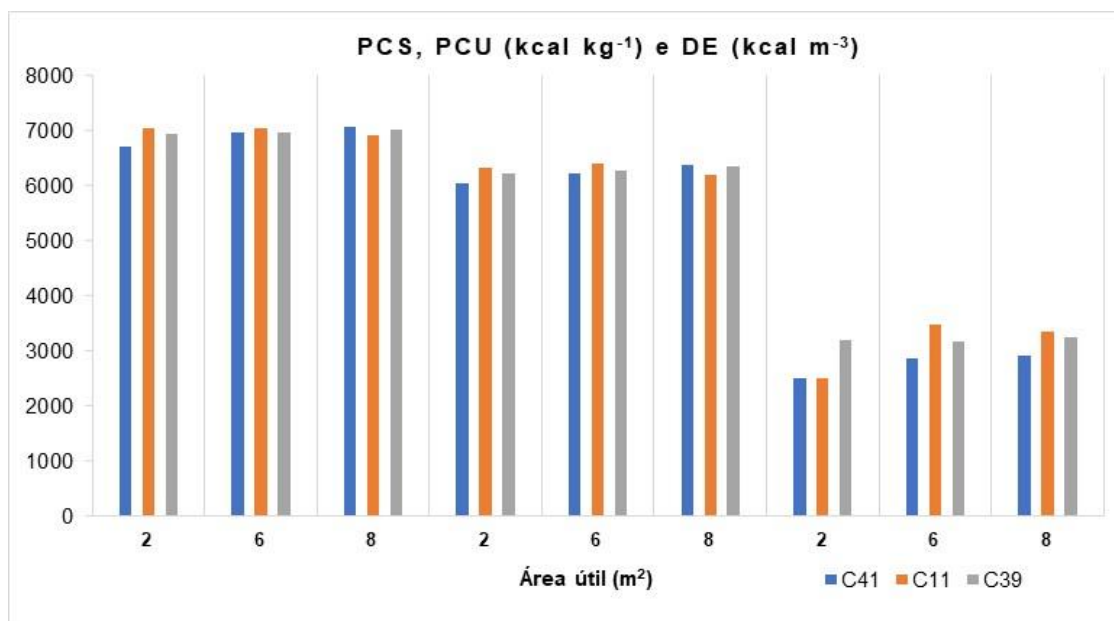
Os valores de densidade energética variaram de 2.493,21 kcal m<sup>-3</sup> a 3.627,88 kcal m<sup>-3</sup>, apresentando média de 3.074,65 kcal m<sup>-3</sup> (Tabela 8). Para finalidades energéticas são requeríveis carvões com altas DE, pois representa o potencial energético do combustível.

Essa propriedade está diretamente relacionada ao PCS e densidade relativa aparente do carvão vegetal, no qual, observa-se que os tratamentos



avaliados se distribuíram igual a DRA. Então, carvões com maior densidade apresentarão maior DE.

Com exceção do clone 11 (*E. brassiana*) os demais apresentaram comportamento semelhantes para o poder calorífico (superior, inferior e útil) e densidade energética em função da área útil (proporcionada pelo espaçamento de plantio) (Figura 15).



**Figura 15** - Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e Densidade Energética (DE) do carvão vegetal obtido dos materiais genéticos de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11) em função da área útil (2 m², 6 m² e 8 m²).

Os clones de *E. urophylla* apresentaram os melhores valores para as três propriedades avaliadas quando plantados em espaçamento mais amplos (4m x 2m). Esses resultados podem estar relacionados as outras características do carvão vegetal, pois observa-se que as maiores áreas úteis também proporcionaram as maiores densidades relativas aparentes, maiores teores de carbono fixo e menores teores de materiais voláteis. Para o clone de *E. brassiana* o espaçamento intermediário (3m x 2m) mostrou-se superior aos demais.

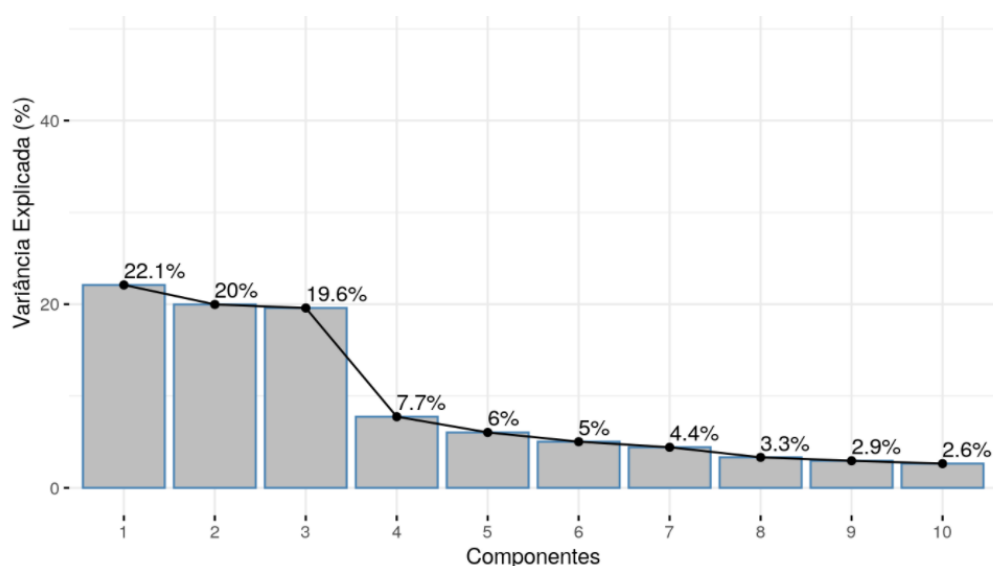
Reis et al. (2012) ao estudarem clones de *E. urophylla* com 7 anos de idade não verificaram efeito do espaçamento para o poder calorífico. Rocha et al. (2017) ao avaliarem a influência do espaçamento no plantio de um híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis* nas propriedades do carvão, não verificaram influência para o poder calorífico.

Em relação ao teor de umidade, propriedade que afeta negativamente a qualidade do carvão vegetal em seus diferentes usos, não foi constatada relação do mesmo com o poder calorífico do carvão, uma vez que, o teor de umidade verificado encontra-se dentro do recomendado por Santos (2008) (2% a 8%), variando de 4,23% a 5,84%. Frederico (2009) comenta que a redução no poder calorífico com o aumento da umidade está relacionada a perda de energia com a secagem do combustível e o aumento da friabilidade e, conseqüentemente, da perda de resistência mecânica e da geração de finos.

Segundo Frederico (2009) o poder calorífico da madeira não influencia no poder calorífico do carvão vegetal, e isto é verificado no presente trabalho, seja avaliando os tratamentos no geral ou os clones em função da área útil. De toda forma, a principal utilização do carvão vegetal é como combustível, pois apresenta poder calorífico maior comparado a madeira, além de facilidade na ignição, combustão intensa, estável e prolongada, e produção de pouca fumaça.

### 4.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

Observa-se que as três primeiras componentes principais explicaram 61,7% da variância dos dados originais (22,1%, 20% e 19,6%, respectivamente) (Figura 16). Desta forma, as informações mais relevantes dos dados amostrais originais estão contidas nessas três componentes principais.

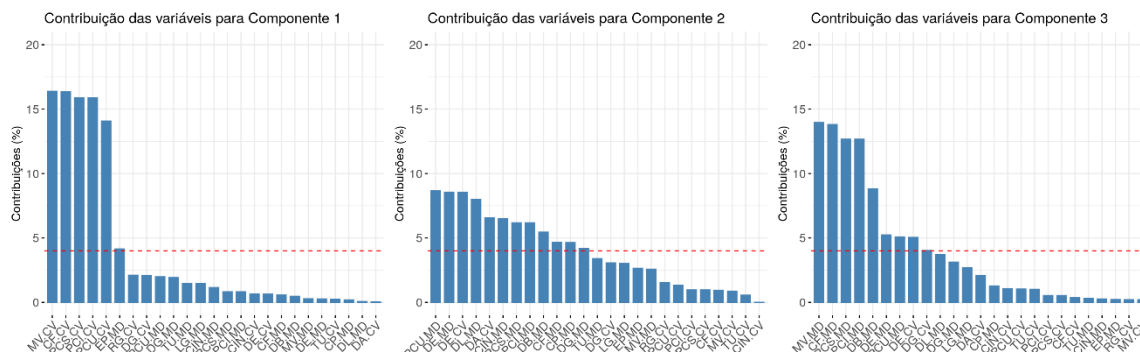


**Figura 16** - Contribuições das variáveis nas componentes principais da madeira do carvão vegetal.

De acordo com Rencher (2002) a quantidade de componentes principais deve reter componentes suficientes para contabilizar uma porcentagem especificada da variância total, ou seja, devem reduzir a massa de dados, com menor perda possível de informações. Em muitos trabalhos na área de ciências florestais, verifica-se que as duas primeiras componentes principais são responsáveis por explicar mais de 50% da variância total das características.

Castro et al. (2013) ao avaliarem a qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* com diferentes idades destinados para produção de carvão vegetal, verificaram que as duas componentes principais representaram 72% da variância total. Protásio et al. (2014) também verificaram alta variância explicada pelas duas primeiras componentes principais (78%) ao avaliarem a qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* para fins energéticos.

Ao analisar a contribuição de cada variável nas componentes principais (Figura 17), verifica-se que todas as variáveis com maior contribuição para a componente 1 são referentes ao carvão vegetal (teores de materiais voláteis e carbono fixo e poder calorífico superior, inferior e útil).

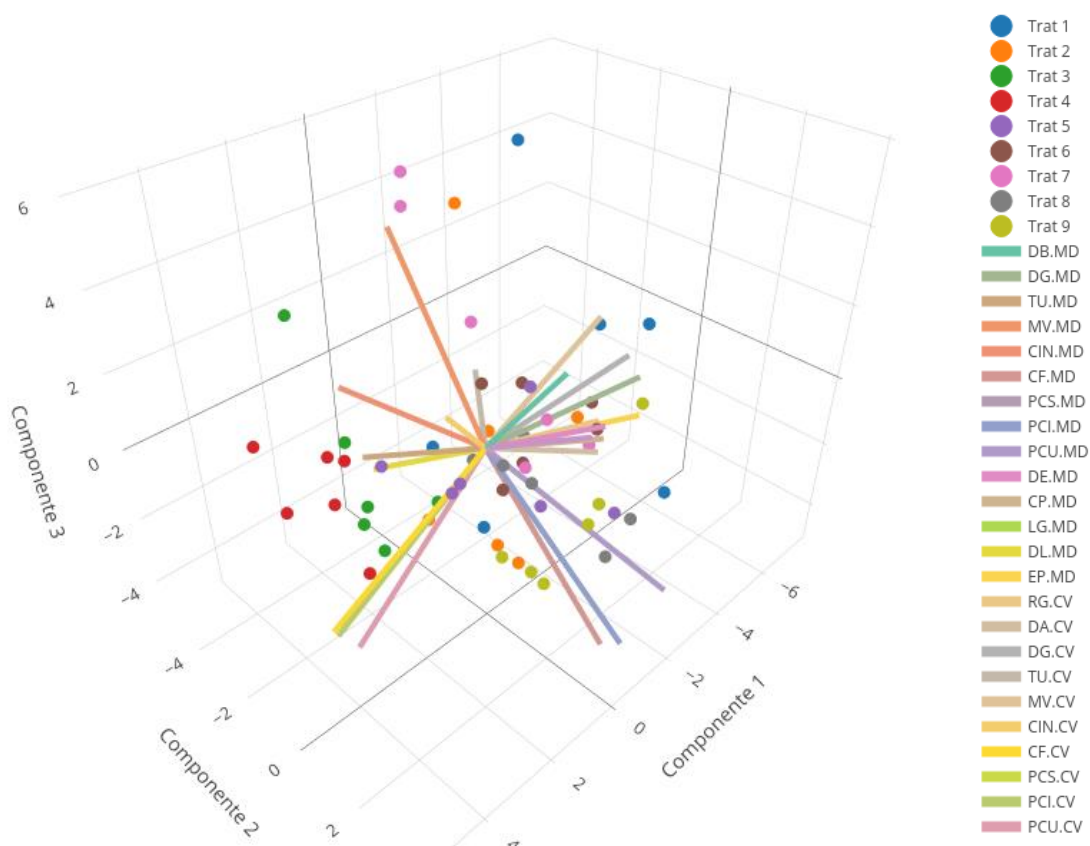


**Figura 17** - Contribuições das variáveis nas componentes principais da madeira e do carvão vegetal.

Para a componente 2, as variáveis com maior contribuição foram: poder calorífico útil, densidade energética, diâmetro do lume e comprimento das fibras, densidade básica, teores de carbono fixo e cinzas, poder calorífico superior e inferior (propriedades da madeira); densidade energética e densidade relativa aparente (propriedades do carvão vegetal).

As variáveis da madeira (teores de materiais voláteis e carbono fixo, poder calorífico superior, inferior e útil, e densidade básica e energética) foram as que mais contribuíram para a componente principal 3.

Através do gráfico biplot (Figura 18) pode-se observar para as variáveis analisadas na madeira, forte correlação positiva entre o carbono fixo, o poder calorífico superior e o inferior, estando também correlacionadas com o poder calorífico útil, as densidades (básica, a granel e a energética), o comprimento e a espessura da parede das fibras. Essas variáveis correlacionam-se negativamente com o diâmetro do lume das fibras e com os teores de cinzas, umidade e materiais voláteis.



**Figura 18** - Diagrama de ordenação dos tratamentos considerando os escores e autovetores das componentes principais 1, 2 e 3.

Para o carvão vegetal, observa-se uma forte correlação positiva entre o poder calorífico (superior, inferior e útil) e o carbono fixo, já entre estas e o teor de materiais voláteis existe uma forte correlação negativa. Essa correlação negativa é esperada, uma vez que, são variáveis inversamente proporcionais. Além disso, o poder calorífico está diretamente associado ao teor de carbono

fixo, pois os mesmos foram estimados com base na química imediata do carvão vegetal.

Pode-se afirmar que existe uma forte correlação positiva entre as densidades básica, relativa aparente e energética (madeira e carvão vegetal), já entre estas e a largura e o diâmetro do lume das fibras da madeira há uma forte correlação negativa. Castro et al. (2016) verificaram correlação positiva entre a densidade básica e a densidade relativa aparente.

O resultado da correlação das DB e DRA e suas respectivas densidades energéticas era esperada, uma vez que, a densidade energética é uma propriedade obtida indiretamente através do produto entre a densidade (madeira ou carvão vegetal) e seu poder calorífico superior. Silva et al. (2015) observaram correlação positiva entre a densidade básica e a densidade energética da madeira.

A correlação negativa entre as densidades e a largura e diâmetro do lume das fibras também era esperado, pois, como já mencionado, quanto maior a quantidade de espaços vazios na madeira menor será a quantidade de massa, e conseqüentemente, menores serão as densidades. Pereira et al. (2016) ao avaliarem clones de *Eucalyptus* observaram correlação negativa da densidade básica com o diâmetro do lume das fibras. Takarada (2015) também estudando material de *Eucalyptus* verificou correlação negativa da densidade relativa aparente com o diâmetro do lume e largura das fibras.

Isso mostra que as variáveis anatômicas da madeira são de grande importância para a qualidade do produto final, visto que interferem diretamente na densidade básica da madeira e, posteriormente, na densidade aparente do carvão vegetal. Pereira et al. (2016) afirmam que os parâmetros anatômicos tem correlações significativas com a densidade da madeira e do carvão vegetal.

As propriedades da química imediata da madeira (com exceção do teor de cinzas) não se correlacionam com as do carvão vegetal, o mesmo é verificado para o poder calorífico. Entre as cinzas da madeira e do carvão vegetal, verifica-se uma correlação positiva, e isto ocorre porque esse componente não é afetado significativamente durante a pirólise (SOARES et al., 2014).

Soares et al. (2014) estudando híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* em três idades distintas, não encontraram correlação significativa entre o poder calorífico da madeira e do carvão. Castro et al. (2016) obtiveram o mesmo

resultado ao avaliar diferentes materiais de *Eucalyptus* com 7 anos. Santos et al. (2011) ao avaliarem quatros materiais genéticos de *Eucalyptus* com 7 anos de idade, verificaram correlação significativa entre o poder calorífico superior da madeira e do carvão vegetal em apenas um material.

Conforme os autovetores e escores das componentes principais pode-se observar que os tratamentos 6, 8 e 9 possuem para madeira altos valores de poder calorífico e carbono fixo, com o T9 apresentando baixo teor de materiais voláteis e cinzas. Os tratamentos 2 e 7 apresentaram carvão vegetal com alto teor de umidade.

O tratamento 1 se destacou como um único grupo e possui os níveis mais elevados de materiais voláteis para o carvão vegetal e, por consequência, baixos poder calorífico (superior, inferior e útil) e carbono fixo. Este tratamento também apresentou fibras de maior largura. O tratamento 5 também formou apenas um grupo e apresentou carvões e madeira com altas densidades e carvão com bom poder calorífico útil.

Para os tratamentos 3 e 4 observou-se madeira com altos teores de umidade e cinzas, no qual, o T3 apresentou carvão vegetal com alto poder calorífico (superior, inferior e útil) e carbono fixo, e o T4 fibras com maior diâmetro do lume. Esses resultados corroboram com o teste de médias realizado.

Os resultados obtidos com a análise de componentes principais corroboraram com o teste de médias realizado, indicando que essa análise multivariada pode agrupar e identificar o potencial uso dos tratamentos a partir das propriedades da madeira e do carvão vegetal. Lobão et al. (2011) ao aplicarem essa análise multivariada concluíram que a mesma foi mais eficiente em comparação ao teste de Scott-Knott no agrupamento e recomendação quanto o uso da madeira. Castro et al. (2013) mencionam que a PCA é eficiente para ranquear os materiais quanto a qualidade da madeira.

De modo geral, a baixa influência do espaçamento nas propriedades da madeira e do carvão vegetal nos clones de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade, possibilita ao silvicultor a implantação de florestas em espaçamentos reduzidos, maximizando o uso da terra, caso seja operacionalmente possível e economicamente viável, sendo importante a realização de outras análises como química elementar, química estrutural e termogravimetria, uma vez que interferem diretamente nas propriedades energéticas dos materiais

## 5. CONCLUSÕES

Os tratamentos avaliados (clone x espaçamento) não influenciaram de forma significativa os teores de materiais voláteis e carbono fixo da madeira, e o rendimento gravimétrico e o teor de cinzas no carvão vegetal.

Mesmo quando verificado significância nas propriedades da madeira e do carvão vegetal, a variação desses valores entre os tratamentos foi discreta. O mesmo ocorreu para a influência da área útil nos diferentes materiais genéticos.

A análise de componentes principais é eficiente na avaliação da qualidade da madeira e do carvão vegetal para finalidades energéticas.

Tomando como base todas as propriedades avaliadas na madeira e no carvão vegetal, os clones de *Eucalyptus urophylla* (C41 e C39) e *Eucalyptus brassiana* (C11), plantados no espaçamento 2 m x 1 m, são os menos indicados para finalidades energéticas.

O clone C11 de *E. brassiana* instalado no espaçamento intermediário (3m x 2m) e o clone C39 de *E. urophylla* instalado nos espaçamentos 3m x 2m e 4m x 2m são os melhores materiais genéticos para finalidades energéticas com base nas variáveis analisadas.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. L. **Diagnóstico ambiental e questões estratégicas: uma análise considerando o polo gesseiro do sertão do Araripe - estado de Pernambuco.** 204 f. Tese, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002.
- ANDRADE, F. W. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V. H. P. Influence of Wood Physical Properties on Charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, 2018.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J. C.; GOULART, S. L.; BARAÚNA, E. E. P.; ABREU NETO, R. Anatomy of Charcoal and Carbonization Effect under *Eucalyptus* Fibers' Dimensions. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, 2020.
- ARRIEL, T. G. **Espectroscopia no infravermelho próximo na predição de características da madeira em clones de *Eucalyptus*.** 63f. Dissertação, Universidade Federal de Lavras, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9165:** carvão vegetal: determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11941:** madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, p. 6, 2003.
- ASSOCIAÇÃO TÉCNICA CIENTÍFICA ERNESTO LUIZ DE OLIVEIRA (ATECEL). **Diagnóstico energético do setor industrial do polo gesseiro da meso região de Araripina-PE.** 126 p. Embrapa, Campina Grande, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM D 1762-84). **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.** 1995.
- AZEVEDO, C. H. S.; SANTOS, F. G.; ANDRADE, L. V. O.; SILVA, A. G.; SANTOS, F. E. V. Influência da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, n.16, p. 1279-1287, 2013.
- BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Rochas e minerais industriais:** gipsita. 2ª edição, cap. 23, p. 505-526, 2008.
- BARRICHELO, L. E. G. **Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp.** In: Congresso Florestal Brasileiro, 1992, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: SBF, p. 726-731, 1992.
- BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. F. Processo nítrico-acético para maceração de madeira. **Silvicultura**, v.8, n.28, p. 732-733, 1983.



BARROS, M. L.; SILVA, R. G. C.; PADILHA, M. C. S.; SÁ, A. **Caracterização energética de *Eucalyptus* sp. provenientes de dois tratamentos do solo em alagoas.** Congresso Brasileiro de Eucalipto, p. 4, 2019.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. C.; MIRANDA, J. L. F.; SOUZA JR, L. C.; GALVÃO, M. J. T. G.; PEREIRA, S. N. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea:** diagnóstico do município de Araripina, estado de Pernambuco. CPRM/PRODEEM, 2005.

BISSET, I. J. W.; DADWELL, H. E. The variation of fibre length within one tree of *Eucalyptus regnans*. **Australian Forestry**, v. 13, n. 2, p. 86-96, 1949.

BRAND, M. A. **Energia e biomassa florestal.** Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRITO, A. S. **Efeito do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira em árvores jovens de eucalipto.** 44 f. Dissertação - Universidade Federal do Espírito Santo. 2017.

BRITO, J. O. BARRICHELO, L. E. G. Correlação entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: densidade e teor de lignina na madeira de eucalipto. **IPEF**, n. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, 1978.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, v. 14, n. 14, p. 9-20, 1997.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF**, n. 20, p. 101-113, 1980.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. **Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal partir de sua densidade aparente.** Circular técnica N° 150. IPEF, 1982.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **IPEF**, n. 23, p. 53-56, 1983.

BRUN, E. J.; BERSCH, A. P.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; BARBA, Y. R.; DORINI JR, J. R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Floresta**, v. 48, n. 1, p. 87-92, 2018.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; DONATO, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Florestalis**, v. 44, n. 112, p. 831-40, 2016.

CARMONA, I. N.; SAMPAIO, J. S.; COELHO, S. R. S.; MOUTINHO, V. H. P.; ANDRADE, F. W. C. Caracterização energética do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* plantados no oeste do Pará. **Revista Agroecossistemas**, v. 11, n. 2, p. 57-65, 2020.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C. D.; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, 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.

CARRILLO, I.; AGUAYO, M. G.; VALENZUELA, S.; MENDONÇA, R. T.; ELISSETCHE, J. P. Variations in wood anatomy and fiber biometry of *Eucalyptus globulus* genotypes with different wood density. **Wood research**, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2015.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha.** 120f. Dissertação. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CASTELO, P. A. R. **Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes sítios de crescimento e espaçamentos, através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão.** 137 f. Tese. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.

CLIMADATA. **Clima Araripina-PE.** Acesso em: 28 jun. 2019. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/araripina-42451/>>.

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - COPANT.  
**Descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira.** São Paulo, 1974.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, v.1, n.1, p. 71-92. 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sumário mineral 2006.** p. 304, 2006.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; SOARES, V. W.; COSTA JÚNIOR, D. S.; FERREIRA, D. H. A. A.; LELES, P. S. S. Potencial energético de sete materiais genéticos de *Eucalyptus* cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, v. 43, p. 833-843, 2015.

DONATO, D. B. **Métodos de Amostragem de determinação do teor de umidade da madeira em tora.** 58 f. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; TEIXEIRA, R. U. Teor de umidade da madeira em Tora. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 703-712, 2015.

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

FEUCHARD, L. D. **Influência do espaçamento de plantio e idade de colheita na qualidade da madeira de eucalipto para celulose.** 42 f. Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for *Eucalyptus* spp. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 3, p. 1-9, 2019.

FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z.; LIMA, I. L.; LONGUI, E. L. Variação nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos sete anos de idade. **Revista do Instituto Florestal**, v. 21, n. 1, p. 79-91, 2009.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal.** 73 f. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 13-32, 2017.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, 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.

GRUNDELIUS, R. Determining the basic density of wood chips. **Tappi journal**, v. 73, n. 4, p. 183-189, 1990.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). **Relatório IBA 2020**. 2020.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**, 3ª edição revisada. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LAZARETTI, D. S.; REIS, E. R.; SERAFIM, K.; SOUZA, M. H.; FRIZZO, S. M. B.; FOELKEL, C. E. B. **Variação radial da densidade básica em função da altura de árvores de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus saligna***. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ABTCP/abtcp.%20para%20site%202003b.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2020.

LOBÃO, M. S.; CASTRO, V. R.; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA JÚNIOR, F. G.; CAMARGO NETO, L.; BERMUDEZ, M. A. R. C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, v.39, p.469-477, 2011.

MELO, L. E. L.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; NASCIMENTO, D. F. R. Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus spp.* and *Corymbia citriodora*. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 611-621, 2016.

MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Influência das práticas silviculturais na produção de carvão vegetal. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n. 104, 1980.

MOULIN, J. C. **Produção de madeira de eucalipto de curta rotação em povoamentos adensados para energia**. 61 f. Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2013.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; OLIVEIRA, J. G. L.; CAMPINHOS, E.; GOMES, F.; VIDAURRE, G. B. Efeito do Espaçamento, Idade e Irrigação no Volume e Densidade Básica do Eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 10, 2017.

- NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais**. 94 f. Dissertação. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.
- NOGUEIRA, D. F. B. **Tempo de secagem de árvores de *Eucalyptus dunnii* e ajustes das facas do picador na qualidade de cavacos para fins energéticos**. 52 f. Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.
- NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2014.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. D. C.; 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, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.
- 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.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013a.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013b.
- PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. 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.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 8, 2012.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo, **Embrapa Florestas**, p. 113, 2000.

PROTÁSIO, T. D. P.; NEVES, T. A.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus spp.* visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 122-133, 2011a.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.

R CORE TEAM (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B. L. C. Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* Clones for Metallurgical Use. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, 2019.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277, 2012.

RENCHER, A.C. **Methods of Multivariate Analysis**. A John Wiley & Sons, Inc. Publication, p.727. 2ed. 2002.

ROCHA, F. T.; FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus*

*grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Revista Instituto Florestal**, v. 16, n. 1, p. 43-55, 2004.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; ZANUNCIO, A. J. V.; HEIN, P. R. G. Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 8, n. 2, 2017.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; DE CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARDOSO, M. T.; HEIN, P. R. G. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 243-248, 2016.

ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. **Energia da madeira**. Curitiba: Fupef, 1998.

RODRIGUES, T; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, 2019.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 1, n. 3, p. 33-40, 2003.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e na contração da madeira e no rendimento e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 57 f. Dissertação. Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, R. C. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. 173 f. Tese. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Sci. For.**, v. 39, p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsidiopara a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v.18, n.1, p.143-151, 2012.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. 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.

SARTÓRIO, I. P. **Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades**. 136 f. Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SEREGHETTI, G. C.; LANÇAS, K. P.; SARTORI, M. S.; REZENDE, M. A.; SOLER, R. R. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 257-262, 2015.

SETTE JÚNIOR, C. R.; OLIVEIRA, I. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Composição química da madeira de *Eucalyptus citriodora* em função das direções estruturais. **Silva Lusitana**, v. 14, n. 1, p. 113-126, 2006.

SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M.; FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 8, n. 2, 2017.

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.

SILVA, J. A. A. Potencialidades de florestas energéticas de *Eucalyptus* no Pólo Gesseiro do Araripe-Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 5/6, p. 301-319, 2008-2009.

SILVA, J. A. A.; ROCHA, K. D.; FERREIRA, R. L. C.; TAVARES, J. A. Produtividade volumétrica de clones de *Eucalyptus spp.* no polo gesseiro do Araripe, Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 10, p. 240-260, 2013.

SILVA, J. C. **Anatomia da madeira e suas implicações tecnológicas**. Universidade Federal de Viçosa, p. 140, 2005.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 160 f. Tese, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa



específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Floresta**, v. 34, n. 1, 2004.

SILVA, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. Influência de idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1081-1090, 2007a.

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta amazônica**, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007b.

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.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

SOUZA, C. O. **Potencial energético da madeira e carvão vegetal de angico vermelho (*Anadenanthera peregrina*) jovem**. 53 f. Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

SOUZA, F. M. L. **Estudo comparativo da madeira e polpação de *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* em dois modelos silviculturais**. 83 f. Dissertação. Universidade Estadual Paulista. 2012.

STEVANOVIC, T. Chemical composition and properties of wood. **Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook**, p. 49-106, 2016.

TAKARADA, L. M. **Efeito da morfologia das fibras das madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* na produção e qualidade do carvão vegetal**. 74 f. Dissertação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

TIENNE, D. L. M.; OLIVEIRA, J. N.; PALERMO, G. P. M.; SOUSA, J. S.; LATORRACA, J. V. F. Influência do espaçamento no ângulo das microfibrilas e comprimento de fibras de clone de eucalipto. **Revista Forestal Latinoamericana**, v. 24, n. 1, p. 67-83, 2009.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, v. 29, p. 37-45, 1985.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **IPEF**, n. 36, p. 35-42, 1987.

- TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, v. 38, n. 3, 2008.
- TREVISAN, R.; ROSA, M.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; GATTO, D. A. Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1385-1393, 2017.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; BARROS MENDES, L. F. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.
- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físicoquímicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v.2, n.1, p.94-111, 1996.
- VALENTE, O. F. Carbonização da madeira de eucalipto. **Informe Agropecuário**, n.1, p. 74-79, 1986.
- VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.
- ZANUNCIO, A. J. V.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R. Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 755-760, 2013.
- ZOBEL, B. J.; van BUIJTENEN, J. P. Wood variation: its causes and control. **Springer Science & Business Media**, p. 363, 2012.