



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**CAMILLA DE OLIVEIRA SOUZA**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E CARVÃO VEGETAL DE ANGICO  
VERMELHO (*Anadenanthera peregrina*) JOVEM**

JERÔNIMO MONTEIRO

2018

CAMILLA DE OLIVEIRA SOUZA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E CARVÃO VEGETAL DE ANGICO  
VERMELHO (*Anadenanthera peregrina*) JOVEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

JERÔNIMO MONTEIRO

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)  
Bibliotecária: Lizzie de Almeida Chaves – CRB-6 ES-000871/O

---

S719p Souza, Camilla de Oliveira, 1991-  
Potencial energético da madeira e carvão vegetal de angico  
vermelho (*Anadenanthera peregrina*) jovem / Camilla de Oliveira  
Souza. – 2018.  
53 f. : il.

Orientador: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientadores: Marina Donária Chaves Arantes ; Fabrício Gomes  
Gonçalves.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Carvão vegetal. 2. Madeira. 3. Angico-de-carço. I. Vidaurre,  
Graziela Baptista. II. Arantes, Marina Donária Chaves. III. Gonçalves,  
Fabrício Gomes. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de  
Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

---

POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E CARVÃO VEGETAL DE  
ANGICO VERMELHO (*Anadenanthera peregrina*) JOVEM

Camilla de Oliveira Souza

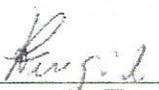
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2018.



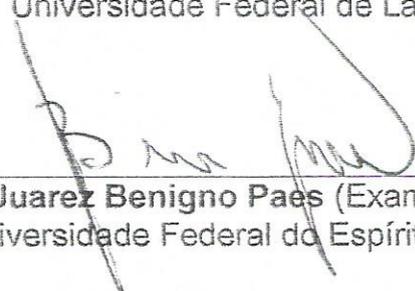
---

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior (Examinador externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo



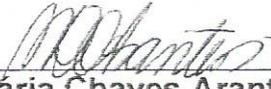
---

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho (Examinador externo)  
Universidade Federal de Lavras



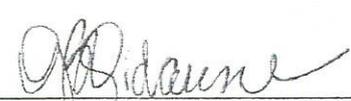
---

Prof. Dr. Juarez Benigno Paes (Examinador interno)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Profª. Drª. Marina Donária Chaves Arantes (Coorientadora)  
Universidade Federal de São João del-Rei



---

Profª. Drª. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz (Orientadora)  
Universidade Federal do Espírito Santo

Aos meus pais, Luiz Paulo e Adelia Maria;  
às minhas irmãs, Pollyana e Larissa;  
às minhas sobrinhas, Emily e Isabela;  
e ao meu companheiro, Thallis.  
Dedico...

*“Talvez seja por isso que Deus nos fez crianças primeiro e nos colocou mais perto do chão, porque Ele sabe que é preciso cair muito e sangrar muito para aprender essa simples lição. Você paga pelo que recebe; você é dono daquilo pelo que pagou... e mais cedo ou mais tarde, o que é seu volta para casa, para você.”*

It, a Coisa – Stephen King

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Edital FAPES nº 011/2013 – Pesquisa em agropecuária no Estado do Espírito Santo – PPE (Processo nº 65766261/2014), agradeço pelo suporte educacional, estrutural e financeiro, que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos meus professores, em especial a minha orientadora Graziela e coorientadores Marina Donária e Fabrício, que contribuíram com a minha formação acadêmica e profissional. Ao professor Joaquim Sande Silva, agradeço pelo acolhimento no Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal.

A minha banca examinadora, professores e doutores Paulo Fernando Trugilho, Juarez Benigno Paes e Ananias Francisco Dias Júnior, agradeço pela disponibilidade e cooperação na finalização deste trabalho.

Agradeço a Deus, aos meus pais, ao meu marido e aos demais familiares, pelo suporte motivacional. E aos meus amigos, em especial Márcia Fernanda, Damielle, João Gabriel, Rosane, Julyana e Glícia, agradeço pela amável companhia nos últimos anos.

Muito obrigada!

## **BIBLIOGRAFIA**

Camilla de Oliveira Souza, nascida em 20 de março de 1991, na cidade de Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, Brasil. Sob a filiação de Luiz Paulo Ferreira de Souza e Adelia Maria de Oliveira Souza.

Concluiu a ensino médio, na Escola Guimarães Rosa, localizada na sua cidade natal, em 2008. Ingressou no curso de Engenharia Florestal em 2009, pela Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre/ES.

Em 2012/2013 foi bolsista do Programa Nacional Ciência sem Fronteiras, no qual cursou parte da sua graduação no Instituto Superior de Agronomia, pertencente à Universidade de Lisboa, Portugal.

Tornou-se bacharela em Engenharia Florestal no ano de 2015, ingressando no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo, em nível de mestrado, no ano de 2016, onde teve a oportunidade de realizar estágio acadêmico, em 2017, no Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal.

## RESUMO

SOUZA, Camilla de Oliveira. **Potencial energético da madeira e carvão vegetal de angico vermelho (*Anadenanthera peregrina*) jovem**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre, Coorientadores: Marina Donária Chaves Arantes e Fabrício Gomes Gonçalves.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal da espécie *Anadenanthera peregrina* proveniente de plantio experimental, plantadas em cinco espaçamentos e carbonizadas em duas marchas com diferentes taxas de aquecimento. Para isso, foram avaliadas três árvores, com 56 meses de idade, por cada espaçamento (3x2; 3x3; 4x3; 4x4; e 5x5 m). De cada árvore foram extraídos cinco discos da base; de um disco foram retiradas cunhas opostas para a determinação das propriedades da madeira e os demais foram transformados em carvão vegetal em duas marchas de carbonização, sendo M1: taxa de aquecimento de 1,67°C e M2: 0,83°C min<sup>-1</sup>, para posterior determinação de suas propriedades. O espaçamento de plantio não influenciou as propriedades da madeira de angico vermelho, exceto os extrativos totais, mas teve efeito significativo nas propriedades do carvão vegetal; sendo os melhores parâmetros observados no espaçamento de plantio 3x3 m. As marchas de carbonização influenciaram as propriedades do carvão vegetal, sendo mais satisfatória a utilização da M2, por produzir carvões com maior teor de carbono fixo, menor teor de materiais voláteis, maiores poder calorífico superior, densidade relativa, densidade energética e rendimento gravimétrico. Contudo, a madeira e o carvão tiveram elevado teor de cinzas, sugerindo-se futuras análises para verificar se há diminuição dessa variável ao longo dos anos. Houve interação do espaçamento de plantio com as marchas de carbonização para as variáveis teor de cinzas, densidade relativa, densidade energética, rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis. Além disso, o teor de lignina da madeira se correlacionou positivamente com a densidade relativa do carvão vegetal e o teor de extrativos com o teor de cinzas do carvão.

**Palavras-Chave:** espécie nativa, espaçamento de plantio, carbonização.

## ABSTRACT

SOUZA, Camilla de Oliveira. **Energy potential of young wood and charcoal of *Anadenanthera peregrina***. 2018. Dissertation (Masters in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Graziela Baptista Vidaurre, Co-Advisor: Marina Donária Chaves Arantes and Fabrício Gomes Gonçalves.

The objective of this work was to evaluate the energy potential of the wood and charcoal of the species *Anadenanthera peregrina* from experimental planting, planted in five spacings and carbonized in two different marches. For this, three trees, approximately 5 years old, were evaluated by planting spacing (3x2, 3x3, 4x3, 4x4, and 5x5 m). Five discs of the base were extracted per tree; of one disc was made the determination of the properties of the wood and four discs were transformed into charcoal in two carbonization marches (M1: heating rate of 1.67°C and M2: 0,83°C min<sup>-1</sup>), for later determination of the properties of the charcoal. The planting spacing did not influence the properties of angico wood, except total extractives, but had a significant effect on the properties of charcoal; the best parameters observed in plant spacing 3x3 m. The carbonization marches influenced the properties of charcoal, the best marche was M2. But, wood and charcoal had a high ash content, suggesting future analyzes to verify if there is a decrease of this variable over the years. There was interaction of the planting spacing with the carbonization marches for the ash content, relative density, energy density, yields in pyroligneous liquid and non condensable gases. The lignin content of the wood correlated positively with the relative density of the charcoal and the extractive content with the ash content of the charcoal.

**Keywords:** native species, planting spacing, carbonization.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	9
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	11
	Objetivo geral	11
	Objetivos específicos	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	12
3.1	Angico vermelho	12
3.2	Importância ecológica e econômica do angico vermelho	13
3.3	Propriedades da madeira para a produção de carvão vegetal	15
3.4	Influência do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira	17
3.5	Processo de carbonização da madeira	18
3.6	Propriedades do carvão vegetal	20
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	23
4.1	Procedência e amostragem do material	23
4.2	Propriedades da madeira de angico vermelho	25
4.3	Carbonização da madeira e qualidade do carvão vegetal	26
4.4	Análises estatísticas dos dados	27
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	28
5.1	Propriedades da madeira	28
5.2	Propriedades do carvão vegetal	32
5.3	Correlação entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal	38
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	39
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	40

## 1 INTRODUÇÃO

Em função da ampla disponibilidade e tradição, desde décadas passadas, nota-se uma grande demanda da indústria florestal pela madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. Esse fato limita a utilização de espécies alternativas com maior potencial energético que, se bem manejadas, poderiam gerar carvão com propriedades e rendimentos mais satisfatórios.

O carvão vegetal é o principal redutor da siderurgia brasileira, sendo responsável pela produção em grande escala de ferro-gusa e ligas metálicas, contribuindo expressivamente para a economia nacional. Além da siderurgia, o carvão está presente no cotidiano da população, sendo amplamente utilizado em residências, padarias e churrasqueiras para a cocção de alimentos (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2017; TRUGILHO et al., 2001).

De modo geral, as espécies florestais brasileiras são pouco estudadas, restringindo a comercialização das mesmas em nível mundial. Essa escassez de informações prejudica a geração de produtos florestais mais adequados e dificulta a otimização industrial (TEIXEIRA et. al., 2011).

A geração de conhecimento científico é fundamental para a utilização racional dos recursos naturais, como a madeira. A madeira é um material biológico variável e de complexa constituição, que recebe influência genética e ambiental. Por causa dessa variabilidade, prosseguem questionamentos a respeito do espaçamento de plantio ideal para atender os mais diversos produtos madeireiros, principalmente, quando o objetivo é a produção de carvão vegetal. No caso do angico vermelho, esse tipo de conhecimento é necessário para a avaliação da sua viabilidade como espécie alternativa para a produção de carvão no Brasil.

Diversificar a utilização de espécies madeireiras, em especial as nativas, contribui para agregar valor a plantios destinados para a produção de energia e melhora a eficiência da cadeia produtiva nesse setor.

A espécie *Anadenanthera peregrina* (L.) Speng., conhecida como angico vermelho, possui ampla distribuição geográfica e madeira com propriedades desejáveis para a construção civil e fabricação de móveis. Além disso, possui potencial para a produção de lenha e carvão vegetal, uma vez que apresenta alto teor de lignina (LORENZI, 2009; MORI et al., 2003; PAULA; ALVES, 1997). Todavia,

outras características químicas e físicas da madeira, assim como o processo de carbonização, também afetam as propriedades do carvão vegetal.

A utilização da madeira de angico vermelho, muitas vezes, é restrita em determinadas regiões do Brasil e isso limita o manejo sustentável da mesma. Em propriedades rurais, o plantio integrado de árvores de angico vermelho com outra espécie florestal, agrícola ou pecuária, em sistemas agroflorestais ou plantios mistos, pode ser uma alternativa e fonte de renda extra ao pequeno e médio produtor, pois permite diversificar sua produção em uma determinada área. Além de contribuir para o enriquecimento do solo e o crescimento de outras espécies de interesse econômico e ecológico (RIBASKI, 2009).

O desenvolvimento de pesquisas para a utilização de novas espécies no setor energético, também pode contribuir para mudar os padrões da tecnologia de produção madeireira; induzir estudos e desenvolvimento na área de qualidade da madeira para energia; definir padrões qualitativos para a madeira e o carvão vegetal; incentivar, racionalizar e valorizar o plantio de florestas nativas; e ampliar a matriz energética brasileira.

Nesse contexto, questiona-se se a madeira de angico vermelho, com 56 meses de idade, possui propriedades desejáveis, sendo uma possível espécie alternativa para a produção de carvão vegetal.

## **2 OBJETIVOS**

### **Objetivo geral**

Avaliar o potencial energético da madeira e do carvão vegetal da espécie *Anadenanthera peregrina* proveniente de plantio experimental, plantadas em cinco espaçamentos e carbonizadas em duas marchas com diferentes taxas de aquecimento.

### **Objetivos específicos**

- Avaliar a influência do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira e do carvão vegetal;
- Avaliar a influência do processo de carbonização nas propriedades do carvão vegetal;
- Correlacionar as propriedades da madeira com as propriedades do carvão vegetal produzido.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Angico vermelho

O angico vermelho pertence à família Fabaceae e subfamília Mimosoideae. Seu gênero, *Anadenanthera*, abrange sete espécies (*A. cobi*, *A. colubrina*, *A. falcata*, *A. gonoantha*, *A. macrocarpa*, *A. peregrina* e *A. rígida*) com estreita semelhança morfológica em seus frutos, sementes e plântulas (COSTA; CONTINI; MELO, 2003). Essas espécies ocorrem nos biomas brasileiros do Cerrado e Mata Ciliar do Centro-Oeste, Caatinga, Mata Atlântica e Serra da Mantiqueira, assim como em outros países, como Argentina, Bolívia, Paraguai e Peru (PAULA; ALVES, 1997).

As árvores do angico vermelho possuem altura variando de 13 a 20 metros, diâmetro do tronco entre 40 e 60 centímetros, copa ampla; casca marrom-clara com presença de acúleos; e anéis de crescimento bem distintos, destacados por zonas fibrosas mais escuras, que ocasionam desenhos desejáveis para a fabricação de móveis (MARCATI, 1992; PAULA; ALVES, 1997).

As espécies de angico possuem alburno pardo rosado e cerne pardo avermelhado. O cerne também pode revelar uma tonalidade uniforme amarela e, ao longo do tempo, escurecer em tons de castanho. Sua madeira é densa, elástica e durável, tendo uma superfície pouco lustrosa e lisa (TEIXEIRA et al., 2011).

O cerne da madeira do angico vermelho é resistente e duro ao corte. Contém veias e estrias onduladas, que favorece os acabamentos em verniz, proporcionando um aspecto visualmente agradável ao material (TEIXEIRA et al., 2011).

Ao estudar a madeira de angico vermelho, Marcati (1992) não verificou problemas significativos de empenamento e fendilhamento nas tábuas de madeira adulta após o desdobro, porém, observou rachaduras, possivelmente ocasionados pela liberação das tensões de crescimento da árvore.

Apesar disso, Marcati (1992) e Mori et al. (2003) afirmaram que, essa espécie possui boa trabalhabilidade durante o seu beneficiamento, boa aceitação de vernizes e outros acabamentos e exhibe propriedades mecânicas semelhantes às madeiras de imbuia, peroba rosa, mogno brasileiro e andiroba.

O conhecimento da madeira do angico vermelho para fins energéticos é escasso e os trabalhos que abordam essa temática relacionam seu bom

desempenho energético apenas com o elevado teor de lignina que essa espécie normalmente apresenta (MORI et al., 2003; PAULA; ALVES, 1997). Contudo, outros parâmetros, como a origem e as propriedades da madeira, sua composição química, localização geográfica e manejo do plantio, são essenciais para determinar a utilização mais adequada para cada material.

### **3.2 Importância ecológica e econômica do angico vermelho**

Dentro do gênero *Anadenanthera*, a espécie *A. peregrina* é a que mais se destaca em distribuição geográfica no Brasil, pois possui uma grande capacidade de adaptação em ambientes com diferentes tipos de solos, sejam eles rasos, profundos ou compactados, secos, úmidos ou mal drenados (CARVALHO, 2003). Além desse comportamento pioneiro, o angico vermelho possui notoriedade ecológica, pois serve de poleiro para aves e como fonte de diásporos, que contribui com a chuva de sementes no local, favorecendo ainda mais os programas de recuperação de áreas degradadas (ARAÚJO et al., 2006; COSTA, CONTINI, MELO, 2003; DURIGAN et al., 1997).

As boas propriedades mecânicas da madeira e o rápido crescimento que a árvore de angico vermelho possui, quando comparada a outras espécies nativas, possibilita sua utilização na construção civil, naval e na fabricação de móveis, enquanto que sua casca, que é rica em tanino, pode ser empregada no curtimento de couro e na produção de adesivos para a produção de painéis de madeira reconstituída (CARNEIRO et al., 2009; LORENZI, 2000).

O angico vermelho é uma das principais plantas taníferas encontradas no Brasil, sendo um grande atrativo para os produtores das indústrias de painéis, pois os adesivos à base de taninos condensados são quimicamente mais estáveis e economicamente mais viáveis. Além disso, após a extração do tanino, a casca pode ser queimada e gerar energia para a produção de compostos orgânicos, como adubos, e contribuir para o desenvolvimento sustentável dos ecossistemas locais (CARNEIRO et al., 2009; SILVA, 1999).

A sustentabilidade dos ecossistemas vem sendo um dos principais enfoques de discursões internacionais, pois a utilização desordenada dos recursos naturais agravou o processo de fragmentação dos ecossistemas. Esse processo é

considerado uma das maiores ameaças a diversidade terrestre e acarreta inúmeros prejuízos ambientais, como a erosão do solo e o desaparecimento de espécies da fauna e da flora; e prejuízos sócioeconômicos, como a lixiviação dos fertilizantes no solo e o aparecimento de pragas em plantações anuais e perenes (PIRES; FERNANDEZ; BARROS, 2006).

As principais causas pela fragmentação dos ecossistemas são a extração madeireira; a supressão da floresta por meio de queimadas; a substituição da cobertura florestal nativa por reflorestamento com espécies exóticas; a expansão das atividades agropecuárias, práticas agrícolas convencionais e mecanizadas; e o crescimento urbano desordenado (RAMBALDI, OLIVEIRA, 2003).

Neste contexto, atualmente, o Brasil investe em diversas políticas públicas a fim de atrelar o desenvolvimento socioeconômico com a sustentabilidade e a proteção ambiental. Exemplos de programas que vem sendo empregados com esse objetivo é a implantação dos plantios florestais mistos e dos sistemas agroflorestais – SAFs.

Os SAFs são sistemas de cultivo múltiplos de utilização da terra, em que plantas lenhosas perenes são cultivadas em associação com plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas, agrícolas e forrageiras, podendo também haver integração com animais, em uma mesma unidade de área. Existem vários arranjos espacial e temporal para a implantação de um SAF, todos com suas peculiaridades, níveis de diversidade, interação e complexidade. Além disso, esses sistemas podem incorporar culturas já domesticadas para enriquecer os ambientes naturais, como as florestas nativas (HENKEL; AMARAL, 2008; SAIS; OLIVEIRA, 2018).

As práticas agroflorestais possuem objetivos ecológicos, que promovem a conectividade na paisagem e valorização da biodiversidade nativa; e objetivos socioeconômicos, que viabilizam a produção agrícola e florestal madeireira ou não madeireira, gerando emprego e renda nas propriedades rurais (SCHROTH et al., 2007).

Na produção de madeira, principalmente para a serraria, uma das práticas de manejo necessárias para o crescimento em diâmetro das árvores são os desbastes realizados nos primeiros anos de plantio (MAGALHÃES et al., 2007; LELES et al., 2001). A madeira abatida não pode ser destinada para a utilização estrutural ou fabricação de móveis, pois ainda não possui características adequadas para tais finalidades, mas no caso do angico vermelho, uma alternativa seria a produção do

carvão vegetal para a cocção de alimentos, a fim de atender do próprio produtor ou comercio local.

Desde que bem planejadas, a utilização integrada de árvores de angico vermelho com o eucalipto ou outra espécie florestal, agrícola ou pecuária, pode subsidiar a adequação legal de propriedades rurais no que tange à presença do componente florestal, tornando-se também uma alternativa viável para restaurar o ecossistema e gerar renda ao produtor.

### **3.3 Propriedades da madeira para a produção de carvão vegetal**

A variabilidade nas propriedades do carvão vegetal é fortemente influenciada pela matéria prima, pelo sistema de produção e pela cadeia produtiva, que podem ocasionar desperdícios durante o mau transporte e manuseio do carvão até o seu destino final e interferir, negativamente, nos custos de produção (TRUGILHO et al., 2001).

Padronizar todo o processo industrial é importante para diminuir a heterogeneidade do carvão vegetal, que hoje é um dos grandes problemas enfrentados pelas carvoarias brasileiras, pois afeta diretamente a qualidade do produto final (ROCHA et al., 2017; SOARES et al, 2015).

Inicialmente, devem-se selecionar matérias primas adequadas para serem carbonizadas, pois uma madeira com melhores propriedades para a produção de carvão irá aumentar os rendimento e melhorar as propriedades do mesmo.

Além da genética e do ambiente, as propriedades da madeira são afetadas pela idade da árvore, pelo espaçamento de plantio e pelo manejo silvicultural. Esses fatores causam consideráveis mudanças fisiológicas na árvore e, conseqüentemente, alteram as propriedades do carvão vegetal produzido a partir da mesma (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Dessa forma, as principais propriedades desejadas da madeira para a produção do carvão são: elevada densidade básica, elevado poder calorífico; elevado teor de lignina; baixo teor de cinzas e baixa umidade (OLIVEIRA et al, 2010; PROTÁSIO et al., 2011; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996).

A grande vantagem de utilizar madeiras com elevada densidade básica (acima de  $0,4 \text{ g cm}^{-3}$ ) na produção de carvão vegetal é a redução da área para

estocar e manusear a madeira e os maiores rendimentos gravimétricos em carvão, que também contribuem para o aumento do seu poder calorífico (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; PEREIRA et al., 2000; TRUGILHO et al., 2001).

Madeiras com elevado poder calorífico possuem maior quantidade de energia disponível para o meio na forma de calor e isso melhora o potencial energético do combustível. Contudo, é necessário que a madeira seja previamente seca, pois grande parte da energia produzida durante o processo de carbonização é direcionada para evaporar a água livre existente na mesma, diminuindo o potencial energético do produto final (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2010).

A composição química do material também é importante quando o intuito é a produção de carvão vegetal, pois quando degradada termicamente, a madeira passa por um processo de transformação, no qual todos os seus componentes primários (celulose, hemicelulose e lignina) são drasticamente alterados, o que afeta as propriedades e os rendimentos do carvão vegetal (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2010).

A lignina é um composto primário de composição química complexa, amorfa, de cadeia ramificada, tridimensional, constituída por unidades de fenil propano, sendo o componente que mais contribui para o rendimento gravimétrico do carvão vegetal, devido a maior estabilidade térmica que ele possui em relação aos demais componentes da madeira (BARBOSA et al., 2008).

No entanto, não é apenas o teor de lignina que afeta as propriedades do carvão, também é importante que haja baixa relação siringil/guaiacil entre suas unidades monoméricas. Essa preferência é explicada, uma vez que o grupo guaiacila possui uma posição aromática, no carbono 5, disponível para realizar fortes ligações entre os átomos de carbono durante o processo de biossíntese, sendo mais resistente a degradação térmica e isso contribui para o maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal (MORAIS; NASCIMENTO; MELO, 2005; BARBOSA et al., 2008).

O teor de carbono fixo do carvão vegetal está relacionado com a quantidade de carbono presente na madeira. Um elevado teor de carbono fixo indica que outros componentes, como substâncias voláteis e cinzas, estão presentes em pequenas quantidades e, como resultado, produz carvão com maior rendimento gravimétrico (ISENMANN, 2016).

O teor de cinzas do carvão vegetal está diretamente ligado à presença de minerais, como o fósforo e o enxofre, no lenho e na casca da árvore. Essa fração

não produz energia e são resíduos indesejáveis, que não participam da queima do carvão vegetal (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2010).

### **3.4 Influência do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira**

O crescimento de uma árvore é influenciado por fatores genéticos e ambientais, como solo, relevo e competição com outros vegetais. A interação desses fatores, juntamente com a idade do plantio e algumas atividades silviculturais, como adubação e irrigação, expressa à qualidade do local onde a planta está se desenvolvendo e afeta as propriedades da madeira e do seu produto final (INOUE, FIGUEIREDO; LIMA, 2011; LELES et al., 2011).

Ao manejar um povoamento florestal, deve-se considerar todos os fatores que influenciam o crescimento das árvores, para que haja o máximo aproveitamento da capacidade produtiva do local. Assim, é necessário avaliar o potencial de utilização das árvores em relação a sua forma e dimensões alcançadas pelo seu fuste (SCHNEIDER et al., 1998).

O crescimento de uma árvore é dado pelo aumento progressivo do valor de diversas variáveis dendrométricas, como diâmetro, altura, área basal e volume, resultantes das atividades fisiológicas da planta, que são influenciadas pelos fatores genéticos e ambientais, que nem sempre, podem ser controlados ou monitorados pelo produtor, como é o caso da temperatura ambiente, precipitação, intensidade do vento e insolação (ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005).

Após certo crescimento em altura, a árvore inicia o crescimento secundário, que resulta no seu aumento em diâmetro. Esse crescimento deve-se ao meristema cambial, que é um tecido formado por uma fina bainha de células que, por divisão e diferenciação, produz células do xilema para o interior do tronco e células do floema em direção à casca da árvore (BURGER; RICHTER, 1991; ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005).

Para ocorrer o incremento no diâmetro das árvores de folhosas, as células do xilema produzem o lenho, que se diferencia em cerne e alburno, sendo esse crescimento influenciado, principalmente, pelo espaçamento adotado no plantio (ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005). Assim, o espaçamento utilizado em um povoamento florestal deve ser estabelecido com base no produto final.

O espaçamento pode afetar o desenvolvimento e a produtividade das florestas, em especial as espécies de rápido crescimento, pois determina o tempo e a intensidade de competição entre as árvores pelos recursos naturais (luz, água e nutrientes no solo), que aumenta à medida que esses recursos se restringem (INOUE, FIGUEIREDO; LIMA, 2011; HARRINGTON; HARRINGTON, DEBELL, 2009; LELES et al., 2011).

Espaçamentos amplos resultam em árvores com maior diâmetro à altura do peito, ou seja, à 1,30 metros do solo (DAP), maior conicidade, galhos mais grossos e copas mais extensas, que podem diminuir a produtividade florestal por não haver o aproveitamento máximo da área do local de plantio (MAGALHÃES et al., 2005; SCHNEIDER et al., 1998). Enquanto que, em espaçamentos adensados, há maior competição entre as árvores, ocasionando um rápido crescimento na direção longitudinal, que pode prejudicar o desenvolvimento das mesmas pela restrita disponibilidade de nutrientes no solo (INOUE; FIGUEIREDO; LIMA, 2011).

Dependendo da utilização final, o espaçamento inadequado reflete nas propriedades da madeira produzida, pois pode causar efeitos negativos na planta quando a área útil é ampla, como bifurcações, ramificações e nós; ou baixo incremento médio anual, quando a área útil é pequena (LELES et al., 2001). Além de prejudicar as propriedades da madeira destinadas à produção de energia e influenciar diretamente as propriedades e os rendimentos do carvão vegetal e subprodutos (REIS et al., 2012).

O espaçamento de plantio também afeta nos custos de implantação, manutenção e exploração florestal, pois exerce influência sobre a idade de corte da floresta, que deve ser realizado no ano de estagnação do seu crescimento. Desse modo, a exploração ou desbaste será mais rápido e frequente quanto menor for o espaçamento de uma mesma espécie em determinado sítio (MAGALHÃES et al., 2007).

### **3.5 Processo de carbonização da madeira**

A carbonização é um processo de degradação térmica da madeira na ausência ou presença controlada de oxigênio, que gera uma fração sólida, o carvão

vegetal, e outra gasosa, composta por gases condensáveis e não condensáveis (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC, 1980).

Os gases condensáveis são denominados de líquido pirolenhoso ou bioóleo e são formados por alcatrão e ácido pirolenhoso, que podem ser separados por decantação. O alcatrão é uma fração oleosa negra, densa e viscosa, que tem ampla utilização na indústria de alimentos, solventes, tintas e vernizes para madeiras (BENITES et al., 2009; PINHEIRO et al., 2008).

A principal utilização comercial da fração destilada de alcatrão é na indústria de alimentos, por meio dos aditivos flavorizantes. Além disso, essa fração, também denominado piche de alcatrão, possui características estruturais semelhantes às substâncias húmicas encontradas em solos ricos em carbono pirogênico, sendo solúveis em meio alcalino e precipitadas em pH ácido, podendo ser utilizada no tratamento de madeira, por inibir a atividade microbiana no material (NOVOTNY et al, 2007).

O ácido pirolenhoso é uma fração amarronzada e aquosa, formado por cerca de 90% de água e 10% de compostos orgânicos, dos quais o ácido acético é o mais predominante, seguido pelo ácido fórmico, acetona e ácido propiônico (ALMEIDA, 1982).

Os gases não condensáveis são compostos por dióxido e monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos. Por meio de fornos especiais com recuperadores de fumaça, esses gases podem ser reutilizados na secagem da madeira a ser carbonizada (BENITES et al., 2009; PINHEIRO et al., 2008).

A carbonização abrange três fases distintas e dependentes. A primeira fase é endotérmica, ocorre até 200°C, na qual há considerável perda de umidade e poucas reações importantes na madeira. A segunda também é endotérmica, ocorre entre 200 e 280°C, há aumento de reações no interior do forno e alguns gases são eliminados, resultando na mudança de cor da madeira. A terceira é exotérmica, ocorre entre 280 e 500°C, há eliminação de gases e importantes reações, que resultam na produção do carvão vegetal e cinzas, que é o resíduo proveniente dos minerais existentes na madeira. Nessa última fase, a temperatura final irá depender do produto desejado, sendo, normalmente, maiores do que 500°C o fim da carbonização e o início da gaseificação da madeira (BRITO, 1990; MEDEIROS; REZENDE, 1983).

É importante ressaltar que as fases da carbonização não ocorrem separadamente dentro do forno, sendo necessárias medidas para homogeneizar a

matéria prima e padronizar o sistema produtivo, a fim de controlar melhor as variáveis do processo de carbonização e gerar um carvão vegetal com melhores propriedades e maiores rendimentos.

### **3.6 Propriedades do carvão vegetal**

A qualidade do carvão vegetal é determinada por suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, que variam em função de sua matéria prima e processo de carbonização. Para a utilização doméstica e comercial, como em padarias e churrasqueiras, deseja-se que o carvão possua baixo teor de materiais voláteis e cinzas, alta densidade e baixa umidade.

Os materiais voláteis são todos os componentes presentes no carvão vegetal que podem ser removidos pela temperatura em atmosfera não oxidante ou inerte. Carvões vegetais com alto teor de voláteis tendem a ter uma ignição mais fácil, mas ao mesmo tempo, produzem uma chama com maior quantidade de fumaça. Já carvões com baixos teores de voláteis, queimam de forma mais limpa e geram pouca fumaça (KURAUCHI, 2014).

Os materiais voláteis também afetam a porosidade, tamanho, massa e resistência mecânica do carvão vegetal, em consequência da alta percolação de gases dentro do mesmo, que ocasiona maior geração de finos, fumaça e perda energética do combustível (PIMENTA; BARCELLOS; OLIVEIRA, 2010).

Cinzas são resíduos provenientes dos componentes minerais do lenho e da casca e se referem, principalmente, a presença de fósforo e enxofre na árvore. Além de diminuir o potencial energético de carvão vegetal, por ser a quantidade de material que não é queimado, um elevado teor de cinzas, pode prejudicar as propriedades mecânicas do mesmo, deixando-o mais fissurado e quebradiço (KURAUCHI, 2014).

Carvões com elevada densidade possui maior resistência mecânica e concentração de carbono fixo, que resulta em uma queima mais constante e duradoura, diminuindo a quantidade de carvão necessária dentro do forno, churrasqueira, fogão ou lareira (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; VALVERDE, 2014).

É importante que o carvão vegetal apresente baixa umidade, no intuito de aumentar sua eficiência, pois a umidade pode diminuir o poder de combustão do carvão, pelo processo de evaporação da água, que consome grande quantidade de energia. Além disso, uma elevada umidade pode acarretar mudanças físicas no carvão vegetal e aumentar a geração de finos dentro do forno (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983; CUNHA et al., 1989).

As propriedades mecânicas influenciam a resistência, rigidez, friabilidade e granulometria do carvão vegetal e são de fundamental importância para a qualificação do mesmo (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983; COUTO et al., 2015).

Carvões vegetais com menor resistência irão se degradar com maior facilidade, diminuir seu tamanho médio e gerar maior quantidade de finos durante toda a sua produção, manuseio e transporte (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983).

Além disso, o processo de carbonização também irá influenciar as propriedades do carvão vegetal. A carbonização da madeira em altas temperaturas diminui o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, pois aumenta a volatilização dos compostos orgânicos (holocelulose, lignina e extrativos); mas, ao mesmo tempo, pode melhorar a qualidade química do carvão vegetal, uma vez que aumenta seu teor de carbono fixo, por concentrar mais carbono e uma mesma quantidade de massa (PINHEIRO; FIGUEIREDO; SEYE, 2005; TRUGILHO; SILVA, 2001; VIEIRA et al., 2013).

A temperatura final de carbonização determina o comportamento e a decomposição térmica dos componentes da madeira. Sabe-se que a degradação da hemicelulose ocorre entre as temperaturas de 225 e 325°C, da celulose entre 325 e 375°C e da lignina, que é o elemento mais estável termicamente, ocorre a partir de 180°C e continua acima de 500°C (PEREIRA et al., 2013).

O aumento da temperatura ao longo do tempo expressa a taxa de aquecimento da carbonização. Uma maior temperatura final em um curto espaço de tempo diminui o rendimento gravimétrico, os teores de materiais voláteis e a densidade aparente; e aumenta os teores de carbono fixo e cinzas do carvão vegetal. Isso porque, quando a madeira é submetida a um rápido acréscimo de temperatura, ocorre maior perda de umidade no alburno em relação ao cerne, causada pela maior permeabilidade do alburno, que ocasiona um aumento na

pressão de vapor d'água no interior do carvão vegetal, favorecendo o aparecimento de trincas internas no mesmo (COUTINHO, 1988; OLIVEIRA et al., 2010).

Ao estudarem diferentes processos de carbonização em madeiras de *E. urophylla* x *grandis*, aos sete anos de idade, oriundos de espaçamento 3,0 x 2,0 m, Azevedo et al. (2013), concluíram que o rendimento gravimétrico em carvão foi afetado pela temperatura final das carbonizações, sendo o maior rendimento observado na temperatura final de 450°C. Assim, como Oliveira et al. (2010), que verificaram rendimento gravimétrico 32,11% superior para esta mesma temperatura, em relação as temperaturas finais de 500 e 550°C.

O rendimento gravimétrico é um parâmetro quantitativo, que determina os valores de massa em carvão vegetal que é gerada a partir de certa quantidade de madeira seca; e está diretamente relacionado com a matéria prima (madeira), temperatura final e taxa de aquecimento utilizada no processo de carbonização. Dessa forma, esses parâmetros, devem ser constantemente monitorados, pois afetam significativamente as propriedades do carvão vegetal (SANTOS, 2010).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Procedência e amostragem do material

As árvores de angico vermelho (*Anadenanthera peregrina*) com 56 meses de idade eram provenientes de um plantio experimental do projeto denominado “Floresta Piloto”, localizado no distrito de Rive, município de Alegre, estado do Espírito Santo.

O Projeto Piloto teve por objetivo caracterizar a genética, o crescimento e o sequestro de carbono em plantios de espécies florestais não tradicionais no sul do estado do Espírito Santo a fim de diversificar a matriz florestal do estado e contava com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES em parceria com a Universidade Federal do Espírito Santo – UFES e a mineradora Vale.

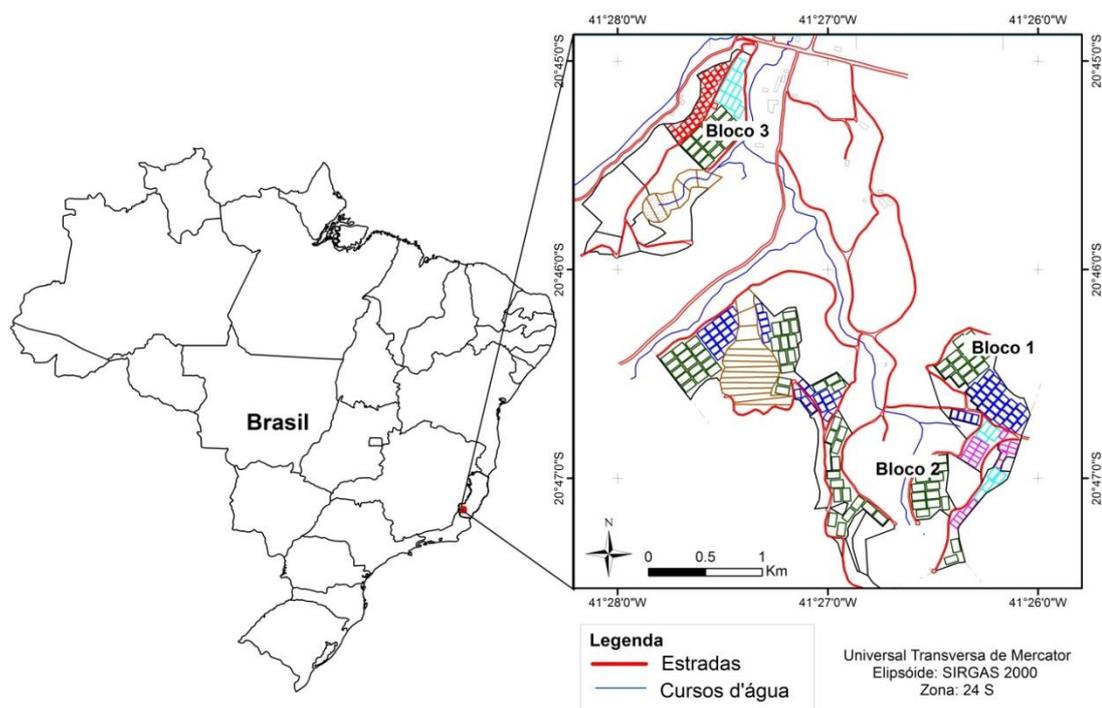
A região apresenta inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual de 1300 mm e temperatura média anual de 25°C (INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL – INCAPER, 2018).

As árvores de angico vermelho foram plantadas em 2011 em três tipos de solos (Quadro 1), que receberam a denominação de Bloco 1, Bloco 2 e Bloco 3 (Figura 1) e em cinco diferentes espaçamentos de plantio (3x2; 3x3; 4x3; 4x4; e 5x5m).

Quadro 1 – Classificação do solo do plantio experimental localizado em Rive, Espírito Santo

Denominação	Classificação do solo
Bloco 1	Argissolo vermelho amarelo eutrófico
Bloco 2	Cambissolo Háplico eutrófico
Bloco 3	Latossolo vermelho amarelo distrófico

Figura 1 – Localização da área experimental do Projeto Piloto, onde foram plantadas árvores de angico vermelho em três tipos de solo (Bloco 1, Bloco 2 e Bloco 3)



Fonte: a autora.

Em 2015 foi realizado o censo do diâmetro à 1,30 m do solo (diâmetro a altura do peito, DAP), a partir dessa classificação foram colhidas, aleatoriamente, três árvores (repetições) com diâmetro médio por espaçamento, totalizando 15 árvores amostradas de angico vermelho. Cada repetição foi coletada de um tipo de solo e as características médias das árvores estão na Tabela 1.

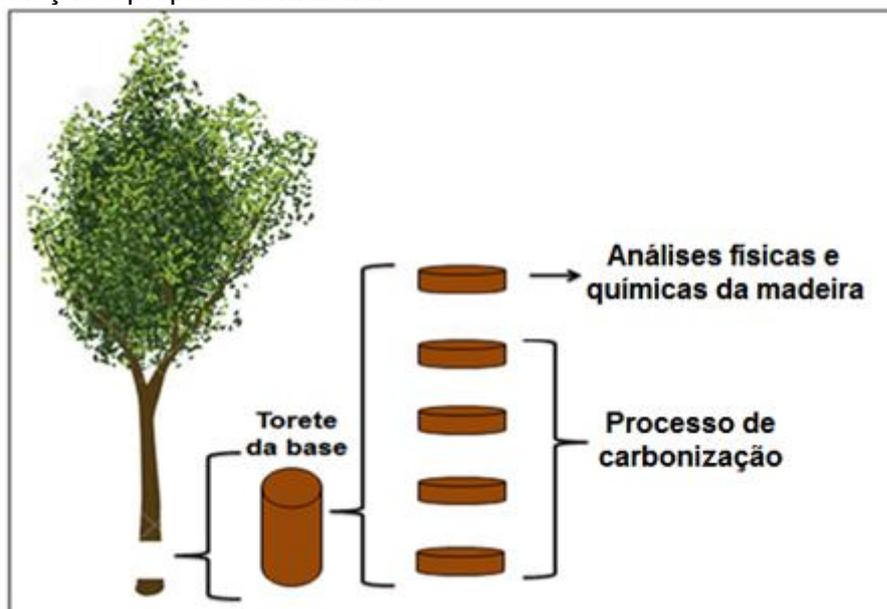
Tabela 1 – Valores médios das variáveis dendrometrias das árvores de angico vermelho aos 56 meses de idade em diferentes espaçamentos de plantio

Espaçamento de plantio (m)	3x2	3x3	4x3	4x4	5x5
Altura comercial (m)	3,50	3,26	2,92	3,68	2,87
Altura total (m)	7,94	7,68	7,84	8,36	8,06
Diâmetro a altura do peito (cm)	7,05	6,00	8,79	9,03	8,79

A altura total das árvores foi maior nos espaçamentos que possuíam maior área útil (Tabela 1), apesar disso, a menor altura comercial foi obtida nas árvores que se desenvolveram no espaçamento 5x5m. Isso ocorreu devido a menor competição estabelecida, que favoreceu o desenvolvimento de ramos em alturas inferiores. O espaçamento afetou o desenvolvimento das árvores em diâmetro, uma vez que houve uma tendência no aumento desse parâmetro à medida que se aumentou a área útil de plantio.

De cada árvore foram extraídos cinco discos da base com 3 cm de espessura, totalizando 75 discos (5 discos x 3 árvores x 5 espaçamentos). De um disco foram retiradas cunhas opostas para a determinação da densidade básica, análise química e poder calorífico da madeira e dos quatro discos restantes produziram-se o carvão vegetal (Figura 2).

Figura 2 – Seleção e preparo do material



Fonte: o autor.

#### 4.2 Propriedades da madeira de angico vermelho

A densidade básica foi determinada conforme as especificações da Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2003).

O teor de extrativos totais foi obtido por uma sequência de extração em etanol: tolueno (1:2), etanol e água quente, de acordo com *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* – TAPPI 264 om-88 (1996).

A determinação do teor de lignina insolúvel foi por meio do método Klason descrito por Gomide e Demuner (1986), o teor de lignina solúvel foi obtido de acordo com o procedimento descrito por Goldschmidt (1971) e o teor de lignina total foi obtido pela soma do teor de lignina insolúvel e solúvel.

Para a determinação do teor de cinzas presente na madeira, foram adotadas especificações sugeridas pela Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP M 11/77 (1997).

O poder calorífico superior da madeira foi obtido conforme a metodologia da NBR 8633 (ABNT, 1984) e sua determinação foi realizada em calorímetro adiabático. A densidade energética foi determinada pelo produto da multiplicação entre a densidade básica da madeira e seu respectivo poder calorífico superior.

### 4.3 Carbonização da madeira e qualidade do carvão vegetal

Quatro discos da posição basal de cada árvore foram previamente secos ao ar livre, por um período de 30 dias e posteriormente secos em estufa a  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  até atingirem massa constante. Desses discos foram retidas cunhas opostas (duas cunhas por disco, totalizando oito cunhas), das quais quatro foram carbonizadas pelo processo da Marcha 1 e as outras quatro cunhas foram carbonizados pelo processo da Marcha 2. As condições desses processos estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferentes condições do processo de carbonização

Marcha	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )		Aquecimento	Taxa de aquecimento ( $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ )	Tempo total
	Inicial	Final			
Marcha 1	100	450	$50^{\circ}\text{C}$ a cada 30 min	1,67	4h
Marcha 2	100	450	$25^{\circ}\text{C}$ a cada 30 min	0,83	7h30min

Para a produção do carvão vegetal, as cunhas opostas retirados de cada disco foram alocadas em cadinho metálico e levadas à mufla elétrica com controle manual de temperatura.

A captação dos gases condensáveis foi realizada por um condensador acoplado a uma cápsula metálica dentro da mufla elétrica. Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e, por diferença, em gases não condensáveis; e em seguida foram realizadas análises físicas e química imediata dos carvões.

A determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal foi obtida por meio da imersão do carvão vegetal em água, utilizando o método descrito por Vital (1984) e determinado pela razão entre a sua massa e volume.

A composição química imediata do carvão foi realizada conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986), para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono.

O poder calorífico superior do carvão foi determinado pelo emprego de um calorímetro adiabático de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984) e a densidade energética foi obtida pela multiplicação da densidade relativa aparente do carvão vegetal com seu respectivo poder calorífico superior.

#### **4.4 Análises estatísticas dos dados**

As propriedades da madeira (densidades, teor de extrativos, teor de lignina, teor de cinzas e poder calorífico superior) foram expressas em gráficos com as respectivas regressões, pelo teste F ao nível de 5% de significância.

As propriedades do carvão vegetal (química imediata, poder calorífico superior, densidades, rendimentos gravimétrico em carvão, gases condensáveis e não condensáveis) foram avaliadas em um modelo de análise fatorial 5x2 (cinco espaçamentos vs. duas marchas de carbonização), com três repetições para cada espaçamento.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ao nível de 5% de significância. Constatada normalidade dos dados, foi realizada a análise de variância (ANAVA), pelo teste F ao nível de 5% de significância, e quando esse foi significativo houve o desdobramento da marcha de carbonização dentro de cada nível do espaçamento de plantio, assim como o desdobramento do espaçamento de plantio dentro de cada nível da marcha de carbonização, sendo as médias de cada variável comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

A correlação de Pearson ( $t$ ;  $p < 0,05$ ) foi realizada entre os parâmetros da madeira (densidade básica, teor de extrativos totais, teor de lignina total, teor de cinzas e poder calorífico superior) e os parâmetros do carvão vegetal (densidade relativa aparente, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e rendimento gravimétrico em carvão) produzido pela marcha de carbonização que demonstrou os resultados mais satisfatórios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades da madeira

Foram avaliados a densidade básica, os parâmetros químicos, ou seja, os teores de extrativos totais, lignina total e cinzas e os parâmetros energéticos da madeira de angico vermelho (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores médios da densidade básica (DB), parâmetros químicos, poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (E) da madeira de angico vermelho com 56 meses de idade em diferentes áreas úteis de plantio

Espaçamento de plantio (m)	Área útil (m <sup>2</sup> )	DB (g cm <sup>-3</sup> )	Extrativos totais (%)	Lignina total (%)	Cinzas (%)	PCS (Kcal Kg <sup>-1</sup> )	DE (MJ m <sup>-3</sup> )
3x2	6	0,64	7,84	24,80	1,03	4556	12272
3x3	9	0,69	6,87	24,51	1,06	4465	13043
4x3	12	0,68	10,40	23,50	1,12	4613	13147
4x4	16	0,64	9,19	24,93	0,96	4699	12429
5x5	25	0,65	10,36	24,83	1,13	4602	12544
Média		0,66	8,93	24,51	1,06	4587	12687

#### Densidade básica da madeira

Os valores médios encontrados para a densidade básica da madeira (Tabela 3) foram superiores aos encontrados para clones de eucaliptos empregados para a produção de energia com até seis anos de idade, plantados em diferentes espaçamentos, que variaram de 0,374 a 0,64 g cm<sup>-3</sup> (CASTRO et al., 2013; DIAS JÚNIOR et al., 2015; JESUS et al., 2017; MAGALHÃES et al., 2017). Entretanto, estão dentro da faixa citada como satisfatória (0,4 a 1,2 g cm<sup>-3</sup>) para a produção de carvão vegetal (BRITO; BARRICHELLO; SEIXAS, 1983; CARNEIRO et al., 2014; TRUGILHO et al., 2001).

Esse valor é recomendado, pois quando a madeira é degradada termicamente, cerca de 60% de sua massa é perdida, assim, quanto maior for sua densidade, maior será a massa do carvão vegetal produzido em um determinado volume e mais elevado será a sua resistência mecânica (NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2014; SANTOS et al., 2011).

Não houve efeito significativo do espaçamento de plantio na densidade básica da madeira, corroborando com os resultados observados nas espécies de *Ateleia*

*glazioviana*, *Acacia mearnsii*, *Eucalyptus grandis* e *Minosa scabrella*, no primeiro e terceiro ano de plantio (ELOY et al., 2014).

O espaçamento de plantio pode exercer influência, mesmo que pequena, na densidade da madeira das folhosas ou não, dependendo da espécie, do clone ou da taxa de crescimento. Como foi observado na madeira jovem de eucalipto, plantada para fins energéticos, que apesar de não ter sido afetada significativamente pelo espaçamento, a densidade básica aumentou à medida que se aumentou a área útil de plantio (ROCHA et al., 2015; SEREGHETTI et al., 2015).

### **Extrativos totais e Lignina total**

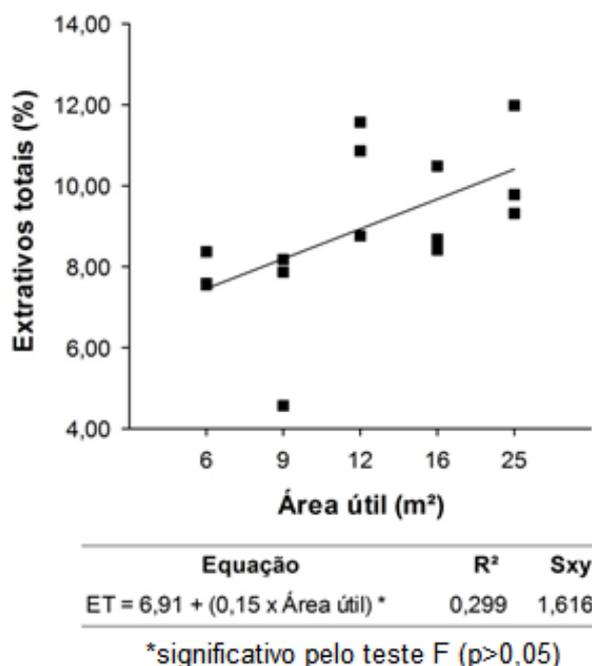
Os valores de teor de extrativos totais para todos os espaçamentos de plantio (Tabela 3) foram inferiores ao valor encontrado para a madeira de *A. peregrina* proveniente de diversas serrarias do estado do Espírito Santo e Minas Gerais (14,93%) (GONÇALVES et al., 2013).

Apesar disso, o teor de extrativos do angico vermelho foi superior ao encontrado para madeiras destinadas a produção de carvão vegetal de diferentes espécies do Cerrado, que variaram de 5,26 a 7,76% (COSTA et al., 2014; VALE; DIAS; SANTANA, 2010) e em madeiras de eucalipto, que variaram de 1,89 a 4,97% (CASTRO et al., 2013; NEVES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010).

O alto teor de extrativos em relação às espécies comumente utilizadas para a produção de energia, tanto as provenientes de plantios florestais quanto nativas, foi satisfatório, fato favorável à madeira de angico, pois o maior conteúdo de extrativos na madeira pode contribuir para o aumento do poder calorífico (quando há fenóis em sua composição) e do teor de carbono nos componentes químicos da madeira, o que eleva o rendimento em carbono fixo do combustível (SANTOS et al., 2011; SANTOS et al., 2016).

O conteúdo de extrativos aumentou significativamente com a área útil de plantio, contudo, o espaçamento só explicou cerca de 30% desse comportamento (Figura 3).

Figura 3 – Valores médios e regressão do teor de extrativos totais da madeira de angico vermelho com 56 meses de idade em diferentes áreas úteis de plantio



O teor de lignina foi inferior ao observado em clones de eucalipto para a geração de energia, que variaram de 27 a 33% (CARNEIRO et al., 2017; CASTRO et al., 2013; NEVES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010), mas está dentro da faixa encontrada para a maioria das folhosas brasileiras, que variaram de 16 a 31% (BRITO; BARRICHELO, 1977; COSTA et al., 2014; VALE; DIAS; SANTANA, 2010).

Não foi verificado efeito significativo entre o teor de lignina total com o espaçamento de plantio. Na carbonização de madeiras com baixos teores de lignina, como foi observado no angico, obtém-se baixo rendimento gravimétrico em carvão e baixo teor de carbono fixo, que pode prejudicar o potencial energético do biocombustível.

Isso porque, a lignina afeta o potencial energético do biocombustível, pois possui maior estabilidade térmica em relação aos demais constituintes estruturais da madeira, como por exemplo, a celulose, que é degradada rapidamente, não contribuindo expressivamente com o teor de carbono fixo do carvão vegetal (BARCELLOS et al., 2005; BRITO; BARRICHELO, 1977; PEREIRA et al., 2013).

### Teor de cinzas da madeira

Não houve efeito significativo entre o teor de cinzas e o espaçamento de plantio. O valor médio de cinzas foi inferior ao de madeiras do Cerrado para a produção de energia (1,80%) (COSTA et al., 2014), superior aos das espécies de A.

*peregrina* (0,35%), *A. colubrina* (0,50%) (GONÇALVES et al., 2013) e aos de eucaliptos destinados à energia, que possuem teores de cinzas, normalmente, inferiores a 1% (BRAND et al., 2011; NEVES et al., 2011; PEREIRA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014).

Elevados teores de cinzas, como os encontrados para o angico, afetam negativamente as propriedades do carvão vegetal e, quando este é utilizado na indústria, pode prejudicar o processo industrial pela formação de crostas nos equipamentos e nas tubulações, havendo a necessidade de aumentar a frequência e os gastos com a manutenção e a limpeza dos equipamentos (BARCELLOS et al., 2005; BRAND, 2010).

Madeiras tropicais possuem variação no teor de cinzas, sendo esse valor mais elevado nas folhosas e nas árvores mais jovens. Em madeiras de eucaliptos observou-se uma tendência de redução do teor de cinzas com o avanço da idade (PROTÁSIO et al., 2014; SANTANA et al., 2012). Fato que pode estar relacionado à diminuição da atividade fisiológica da árvore e que favorece a produção de carvão vegetal.

Dessa forma, acredita-se que com o passar dos anos, a quantidade de minerais diminua na madeira de angico vermelho estudada e sugere-se realizar futuras pesquisas com a mesma, para verificar o comportamento dessa variável ao longo dos anos.

### **Poder calorífico superior e densidade energética da madeira**

A variação entre os valores médios do PCS da madeira de angico vermelho (Tabela 3) foi satisfatória para a produção de carvão vegetal e não prejudica a capacidade energética do combustível, pois para sua utilização são relevantes diferenças acima de 300 Kcal Kg<sup>-1</sup> (BRAND, 2010; BRAND; MUÑIZ, 2010).

Isso porque, o PCS está mais relacionado com as características inerentes das espécies, como o teor e o tipo de extrativo presente na madeira, que pode contribuir com a quantidade de calor liberado durante a queima do material e influenciar a capacidade energética do combustível (CARNEIRO et al, 2017; PEREIRA et al., 2013).

O valor médio do PCS da madeira de angico foi próximo da média encontrada para mais de 100 espécies florestais brasileiras, ou seja, 4.732 Kcal Kg<sup>-1</sup> (QUIRINO et al., 2008) e dos valores observados para diferentes clones de eucaliptos

destinados a energia, que variaram de 4538 a 4867 Kcal Kg<sup>-1</sup> (BRANDE; MUÑIZ, 2010; BRAND et al., 2011; JESUS et al., 2017; SANTOS et al., 2016).

Os valores médios da DE da madeira de angico vermelho (Tabela 3) foram satisfatórios para produção de carvão vegetal, sendo superiores aos observados em clones de eucaliptos plantados para fins energéticos, que variaram de 4125 a 12196 MJ m<sup>-3</sup> (LEMOS et al., 2015; MAGALHÃES et al., 2017).

Não houve efeito significativo da área útil de plantio no PCS da madeira e nem na DE, corroborando com os resultados em quatro espécies florestais, sendo elas, a *Acacia mearnsii*, *Eucalyptus grandis*, *Mimosa scabrella* e *Ateleia glazioviana*, plantadas em quatro espaçamentos para fins energéticos (ELOY et al., 2014).

## 5.2 Propriedades do carvão vegetal

Não houve interação entre os fatores marchas de carbonização e espaçamentos de plantio no teor de materiais voláteis (TMV), teor de carbono fixo (TCF), poder calorífico superior (PCS) e rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC). Contudo, ao analisar os fatores simples, verificou-se diferença estatística, exceto para o RGC, entre essas variáveis (Tabela 4).

Tabela 4 – Análise da marcha de carbonização e do espaçamento de plantio, para o teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e rendimento gravimétrico em carvão vegetal

Marcha de carbonização	Média das variáveis			
	TMV*	TCF*	PCS*	RGC <sup>ns</sup>
M1	25,45 <sup>a</sup>	72,72 <sup>b</sup>	7048 <sup>b</sup>	36,56
M2	24,53 <sup>b</sup>	73,35 <sup>a</sup>	7175 <sup>a</sup>	36,87

Espaçamento de plantio (m)	Média das variáveis			
	TMV*	TCF*	PCS*	RGC <sup>ns</sup>
3x2	24,36 <sup>c</sup>	73,68 <sup>a</sup>	7154 <sup>ab</sup>	37,46
3x3	25,43 <sup>ab</sup>	73,07 <sup>a</sup>	7176 <sup>a</sup>	36,69
4x3	24,50 <sup>bc</sup>	73,21 <sup>a</sup>	7075 <sup>ab</sup>	36,09
4x4	25,06 <sup>abc</sup>	73,19 <sup>a</sup>	7015 <sup>b</sup>	36,91
5x5	25,59 <sup>a</sup>	72,04 <sup>b</sup>	7136 <sup>ab</sup>	36,45

M1: taxa de aquecimento de 1,67°C; M2: taxa de aquecimento de 0,83°C; TMV: teor de materiais voláteis (%); TCF: teor de carbono fixo (%); PCS: poder calorífico superior (Kcal Kg<sup>-1</sup>); RGC: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); \*: significativo pelo teste F a 5% de significância; <sup>ns</sup>: não significativo pelo teste F a 5% de significância. As médias seguidas pelas mesmas letras, em cada coluna, se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Houve interação entre os fatores marcha de carbonização e espaçamento de plantio no teor de cinzas (TCz), densidade relativa aparente (DRA), densidade energética (DE), rendimentos em líquido pirolenhoso (RLP) e gases não condensáveis (RGNC). E o desdobramento da marcha de carbonização dentro de cada nível do espaçamento de plantio, assim como desdobramento do espaçamento dentro de cada nível da marcha de carbonização estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Desdobramento da marcha de carbonização dentro de cada nível do espaçamento de plantio (coluna, letras minúsculas) e desdobramento do espaçamento dentro de cada nível da marcha de carbonização (linha, letras maiúsculas).

Variáveis	Marchas de carbonização	Espaçamentos de plantio (m)				
		3x2	3x3	4x3	4x4	5x5
TCz	M1	1,84 <sup>bB</sup>	1,13 <sup>bD</sup>	2,14 <sup>bA</sup>	1,67 <sup>bC</sup>	2,15 <sup>bA</sup>
	M2	2,08 <sup>aC</sup>	1,66 <sup>aE</sup>	2,45 <sup>aB</sup>	1,84 <sup>aD</sup>	2,58 <sup>aA</sup>
DRA	M1	0,43 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>b</sup>	0,41 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>b</sup>	0,43 <sup>b</sup>
	M2	0,46 <sup>aBC</sup>	0,52 <sup>aAB</sup>	0,42 <sup>C</sup>	0,58 <sup>aA</sup>	0,60 <sup>aA</sup>
DE	M1	12896 <sup>ns</sup>	12868 <sup>b</sup>	12159 <sup>ns</sup>	13145 <sup>b</sup>	12824 <sup>b</sup>
	M2	13906 <sup>BC</sup>	15738 <sup>aAB</sup>	12633 <sup>C</sup>	17738 <sup>aA</sup>	18266 <sup>aA</sup>
RLP	M1	41,88 <sup>aC</sup>	42,88 <sup>aA</sup>	40,98 <sup>aD</sup>	42,51 <sup>aB</sup>	40,74 <sup>aE</sup>
	M2	34,37 <sup>bE</sup>	37,80 <sup>bC</sup>	34,70 <sup>bD</sup>	38,99 <sup>bA</sup>	38,53 <sup>bB</sup>
RGNC	M1	20,94 <sup>bE</sup>	20,950 <sup>bD</sup>	22,10 <sup>bB</sup>	21,18 <sup>bC</sup>	22,25 <sup>aA</sup>
	M2	27,36 <sup>aA</sup>	22,97 <sup>aD</sup>	26,67 <sup>aB</sup>	23,44 <sup>aC</sup>	22,22 <sup>bE</sup>

M1: taxa de aquecimento de 1,67°C; M2: taxa de aquecimento de 0,83°C; TCz: teor de cinzas (%); DRA: densidade relativa aparente (g cm<sup>-3</sup>); DE: densidade energética (MJ m<sup>-3</sup>); RLP: rendimento em gases condensáveis (%); RGNC: rendimento em gases não condensáveis (%); <sup>ns</sup>: não significativa, nas colunas com letras minúsculas e nas linhas com letras maiúsculas, pelo teste F a 5% de significância. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, para cada variável isoladamente, se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de significância.

### Química imediata do carvão vegetal

O TMV aumentou no carvão produzido com a madeira proveniente dos maiores espaçamentos de plantio e foi significativamente maior no carvão produzido por meio da marcha 1 (Tabela 4).

A marcha 2 apresentou o menor valor médio para o TMV, principalmente nos carvões produzidos com madeiras oriundas do espaçamento de plantio 3x2 m. Contudo, todos os valores estão na faixa de 18,51 a 27,30% encontrada para

carvões produzidos com clones de eucalipto (ARANTES et al., 2013; ASSIS et al., 2012; ROCHA et al., 2017).

O TMV que determina a estabilidade da chama e a velocidade da combustão, isto é, carvões com elevado TMV queimam mais rápido e de maneira desigual, enquanto que carvões com baixo TMV queimam de maneira mais lenta e homogênea (BRAND, 2010; PROTÁSIO et al., 2017). Assim, para a utilização doméstica, a Resolução SAA – 40 indica TMV de até 25,5%, sendo os valores encontrados nos carvões produzidos por meio da marcha 2 mais satisfatórios para esta finalidade (SÃO PAULO, 2015).

O espaçamento de plantio interagiu significativamente com as marchas de carbonização para o TCz, sendo os maiores valores observados nos carvões produzidos pela marcha 2 em todos os espaçamentos de plantio (Tabela 5).

Na marcha 2, a madeira ficou exposta durante mais tempo à degradação térmica e isso contribuiu para a máxima transferência dos seus minerais para o carvão vegetal, uma vez que os mesmos continuam intactos após a queima do material. Corroborando com os resultados observados em carvões produzidos com madeira de eucalipto e jatobá (COUTO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2010).

Para a utilização doméstica é indicado teores de cinzas no carvão vegetal abaixo de 1%, como os valores, normalmente, observados em carvões oriundos da madeira de eucalipto, que variaram de 0,28 a 0,81% (JUÍZO; LIMA; SILVA, 2017; REIS et al., 2012; ROCHA et al., 2017; SÃO PAULO, 2015; SILVA et al., 2015). Entretanto, já foi verificado alto TCz em carvão de eucalipto, que chegaram a 2,5%, como os valores observados neste trabalho (ASSIS et al., 2012; DIAS JUNIOR et al., 2015; PROTÁSIO et al., 2014).

Carvões produzidos com espécies nativas, como as do Cerrado e Caatinga, possuem alto TCz, sendo encontrado na literatura valores muito superiores (de até 5,3%) aos observados nos carvões de angico vermelho (COSTA et al., 2014; MEDEIROS NETO; OLIVEIRA; PAES, 2014; OLIVEIRA et al., 2006; PAES et al., 2012).

Elevados valores de TCz podem prejudicar a queima do carvão vegetal, pois diminui a eficiência do combustível durante a cocção dos alimentos, por ser a parte que não gera calor. Dessa forma, os carvões oriundos do espaçamento de plantio 3x3 m são mais satisfatórios para a utilização doméstica.

O espaçamento de plantio e a marcha de carbonização influenciaram significativamente o teor de carbono fixo, mas não houve interação entre esses fatores (Tabela 4).

Todos os valores encontrados para o TCF estão dentro da faixa observada para carvões produzidos com diversas espécies nativas do Cerrado e Caatinga, que variaram de 60,58 a 73,65% (COSTA et al., 2014; MEDEIROS NETO; OLIVEIRA; PAES, 2014; OLIVEIRA et al., 2006; PAES et al., 2012) e com eucalipto, que variaram de 63,12 a 79,92% (ASSIS et al., 2012; JESUS et al., 2017; ROCHA et al., 2017; PEREIRA et al., 2012).

A eliminação dos materiais voláteis no carvão ocasionou um acréscimo, normal, do seu teor de carbono fixo, sendo essas duas características determinantes para o aumento do poder calorífico superior do carvão vegetal. Além disso, a resolução SAA – 40 recomenda teor de carbono fixo superior a 73%, sendo os carvões produzidos por meio da marcha 2, exceto os oriundos do espaçamento de plantio 5x5 m, aptos para a utilização doméstica (SÃO PAULO, 2015).

É indicado elevado TCF, pois o carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido, sendo mais estável termicamente. Isso ocasiona um maior tempo de queima do carvão, aumentando assim o seu rendimento (BRAND, 2010; NEVES et al., 2011).

### **Densidade relativa aparente do carvão vegetal**

Houve interação entre o espaçamento de plantio e a marcha de carbonização, dos quais os maiores valores de DRA foram observados nos carvões produzidos por meio da marcha 2 e nas maiores áreas úteis de plantio (Tabela 5).

A menor taxa de aquecimento, para uma mesma temperatura final, originou carvões com maior densidade, tendência também verificada em carvões produzidos com diversas espécies florestais (ANTAL JUNIOR et al., 2000).

Os valores médios da DRA do carvão de angico vermelho foram inferiores aos da densidade básica da madeira. Essa redução ocorreu por causa do processo de carbonização, que degrada grande parte dos principais constituintes da madeira, reduzindo seu peso em massa (SYRED et al., 2006).

Valores elevados de DRA melhora a resistência mecânica do carvão vegetal e influencia importantes aspectos operacionais, econômicos e produtivos do pequeno e médio produtor, pois facilita o transporte e manuseio do carvão, reduz a área

necessária para o armazenamento do produto e aumenta o rendimento gravimétrico em carvão (BOTREL et al., 2007; PROTÁSIO et al., 2015).

Os valores encontrados para os carvões de angico vermelho, principalmente aqueles produzidos por meio da marcha 2, foram satisfatórios para a utilização doméstica e, por vezes, superiores aos encontrados para carvões produzidos com eucaliptos, que variaram de 0,266 a 0,351 g cm<sup>-3</sup> (ASSIS et al., 2012; NEVES et al., 2011; SANTOS et al., 2011) e com espécies do Cerrado e Caatinga, que variaram de 0,255 a 0,56 g m<sup>-3</sup> (COSTA et al., 2014; PAES et al., 2012).

### **Poder calorífico superior e densidade energética do carvão vegetal**

O espaçamento de plantio e a marcha de carbonização não tiveram interação significativa, mas, isoladamente, influenciaram o PCS do carvão vegetal (Tabela 4), sendo os maiores valores observados nos carvões produzidos por meio da marcha 2 (menor taxa de aquecimento). Corroborando com os resultados observados em carvão produzido com eucalipto aos cinco anos de idade, cujos maiores valores foram verificados nas menores taxas de aquecimento (OLIVEIRA et al., 2010).

Todos os valores obtidos de PCS para os carvões de angico vermelho estão dentro da faixa encontrada, e dita como satisfatória, para carvões produzidos com eucalipto, que variaram de 4057 a 7900 Kcal Kg<sup>-1</sup> (DIAS JUNIOR et al., 2015; MAGALHÃES et al., 2017; ROCHA et al., 2017) e para espécies do Cerrado e Caatinga, que variaram de 6247,8 a 7730 Kcal Kg<sup>-1</sup> (COSTA et al., 2014; MEDEIROS NETO; OLIVEIRA; PAES, 2014; OLIVEIRA et al., 2006; PAES et al., 2012).

Houve interação entre as marchas de carbonização e o espaçamento de plantio para a DE, que apresentou os maiores valores nos carvões produzidos por meio da marcha 2 e nos espaçamentos 3x3, 4x4 e 5x5 m (Tabela 5), que foram, por vezes, superiores aos valores encontrados em carvões produzidos com clones de eucalipto, que variaram de 2784 a 12552 MJ m<sup>-3</sup> (MAGALHÃES et al., 2017; PROTÁSIO et al., 2015; PROTÁSIO et al., 2014; SILVA et al., 2015).

Uma elevada densidade energética é desejada, pois reflete diretamente no potencial energético do combustível, por estar associada a uma maior densidade aparente e PCS do carvão. Assim, todos os valores verificados para o carvão produzido com a madeira de angico vermelho, em especial por meio da marcha 2, são satisfatórios para a utilização doméstica.

## **Rendimentos em carvão, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis**

Não houve interação entre as marchas de carbonização e o espaçamento de plantio para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGC), que também não foi afetado por esses fatores isolados (Tabela 4). O mesmo foi verificado em clones de eucalipto, com até sete anos de idade, plantados em diferentes áreas úteis (BOTREL et al., 2007; REIS et al., 2012; ROCHA et al., 2017).

Os valores médios de RGC estão dentro da faixa encontrada para carvões produzidos com diferentes espécies brasileiras, como cinamomo, bracatinga, jurema preta, jurema vermelha e angico vermelho, que variaram de 34 a 41,06% (BRAND et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2006; PAES et al., 2012) e do que, normalmente, é citado para clones de eucalipto com até sete anos de idade, que variou de 23,09 a 40,16% (DIAS JUNIOR et al., 2015; JESUS et al., 2017; MAGALHÃES et al., 2017; ROCHA et al., 2017).

Deseja-se RGC acima de 30%, pois o mesmo favorece o aproveitamento máximo da massa do combustível durante sua queima (ARANTES et al., 2013; JESUS et al., 2017; SOARES et al., 2014). Sendo todos os valores encontrados, para os carvões produzidos com madeira de angico vermelho, satisfatórios para a utilização doméstica.

O RGC teve relação inversa ao rendimento em líquido pirolenhoso (RLP); fato também verificado em diferentes espécies tropicais em consequência da elevada densidade básica de madeira, que aumenta a concentração de carbono fixo e favorece o rendimento gravimétrico do carvão (BRAND et al., 2013; SYRED et al., 2006).

Para as variáveis RLP e gases não condensáveis (RGNC) houve interação entre os espaçamentos de plantio e as marchas de carbonização, sendo que o RLP diminuiu com o aumento da taxa de aquecimento; enquanto que o RGNC aumentou, estando a maioria dos valores próximos ao que, normalmente, é observado para clones de eucaliptos com até sete anos de idade, que variaram de 38,75 a 45,41% para o RLP e de 19,70 a 21,92% para o RGNC (DIAS JUNIOR et al., 2015; JESUS et al., 2017; ROCHA et al., 2017).

### 5.3 Correlação entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal

Os parâmetros avaliados no carvão vegetal produzido por meio da marcha 2 foram correlacionados com os parâmetros avaliados na madeira de angico vermelho. Sendo significativas e positivas as correlações existentes entre a densidade relativa aparente do carvão com a lignina total da madeira e entre o teor de cinzas do carvão com o teor de extrativos da madeira (Tabela 6).

Tabela 6 – Correlação entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal produzidos com madeira de angico vermelho, aos 56 meses de idade, por meio da marcha 2 (taxa de aquecimento de  $0,83^{\circ}\text{C min}^{-1}$ )

		Madeira				
		Densidade básica	Extrativos totais	Lignina total	Teor de cinzas	Poder calorífico superior
Carvão vegetal	Densidade relativa aparente	-0,212 <sup>ns</sup>	0,081 <sup>ns</sup>	<b>0,566*</b>	-0,172 <sup>ns</sup>	0,271 <sup>ns</sup>
	Teor de materiais voláteis	-0,140 <sup>ns</sup>	0,032 <sup>ns</sup>	0,317 <sup>ns</sup>	0,093 <sup>ns</sup>	0,168 <sup>ns</sup>
	Teor de cinzas	-0,117 <sup>ns</sup>	<b>0,665*</b>	-0,235 <sup>ns</sup>	0,297 <sup>ns</sup>	0,209 <sup>ns</sup>
	Teor de carbono fixo	0,182 <sup>ns</sup>	-0,341 <sup>ns</sup>	-0,179 <sup>ns</sup>	-0,224 <sup>ns</sup>	-0,251 <sup>ns</sup>
	Poder calorífico superior	0,175 <sup>ns</sup>	0,075 <sup>ns</sup>	0,109 <sup>ns</sup>	0,054 <sup>ns</sup>	-0,350 <sup>ns</sup>
	Rendimento gravimétrico	0,285 <sup>ns</sup>	0,008 <sup>ns</sup>	0,066 <sup>ns</sup>	0,070 <sup>ns</sup>	0,141 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup>: não significativo; \*: significativo para a correlação de Pearson (t;  $p < 0,05$ ).

Tais correlações não são comuns na literatura citada para diferentes clones de eucaliptos e espécies brasileiras, das quais relataram que o teor de cinzas do carvão está diretamente relacionado com o teor de cinzas da madeira e, em menor escala, com o teor de extrativos totais (BRITO; BARRICHELO, 1977; SOARES et al., 2014; VITAL; JESUS; VALENTE, 1986) e que a densidade relativa de carvão vegetal está mais correlacionada, positivamente, com a densidade básica do que com o teor de lignina total da madeira (BRAND et al., 2013; COSTA et al., 2014; VALE; DIAS; SANTANA, 2010; VALE et al., 2001; PROTÁSIO et al., 2015).

O aumento da lignina na madeira proporcionou incremento da densidade relativa aparente do carvão vegetal, pois quando se carboniza uma madeira com elevado teor de lignina, obtêm-se um maior rendimento gravimétrico e isso contribui para o aumento da densidade do carvão. Esse fato está relacionado com a estrutura química e com os tipos de ligações existentes na lignina, que reflete em uma maior resistência à degradação térmica do material (TRUGILHO; SILVA, 2001).

## 6 CONCLUSÕES

- O espaçamento de plantio não influenciou as propriedades da madeira de angico vermelho, exceto nos extrativos totais, e demonstrou efeito nas propriedades do carvão produzido.
- A marcha de carbonização influenciou as propriedades do carvão vegetal;
- Houve interação entre os espaçamentos de plantio e as marchas de carbonização para as variáveis TCz, DRA, de, RLP e RGNC.
- Com o aumento do teor de lignina da madeira houve incremento da densidade aparente do carvão vegetal; assim como o do teor de extrativas da madeira que elevou o teor de cinzas do carvão vegetal.

## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. R. Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria: **produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, p. 177-180, 1982.

ANTAL JUNIOR., M. J.; ALLEN, S. G.; DAI, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M. S.; GRONLI, M. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research.**, Honolulu, v. 39, n. 11, p. 4024-4031, 2000. <http://dx.doi.org/10.1021/ie000511u>.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M., ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000300009>.

ARAÚJO F. S., MARTINS S. V., MEIRA NETO J. A. A., LANIS J. L. L., PIRES I. E. Estrutura da vegetação arbustivo-arbórea colonizadora de uma área degradada por mineração de caulim, Brás Pires, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 107-116, 2006.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. <http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.291>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8633**: Carvão vegetal - determinação do poder calorífico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP. **M11/77**. Normas técnicas. São Paulo, 1997.

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**, Goiânia, v.9, n.16, p. 1279, 2013.

BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A., SILVA, V. L.; COLODETTE, J. L. Determinação da relação siringila/guaiacila da lignina em madeiras de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 2035-2041, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422008000800023>.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, C. C.; MULLER, M. D.; COUTO, L. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 141-158, 2005.

- BENITES, W. DE M.; TEIXEIRA, W. G.; REZENDE, M. E.; PIMENTA, A. S. **Utilização de Carvão e Subprodutos da Carbonização Vegetal na Agricultura: aprendendo com as Terras Pretas de Índio**. In: As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Ed.s: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, p. 286-297, 2009.
- BOTREL, M. C. G., TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000300004>.
- BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2581-2588, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.005>.
- BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; BREHMER, D. R.; KUSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.
- BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 619-628, 2010.
- BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, v. 9, p. 1-19, 1990. (Documentos florestais).
- BRITO, J. O. **Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, fev. 1993. (Circular Técnica, nº 181).
- 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. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, n. 14, p. 09-20, 1977. (Boletim Informativo).
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G; SEIXAS, F. **Análise da Produção Energética e de Carvão Vegetal de Espécies de Eucalipto**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, n. 23, p.53-56, 1983.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.
- CARNEIRO, A. D. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C.; 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**, Viçosa, v.38, n.2, p.375-381, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>.

- CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; CARVALHO, M. M. L.; VIDAURRE, G. B. Propriedades de chapas de aglomerado fabricadas com adesivo tânico de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*) e uréia-formaldeído. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 521-531, 2009.
- CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Brazilian Journal of Wood Science**, Pelotas, v. 8, n. 3, p. 127-135, 2017. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135>.
- 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**, Brasília, v.48, n.6, p.627-635, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600008>.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Embrapa Informações Tecnológica, Brasília-DF. Colombo: Embrapa Florestas, 2003.
- COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602014000100005>.
- COSTA, R. B.; CONTINI, A. Z.; MELO, E. S. P. Sistema reprodutivo de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg e *Vochysia haenkiana* (Spreng.) Mart. em fragmento de Cerrado na Chapada dos Guimarães – MT. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782003000200019>.
- COUTINHO, A. R. **Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, n. 38, p. 33-37, 1988.
- COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.
- CUNHA, P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; NETO Z. B. C.; BARBOSA, A. P. R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 1989. v. 2, p. 95-121.
- DIAS JUNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; SOARES, V. W.; COSTA JUNIOR., D. S. C.; 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**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 833-843, 2015. [dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8](http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8).

DURIGAN, G.; FIGLIOLIA, M. B.; KAWABATA, M.; GARRIDO, M. A. O.; BAITELLO, J. B. **Sementes e Mudanças de Árvores Tropicais**. São Paulo: Páginas e Letras Editora e Gráfica, 1997. 73p.

ELOY, E.; CARON, B. O.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; BEHLING, A., ELLI, E. F. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n.3, p. 551-559. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000300018>.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. **Idade e crescimento das árvores**. Universidade de Brasília, Brasília, v. 7, n. 1, 2005. (Comunicações Técnicas Florestais).

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, MG, v. 1, 1980. 158p.

GOLDSCHMIDT, O. **Ultraviolet spectra lignin**: occurrence, formation, structure and reactions. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (Eds.). New York: Wiley Interscience. p. 241-266, 1971.

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

GONÇALVES, F. G., PINHEIRO, D. T. C.; PAES, J. B.; CARVALHO, A. G.; OLIVEIRA, G. L. Durabilidade Natural de Espécies Florestais Madeireiras ao Ataque de Cupim de Madeira Seca. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 1, p. 110-116, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.063>.

HARRINGTON, T. B.; HARRINGTON, C. A.; DEBELL, D. S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationships of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). **Forest Ecology and Management**, Cardiff, v. 258, n. 1, p. 18–25, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.039>.

HENKEL, K.; AMARAL, I. G. M. Análise agrossocial da percepção de agricultores familiares sobre sistemas agroflorestais no nordeste do estado do Pará, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v. 3, n. 3, p. 311-327, dez. 2008

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual**: Ano base 2016. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2017.

INOUE, M. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; LIMA, R. Influência do espaço vital de crescimento na altura e diâmetro de *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 377-385, 2011.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL – INCAPER. **Gráficos da série histórica – Alegre/ES**. 2018. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-alegre>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

ISENMANN, A. **O processo do alto-forno e a produção de aço**. 2016. Disponível em:

<[http://www.timoteo.cefetmg.br/site/sobre/cursos/quimica/repositorio/artigos/arq/Processo\\_do\\_Alto\\_Forno\\_03-2016.pdf](http://www.timoteo.cefetmg.br/site/sobre/cursos/quimica/repositorio/artigos/arq/Processo_do_Alto_Forno_03-2016.pdf)>. Acesso em: 7 set. 2016.

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**, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418>.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Agrária**, Recife, v.12, n.3, p.386-390, 2017. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5461>.

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LELES, P. S. S.; ABAURRE, G. W.; ALONSO, J. M.; NASCIMENTO, D. F.; LISBOA, A. C. Crescimento de espécies arbóreas sob diferentes espaçamentos em plantio de recomposição floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 231-239, jun. 2011.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 77-87, 2001.

LEMOES, S. V.; SARTORI, M. M. P.; EUFRADE JR., H. J.; RIBAS, L. C.; GUERRA, S. P. S. Geração energética de eucalipto de curta rotação. **Energia na Agricultura**, Botucatu, vol. 30, n.3, p.263-268, 2015. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n3p263-268>.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**. Nova Odessa: Plantarum, 2000. v. 1. 352p.

LORENZI H. **Árvores Brasileiras**: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 3. ed. São Paulo: Instituto Plantarum, 2009. v. 2, 384p.

MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O; VITAL, B. R.; SILVA, C. M. S.; SOUZA, M. M.; FIALHO, L. F. Estimates of mass and energy of different genetic material *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 1-8, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000300002>.

MAGALHÃES, W. M.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIM, N.HIGASHIKAWA, E. M.; YOSHITANI JR., M. Desempenho silvicultural de espécies de *Eucalyptus spp.* em quatro espaçamentos de plantio na região noroeste de Minas Gerais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 12, n. 2, p. 01 - 07, 2005.

MAGALHÃES, W. M.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIM, N.HIGASHIKAWA, E. M.; YOSHITANI JUNIOR., M. Desempenho silvicultural de clones e

espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 368-375, 2007.

MARCATI, C.R. **Estudo da anatomia e das propriedades tecnológicas da madeira do angico-vermelho (*Piptadenia peregrina* Benth)**. 1992. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; PAES, J. B. Relações entre as Características da madeira e do carvão Vegetal de duas espécies da Caatinga. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 4, p. 484-493, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.051313>.

MEDEIROS, C. A.; REZENDE, M. E. A. **Alcatrão vegetal**: perspectivas de produção e utilização. Belo Horizonte, v. 13, n. 9-12, p. 42-48, 1983.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira do *Pinus oocarpa* parte II – caracterização estrutural da lignina de madeira moída. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n.3, p.471-478, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000300015>.

MORI, C.L.S.O.; MORI, F.A.; MENDES L.M.; SILVA, J.R.M. Caracterização da Madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (Benth) Speng) para confecção de móveis. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 77, p. 29-36, 2003.

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**, Colombo: Embrapa Florestas, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319>.

NOVOTNY, E. H.; AZEVEDO, E. DE; BONAGAMBA, T.J.; CUNHA, T.J.F.; MADARI, B.E.; BENITES, V. DE M.; HATES, M..H.B. Studies of the Compositions of Humic Acids from Amazonian Dark Earth Soils. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 41, n. 2, p 400-405, 2007. <http://dx.doi.org/10.1021/es060941x>.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, A. C. O. Anatomical structure and charcoal quality of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. Wood. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622006000200018>.

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

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. (Ed). **Carvão vegetal**: destilação, carvoejamento, controle de qualidade. Belo Horizonte, p. 39-61, 1982..

PAULA, J.E.; ALVES, J.L.H. **Madeiras nativas**: anatomia, dendrologia, dendrometria, produção e uso. Brasília: Fundação Mokiti Okada - MOA, 1997. 543p.

PAES, J. B.; LIMA, C. R., OLIVEIRA, E. O.; SANTOS, H. C. M. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. *Ciência da Madeira. Brazilian Journal of Wood Science*, Pelotas, v. 03, n. 01, p. 01-10, 2012. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v03n01a01>.

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, 2000. 113p. (Documentos, nº 38).

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*, Raleigh v. 8, n. 3, 2013.

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*, Tehran, v. 2012, 2012. 8p. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/523025>.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C.; OLIVEIRA E. **Carbonização**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010. 94 p.

PINHEIRO, P. C. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Biomassa & Energia*, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

PINHEIRO, P. C. C.; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A. de; SAMPAIO, R. S. **A produção de carvão vegetal**. 2. ed. Belo Horizonte: [s.n.], 2008. 103p.

PIRES, A. S.; FERNANDEZ, F. A. S.; BARROS, C. S. **Vivendo em um mundo em pedaços**: Efeitos da fragmentação florestal sobre comunidades e populações animais. In: *Essências em biologia da conservação*. Ed.s: ROCHA, C. F. D.; BERGALLO, H. G.; SLUYS, M. V.; ALVES, M. A. S., Rio de Janeiro, p. 232-260, 2006.

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

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. *Pesquisa florestal brasileira*, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014. <http://dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657>.

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*, Colombo, v. 31, n. 68, p. 295-307, out./dez. 2011. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.295>.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; ARAÚJO, A. C. C; BASTOS, T. A.; ROSADO, S. C. S; PINTO, J. F. N. Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação

siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 327-341, jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.09>

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004

RAMBALDI, D. M.; OLIVEIRA, D. A. S. **Fragmentação de ecossistemas**: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Brasília, 2003. 510p.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 497-505, 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.055>.

RIBASKI, J. As vantagens dos Sistemas Agroflorestais. **Cultivar**, 27 nov. 2009. Disponível em: <<http://www.grupocultivar.com.br/noticias/artigo-as-vantagens-dos-sistemas-agroflorestais>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

ROCHA, M. F. V.; COSTA, E. V. S.; JESUS, M. S.; VITAL, B. R. CARNEIRO, A. C.O.; CARVALHO, A. M. L. Interface of different conditions of growth and cutting age in estimating dry mass, mass of carbon and energy per hectare of *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus camaldulensis* clones. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, Austrália, v. 9, n. 23, p. 175-178, 2015.

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**, Pelotas, v. 8, n. 2, p. 54-63, 2017. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n2p54-63>.

SAIS, A. C.; OLIVEIRA, R. E. Distribuição de Sistemas Agroflorestais no Estado De São Paulo: apontamentos para restauração florestal e produção sustentável. **Redes**, Santa Cruz do Sul, v. 23, n.1, janeiro-abril, 2018.

SANTANA, W. M. S.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000100001>.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 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. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

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**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. **Resolução nº 40 SAA de 14 de dezembro de 2015**. São Paulo, 2015.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HOPPE, J. M.; DRESCHER, R.; SCHEEREN, L. W.; MAINARDI, G. L.; FLEIG, F. D. Produção de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em diferentes intensidades de desbaste. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 129-140, 1998. <http://dx.doi.org/10.5902/19805098357>.

SCHROTH, G. et al. **Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes**. Washington: Island Press, 2007. 537p.

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**, Botucatu, v. 30, n. 3, p. 257-262, 2015. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n3p257-262>.

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. **Brazilian Journal of Forestry Research**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015. <http://dx.doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.677>.

SILVA, T. S. S. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e esgoto**. 1999. 88 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, São Paulo, 1999.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRIGULHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n.3, p.543-549, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>.

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

SYRED, C.; GRIFFITHS, A.J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). **Fuel**, Cardiff, v. 85, p. 1566-1578, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2005.10.026>

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Test methods T 264 om-88**: preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: Tappi Technology Park, v.1, 1996.

TEIXEIRA, B. M. R.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. DE C.; LUCIA, R. M. D. Avaliação radial e longitudinal das propriedades mecânicas e da massa específica básica da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speng.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 463-468, 2011.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p.104-114, 2001.

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 Agrária**, Piracicaba, v. 2, n. 1, p.45-53, 2001.  
<http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v2i1.976>.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relação entre densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 79-88, 2001.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de Cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981767>.

VALVERDE, S. R. Efeito da densidade do carvão vegetal na metal siderurgia. **Jornal Brasileiro das Indústrias de Biomassa**. ed. 16, p. 30-31, 2014. Disponível em: <[https://issuu.com/jornalbiomassabr/docs/jornal\\_biomassa\\_ed\\_16\\_low](https://issuu.com/jornalbiomassabr/docs/jornal_biomassa_ed_16_low)>. Acesso em: 7 set. 2016.

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**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000100008>.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, nº 1).

VITAL, B. R.; JESUS, R. M.; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1986.