



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

MARILENE OLGA DOS SANTOS SILVA

**“CRESCIMENTO E QUALIDADE DA MADEIRA DA ESPÉCIE *Tachigali
vulgaris* CULTIVADA EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS PARA USO
BIOENERGÉTICO”**

BELÉM-PA

2018

MARILENE OLGA DOS SANTOS SILVA

“CRESCIMENTO E QUALIDADE DA MADEIRA DA ESPÉCIE *Tachigali vulgaris* CULTIVADA EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS PARA USO BIOENERGÉTICO”

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre.
Orientador: Prof^o. Dr. Thiago de Paula Protásio
Coorientadora: Prof^a Dra. Marcela Gomes da Silva

BELÉM-PA

2018

Silva, Marilene Olga dos Santos

Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético / Marilene Olga dos Santos Silva. – Belém, PA, 2018.

65 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais - Área de concentração: Manejo de Ecossistemas Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

Orientador: Thiago de Paula Prótasio.

1. Tachi-branco (*Tachigali vulgaris*). 2. Densidade de Plantio. 3. Tachi-branco – Características Físicas e Anatômicas. 4. Qualidade da Madeira. I. Prótasio, Thiago de Paula, (orient.)
II. Título

CDD – 583.74

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Edvaldo Wellington (CRB2/1398)

MARILENE OLGA DOS SANTOS SILVA

“CRESCIMENTO E QUALIDADE DA MADEIRA DA ESPÉCIE *Tachigali vulgaris* CULTIVADA EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS PARA USO BIOENERGÉTICO”

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais: área de concentração Manejo de Ecossistemas Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof^o. Dr. Thiago, de Paula Protásio

Aprovado em 16 de Julho de 2018.

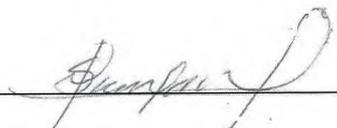
BANCA EXAMINADORA



Prof^o Dr. Thiago de Paula Protásio - Presidente
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA



Prof^ª Dra. Lina Bufalino - 1^o Examinador (Membro interno)
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA



Prof^o Dr. Sueo Numazawa - 2^o Examinador (Membro externo)
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA



Dra. Maíra Reis de Assis - 3^o Examinador (Membro externo)
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS - UFLA

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por me proporcionar força e coragem para que alcançar mais essa etapa da minha vida profissional.

Aos meus pais, Mario Nazareno Silva e Léa Tereza Santos Silva, pela confiança, amor, carinho e apoio.

Ao meu orientador, Prof^o Thiago de Paula Protásio pela orientação, aprendizagem, e por todo o suporte necessário para que essa pesquisa fosse realizada.

À minha coorientadora, Prof^a Marcela Gomes da Silva, pela paciência e por todos os ensinamentos.

Ao pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Delman de Almeida Gonçalves, por intermediar coleta de dados, pelo apoio e confiança com essa pesquisa.

À empresa Jari Celulose S/A pela parceria durante a realização da coleta dados e pelo transporte do material.

À CAPES pela concessão da bolsa.

À Banca Examinadora, por todos os conselhos e sugestões e pela disponibilidade de avaliação deste trabalho.

Aos grandes amigos adquiridos durante a pós graduação, em especial ao Nilton, Talita e Lizandra, obrigada pela amizade e pela convivência. Também àqueles que vieram desde a graduação, em especial Jefte, Rafael e Laís.

Aos meus colegas do LTPF, Juliana, Daniel, Camila, Luan e Suellen pela ajuda em várias etapas do trabalho.

E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo geral	13
2.2. Objetivos específicos	13
3. Revisão de literatura	13
3.1.1. A espécie <i>Tachigali vulgaris</i>	13
3.1.2. Qualidade da madeira para a geração de calor.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1. Área de estudo e modelo experimental	20
4.2. Coleta de dados e preparo do material	22
4.3. Propriedades físicas e anatômicas	23
4.3.1. Relação cerne/alburno e mensuração das fibras	23
4.3.2. Densidade básica da madeira	24
4.3.3. Teor máximo de umidade da madeira.....	24
4.4. Propriedades químicas	25
4.4.1. Composição química elementar	25
4.4.2. Composição química imediata.....	25
4.5. Poder calorífico da madeira	25
4.6. Estimativas de massa seca de madeira, carbono, combustível, produtividade e densidade energética	26
4.7. Caracterização térmica da madeira	27
4.8. Análises estatísticas	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1. Características de crescimento da espécie <i>Tachigali vulgaris</i>	28
5.2. Características físicas e anatômicas	34
5.2.1. Densidade básica.....	34
5.2.2. Mensuração das fibras e relação cerne/alburno	36
5.3. Composição química da madeira	38
5.3.1. Composição química elementar.....	39
5.3.2. Composição química imediata.....	40
5.4. Propriedades energéticas da madeira	41
5.5. Análise térmica da madeira	48
CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de TGA e DTG na combustão do carvão mineral.....	16
Figura 2. Localização da área de estudo.....	20
Figura 3. Subdivisão da área de plantio.....	21
Figura 4. Esquemas de amostragem do material para fuste único, bifurcado e trifurcado	22
Figura 5. Esquema de realização das análises	23
Figura 6. Relação funcional entre volume e o espaçamento	30
Figura 7. Estimativa de volume com e sem casca por hectare	31
Figura 8. Relação funcional entre massa seca de madeira, carbono e combustível com o espaçamento.....	32
Figura 9. Estimativa de massa seca de madeira, massa de carbono e massa combustível por hectare	33
Figura 10. Densidade básica em função do espaçamento	35
Figura 11. Relação funcional entre o diâmetro do cerne e o diâmetro total da árvore..	37
Figura 12. Relação funcional entre o diâmetro do cerne e a relação cerne/alburno.....	38
Figura 13. Poder calorífico superior e inferior da madeira	43
Figura 14. Variação do poder calorífico líquido com a umidade da madeira	43
Figura 15. Densidade energética em função do espaçamento	45
Figura 16. Produtividade energética em função da massa seca de madeira.....	46
Figura 17. Produtividade energética em função do espaçamento	47
Figura 18. Variação da produtividade energética líquida com a umidade da madeira..	48
Figura 19. Análise térmica diferencial (DTA) da combustão da madeira do tachi-branco	50
Figura 20. Curvas de TG da madeira de tachi-branco em atmosfera de oxigênio	51
Figura 21. Curvas de DTG da madeira de tachi-branco em atmosfera de oxigênio	52
Figura 22. Curvas de TG da madeira de tachi-branco em atmosfera de nitrogênio.....	55
Figura 23. Curvas de DTG da madeira de tachi-branco em atmosfera de nitrogênio ...	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades da madeira e do carvão da espécie <i>Tachigali vulgaris</i>	
Tabela 2. Descrição dos tratamentos	21
Tabela 3. Resumo da análise de variância para o volume com e sem casca, massa seca de madeira, carbono combustível	29
Tabela 4. Resumo da análise de variância para as características físicas e anatômicas da madeira do Tachi-branco	34
Tabela 5. Estatística descritiva das características morfológicas das fibras de madeira tachi-branco em função do espaçamento	36
Tabela 6. Resumo da análise de variância para a composição química elementar da madeira do tachi-branco	38
Tabela 7. Resumo da análise de variância para a composição química imediata da madeira do tachi-branco	38
Tabela 8. Composição química elementar da madeira do tachi-branco	40
Tabela 9. Composição química imediata da madeira do tachi-branco	41
Tabela 10. Resumo da análise de variância para características energéticas da madeira do Tachi-branco.....	41
Tabela 11. Resumo da análise de variância para a perda de massa e temperatura máxima em ambiente oxidativo.....	48
Tabela 12. Resumo da análise de variância para os parâmetros da combustão da madeira	49
Tabela 13. Resumo da análise de variância para os parâmetros da combustão da madeira (cont.).....	49
Tabela 14. Perda de massa e temperatura de pico, obtidas por TGA, nos estágios característicos da combustão da madeira do tachi-branco.....	52
Tabela 15. Parâmetros da combustão da madeira do tachi- branco.....	53
Tabela 16. Parâmetros da análise térmica da pirólise da madeira do tachi-branco	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Relação cerne/alburno	23
Equação 2. Espessura da fibra	24
Equação 3. Fração de parede da fibra.....	24
Equação 4. Densidade básica da madeira	24
Equação 5. Teor máximo de umidade	24
Equação 6. Teor de oxigênio elementar	25
Equação 7. Relação H/C	25
Equação 8. Relação N/C	25
Equação 9. Relação O/C	25
Equação 10. Poder calorífico inferior.....	26
Equação 11. Poder calorífico líquido..	26
Equação 12. Estimativa de massa seca de madeira	27
Equação 13. Estimativa de massa seca de carbono	27
Equação 14. Estimativa de massa combustível	27
Equação 15. Produtividade energética	26
Equação 16. Produtividade energética líquida	26
Equação 17. Densidade energética	26
Equação 18. Índice de combustão	28
Equação 19. Índice de ignição.....	28

RESUMO

O *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H.C. Lima (tachi-branco), é uma espécie leguminosa arbórea, nativa da região amazônica que devido às suas características tecnológicas, ecológicas e silviculturais, possui significativo potencial para expansão em plantios energéticos na Amazônia. No entanto, é necessário investigar o crescimento dessa espécie em diferentes espaçamentos de plantio e as implicações desse fator nas propriedades da madeira para finalidades energéticas. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de *Tachigali vulgaris* para compor florestas energéticas e a influência de diferentes espaçamentos de plantio no seu crescimento e propriedades da madeira. Foram coletadas árvores de 7 anos de idade provenientes de um plantio experimental, localizado no Distrito de Monte Dourado, estado do Pará, Brasil cultivadas em diferentes espaçamentos de 4,5 m² (3x1,5 m), 6 m² (3x2 m), 7,5 m² (3x2,5 m), 9 m² (3x3 m), 10,5 m² (3x3,5 m) e 12 m² (3x4 m). Maiores espaçamentos (especialmente 9 m² e 12 m²) resultaram em melhor desempenho individual de crescimento observado nas variáveis volume com e sem casca, massa seca de madeira, carbono e combustível). O espaçamento de plantio não influenciou significativamente a maioria das propriedades da madeira relevantes para uso energético. Entretanto, observou-se que a densidade básica da madeira aumentou cerca de 9% do menor para o maior espaçamento. Portanto, o aumento do espaçamento conduziu a uma tendência de crescimento na produtividade e densidade energética, além da diminuição da relação cerne/alburno. A madeira de tachi-branco apresentou a seguinte composição química elementar: 0,75%N; 6,3%H; 42,6%O; 49,8%C; e 0,02%S. A composição química imediata foi de 78,54% de materiais voláteis, 21% de carbono fixo e 0,49% de cinzas. A análise termogravimétrica da madeira demonstrou que o comportamento de degradação da madeira do tachi-branco, foi semelhante ao reportado para outras espécies florestais, com índice de combustão de $4 \times 10^7 \%^2 / (\text{min}^2/\text{C}^3)$ e de $4 \times 10^3 \% \text{ min}^{-3}$ para o índice de ignição. O espaçamento indicado foi o 3 x 3m (9 m²), pois proporcionou maior crescimento sem alterar negativamente a qualidade da madeira para bioenergia. Os resultados encontrados demonstram a espécie *Tachigali vulgaris* apresenta muito potencial para bioenergia dado seu rápido crescimento e suas características físicas, químicas e energéticas da madeira.

Palavras – chave: Tachi – branco. Densidade de plantio. Crescimento. Qualidade da madeira.

ABSTRACT

Tachigali vulgaris (tachi-branco) is a leguminous native tree species from the Amazon region that due to its technological, ecological and silvicultural characteristics, it has significant potential for expansion in Amazonian energy plantations. However, it is necessary to investigate the growth of this species in different planting spacings and the implications of that factor in the properties of wood for energy purposes. The objective of this study was to evaluate the potential of *Tachigali vulgaris* to compose energetic forests and the influence of different planting spacings on their growth and wood properties. Seven-year-old trees were collected from an experimental planting, located in the District of Monte Dourado, state of Pará, Brazil, cultivated at different spacings of 4.5 m² (3 x 1,5 m), 6 m² (3x2 m), 7,5 m² (3x2,5 m), 9 m² (3x3 m), 10,5 m² (3x3,5 m) and 12 m² (3x4 m). Larger spacings (especially 9 m² and 12 m²) resulted in better individual growth performance observed the volume variables with and without bark, dry mass of wood, carbon and fuel). Planting spacing did not influence significantly most wood relevant properties to energy use. On the another hand, it was observed that the basic density of wood increased about 9% from the lowest to the largest spacing. Therefore, increased spacing led to agrowth trend in productivity and energy density, as well as a decrease in the core / sapwood ratio. The tachi-branco wood had the following elemental chemical composition: 0.75% N; 6,3% H; 42,6%; 49,8% C; and 0,02% S. The immediate chemical composition was 78,54% of volatile materials, 21% of fixed carbon and 0,49% of ash. The thermogravimetric analysis of the wood showed that the degradation behavior of the tachi-branco wood was similar to that reported for other forest species, with a combustion index of $4 \times 10^7 \%^2 / (\text{min}^2 / \text{C}^3)$ and $4 \times 10^3 \% \text{ min}^{-3}$ for the ignition index. The indicated spacing was 3 x 3m (9 m²), as it provided higher growth without negatively affecting the quality of wood for bioenergy. The results show the *Tachigali vulgaris* species presents a great potential for bioenergy because of its rapid growth and its physical, chemical and energetic characteristics of the wood.

Keywords: Tachi – branco. Density planting. Growth. Wood quality

1. INTRODUÇÃO

O bioma Amazônico apresenta espécies florestais pouco estudadas para fins energéticos, embora a produção de energia a partir da madeira seja amplamente difundida, principalmente para uso doméstico e para produção de carvão para indústrias siderúrgicas (SILVA et al., 2014). Dessa forma, há grande potencial para plantios florestais homogêneos com finalidades energéticas que, se bem executados, podem diminuir a pressão sobre as florestas nativas.

O potencial das florestas energéticas depende da produtividade de biomassa das espécies plantadas, da adaptação dessas espécies às diferentes condições edafoclimáticas e dos métodos silviculturais aplicados. Adicionalmente, é desejável que a madeira tenha aptidão para aplicações energéticas, o que é avaliado por propriedades como a densidade básica e o poder calorífico (COSTA et al., 2015).

O *Tachigali vulgaris* (tachi-branco) é uma espécie leguminosa arbórea, nativa da região amazônica e que apresenta características tecnológicas, ecológicas e silviculturais atrativas para implementação de plantios energéticos locais. Mesmo em condição cultivada sem tecnologia de última geração e sem melhoramento genético, relata-se que esta espécie apresenta rápido crescimento e elevada produção de biomassa.

Pode vicejar em uma vasta faixa geográfica, em condições edafoclimáticas diferentes, sendo capaz de associar-se com bactérias do gênero *Rizhobium*, fixadoras de nitrogênio (N) atmosférico (SILVA et al., 2016). A associação com microrganismos fixadores de nitrogênio pode resultar em rápido crescimento e produção de serapilheira rica em nutrientes capaz de aumentar a matéria orgânica do solo (FARIAS et al., 2016).

Quando comparada ao híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, *Tachigali vulgaris* apresentou maiores taxas de sobrevivência e maiores produções de biomassa na recuperação de áreas degradadas, além de proporcionar benefícios adicionais, como o aumento na produção de serapilheira e a maior exclusão de gramíneas invasoras, (FARIAS et al., 2016). Portanto, o tachi branco pode ser recomendado para reflorestamentos e recuperação de áreas degradadas.

A madeira do tachi-branco possui características comparáveis àquelas tradicionalmente utilizadas no sul do Brasil para finalidades energéticas. Árvores oriundas de um plantio experimental apresentaram madeira com densidade básica de 0,633 g/cm³ e poder calorífico de 4390 Kcal/kg (TOMASELLI et al., 1983).

Portanto, o tachi-branco pode ser uma alternativa para substituir o eucalipto para implementação de culturas energéticas na Amazônia destinadas à produção de lenha e carvão vegetal (FARIAS et al., 2016).

Tão importante quanto a espécie, as práticas silviculturais são variáveis de fundamental importância para o fornecimento adequado de biomassa. O espaçamento é um dos fatores que pode afetar o desenvolvimento e a produtividade dessa espécie em plantios homogêneos (SILVA et al., 2016).

Deste modo, é necessário conhecer o comportamento do crescimento dessa espécie em diferentes espaçamentos de plantio e as implicações desse fator nas propriedades da madeira relevantes para produção energética. Neste contexto, o presente estudo teve como visou responder às seguintes perguntas:

- i) O crescimento e as propriedades tecnológicas da madeira do tachi-branco são influenciados por diferentes espaçamentos de plantio?
- ii) Se sim, quais fatores de crescimento e propriedades que são influenciados?
- iii) Qual a qualidade da madeira do tachi-branco para utilizações bioenergéticas?
- iv) E, finalmente, qual espaçamento é o mais indicado para a espécie de estudo?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de *Tachigali vulgaris* para compor florestas energéticas e a influência de diferentes espaçamentos de plantio no seu crescimento e propriedades da madeira.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar o crescimento das árvores cultivadas em diferentes espaçamentos;
- Analisar as propriedades da madeira da espécie cultivada em diferentes espaçamentos;
- Avaliar a qualidade da madeira para uso bioenergético;
- Determinar o melhor espaçamento para implantação de florestas energéticas de tachi-branco.

3. Revisão de literatura

3.1.1. A espécie *Tachigali vulgaris*

Primeiramente, é importante destacar que de acordo com a revisão dos autores Silva e Lima (2007), o gênero *Sclerolobium* deve ser tratado como sinônimo de *Tachigali*. A

espécie *Sclerolobium paniculatum*, passou a ser denominada então de *Tachigali vulgaris* (L. G. Silva & H. C. Lima, nom. nov.).

O tachi-branco como é popularmente conhecido, é uma espécie leguminosa arbórea nativa da Amazônia brasileira, que possui a capacidade de fixação de nitrogênio e elevada produção de serapilheira. Essas características possibilitam que a espécie possa ser plantada em áreas alteradas pela ação antrópica.

Para que a espécie possa ser indicada para a produção de energia, é necessário, entre outras características, que está presente uma boa adaptação ao ambiente, altas produtividades e boas propriedades tais como: densidade básica, teores de lignina, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, como, também, a fração de parede da fibra, dentre outros (PAULA, 1980, BARCELLOS et al., 2005; GARCÍA et al., 2012; SANTOS et al., 2013).

O tachi-branco apresenta rápido crescimento, com incremento médio anual de 2,2 cm/ano em altura, 2,9 cm/ano em diâmetro altura do peito (DAP) e 9,2 m³ em volume (CASTRO et al., 1990). De acordo com alguns autores, a espécie reúne características promissoras para ser utilizada em plantações para uso energético, como observado na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades da madeira e do carvão da espécie *Tachigali vulgaris*

Biomassa	Propriedades	Origem do material	
		Plantios	Floresta nativa
Madeira	Densidade básica (g/cm ³)	0,633	0,602
	Poder calorífico superior (kcal/kg)	4580	4390
	Massa seca (kg/árvore)	-	48,84
	Massa seca (tonelada/hectare)	109,8	-
	Fração de Parede das fibras (%)	-	68,5
	Teor de materiais voláteis (%)	83,84	78,61
	Teor de carbono fixo (%)	15,63	21,0
	Teor de cinzas (%)	-	0,39
Carvão vegetal	Rendimento gravimétrico (%)	35,9	37,80
	Teor de materiais voláteis (%)	24,80	23,40
	Teor de carbono fixo (%)	74,0	74,90
	Teor de cinzas (%)	1,17	1,62
	Poder calorífico superior (kcal/kg)	7678	7690

Fonte: Paula 1980, Tomasseli et al., 1993; Oliveira et al., 2008; Vale et al., 2002

Avaliando o rendimento da carbonização e qualidade do carvão vegetal das espécies *Tachigali vulgaris* e *Eucalyptus grandis*, Vale et al. (1996) observaram que o tachi-branco apresentou maiores rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e em carbono fixo de 36,80%, 27,23%, superiores ao eucalipto de 33,21% e 27,20%. Rios et al. (2017) apresentaram resultados semelhantes para rendimentos gravimétricos de carvão produzido a partir da madeira do tachi-branco e do *Eucalyptus* sp., de aproximadamente 29,99% e 25,44%, respectivamente.

Segundo Brewbaker et al. (1984), espécies fixadoras de nitrogênio, a exemplo do tachi-branco, apresentam combinações de características importantes para serem utilizadas em plantios, são elas: capacidade de fixar nitrogênio e restaurar a fertilidade do solo; crescimento rápido e capacidade de suprimir as ervas daninhas após o primeiro ano.

3.1.2. Qualidade da madeira para a geração de calor

Existem duas maneiras de liberar calor e energia da madeira: combustão direta ou conversão termoquímica em gases e líquidos (MÜLLER-HAGEDORN et al., 2003). A combustão é a oxidação completa de um combustível que ocorre em uma faixa de temperatura de 250 °C a 800°C (GARCÍA, et al., 2012). Por meio das reações químicas, o carbono e o hidrogênio da madeira se combinam com o oxigênio, liberando energia quando o combustível atinge a temperatura de ignição. A combustão se processará em função da temperatura de ignição, da turbulência do comburente (oxigênio) e do tempo disponível para as reações.

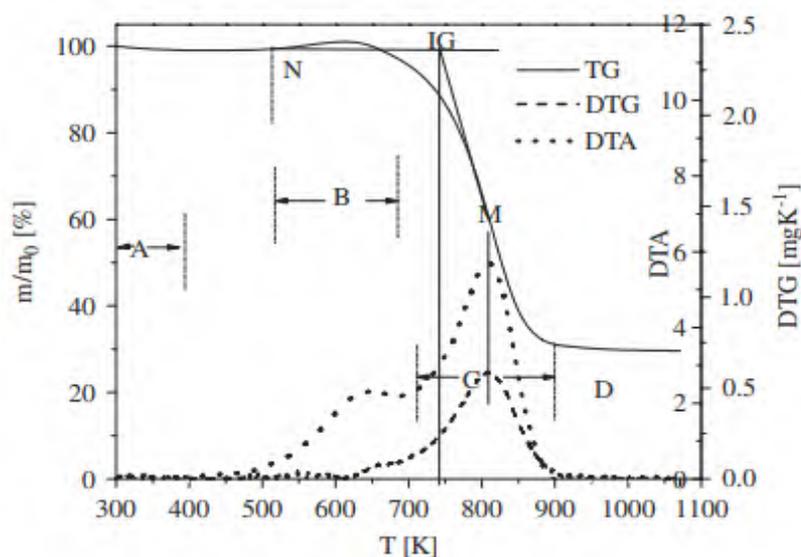
Durante a combustão, o carbono é oxidado para formar dióxido de carbono e o hidrogênio é oxidado para formar a água. Pequenas quantidades de outros gases também são formadas, como o monóxido de carbono e hidrocarbonetos de baixa massa molecular, pois nem todo carbono e hidrogênio reage completamente com oxigênio (DEMIRBAS et al., 2004).

O processo de combustão pode ser agrupado em duas reações principais: primeiro, a volatilização dos principais constituintes da biomassa e produção de carvão. Em seguida, a decomposição de lignina e combustão de carvão vegetal gerado nos estágios iniciais (GARCÍA et al., 2012). A etapa inicial é caracterizada pela combustão homogênea dos gases voláteis e o oxigênio do ar e formação de carbono sólido (carbono fixo). Esses voláteis são produzidos a partir da decomposição térmica dos constituintes moleculares da madeira. Já a segunda fase, caracteriza-se pela combustão heterogênea, ou seja, entre o carbono sólido e o oxigênio.

As análises termogravimétricas (TGA) são utilizadas para investigar e comparar os eventos térmicos durante a combustão de pequenas amostras de combustível e medir as variações de massa durante o aquecimento. Esta técnica é amplamente aplicada para o estudo da decomposição da madeira e seus principais componentes, a celulose, as hemiceluloses e a lignina (GARCÍA et al., 2012).

Para determinar a temperatura de ignição, dois pontos na curva termogravimétrica (TG) devem primeiro ser identificados. Um marcado como “M” é o ponto em que uma linha vertical do pico acentuado da curva da derivada termogravimétrica (DTG) atravessa a curva TG. O outro (marcado como N) é o ponto em que a volatilização começa. Uma tangente à curva TG curva que passa por M e outra tangente horizontal a N são desenhadas. O ponto em que essas linhas se cruzam é marcado como IG, corresponde à temperatura de ignição. Este processo é mostrado na figura 1, na qual o ponto de ignição é de aproximadamente 725 K para o carvão mineral.

Figura 1. Curva de TGA e DTG na combustão do carvão mineral



Fonte: WANG et al., 2009

Segundo Ragland et al. (1991), a decomposição da biomassa sob condições oxidativas é fortemente influenciada pelas propriedades físicas e químicas dos combustíveis, e estas, por sua vez, variam de acordo com espécies, localização dentro da árvore e condições de crescimento.

Para a produção de energia, características como densidade básica, teores de lignina, extrativos, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, além da composição elementar e o poder calorífico, estão entre os principais critérios de seleção da madeira para essa

atividade (BARCELLOS et al., 2005; PAULA et al., 2011; GARCÍA et al., 2012; SANTOS et al., 2013).

A densidade básica representa a concentração de massa seca por volume saturado de madeira e influencia a velocidade da queima durante a produção direta de energia, assim como a densidade do carvão vegetal oriundo dessas madeiras (ELOY et al., 2014).

O uso de madeiras com baixa densidade para a produção direta de energia na forma de calor implica em uma queima rápida e numa menor produção de energia por unidade de volume ao contrário de madeiras com maiores densidades (VALE et al., 2002).

A umidade, assim como a densidade básica, é uma propriedade física que influencia diretamente os processos de combustão (BRITO E BARICHELO, 1978). Já que a primeira fase da combustão consiste na secagem da madeira (BRITO e BARRICHELO, 1978). A umidade causa perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, pois evapora e absorve energia em combustão (FURTADO et al., 2012).

O poder calorífico é diretamente proporcional a energia contida em um combustível. Já que o poder calorífico de um material é a quantidade de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa (VALE et al., 2002; MARAFON et al., 2016). Portanto, é uma variável que expressa a energia da combustão.

Além do poder calorífico, o conhecimento das composições químicas elementar e imediata é essencial na avaliação do potencial energético do combustível. A análise química elementar corresponde à composição percentual em massa seca dos principais elementos que constituem a biomassa, ou seja, carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S).

Para a produção de energia, é desejável que a madeira apresente elevados teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio e nitrogênio. O poder calorífico superior apresenta correlações positivas com os teores de carbono e hidrogênio e negativas com os teores de oxigênio e nitrogênio (TELMO et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2011; PEREIRA et al., 2013; FERNANDES et al., 2013).

A presença de nitrogênio e enxofre resulta na formação de gases NO_x e SO_x , altamente tóxicos e poluentes do ambiente. Portanto, quantidades diminutas destes componentes elementares são desejáveis no processo de carbonização da madeira (REIS et al., 2012).

Já a composição química imediata corresponde ao conteúdo percentual de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e, eventualmente, da umidade na massa de combustível (BRITO e BARICHELO, 1978; NOGUEIRA et al., 2000). Os teores de material volátil

e carbono fixo fornecem uma medida da facilidade com que a biomassa pode ser inflamada e, posteriormente, gaseificada ou oxidada, dependendo do processo de conversão térmica utilizado (FERNANDES et al., 2013).

A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível porque os componentes voláteis, quando aquecidos, são liberados pelo material e se queimam rapidamente na forma gasosa, enquanto que o carbono fixo queima-se vagorosamente na fase sólida como carvão (BRITO E BARRICHELO, 1978).

Já o elevado teor de cinzas é desvantajoso porque diminui o poder calorífico da biomassa e a transferência de calor no combustível (BUFALINO et al., 2012). Dependendo da composição das cinzas, estas podem apresentar um ponto de fusão baixo, ocasionando problemas de escória e aumentando as incrustações dos equipamentos utilizados no processo de combustão (DEMIRBAS et al., 2004; MARAFON et al., 2016). A presença de escória impede a transferência de calor e tem que ser removida manualmente (LEWANDOWSKI et al., 1997).

Segundo Pelanda et al. (2015), quantidades significativas de P_2O_5 , SO_3 e Na_2O podem se depositar nas superfícies de troca térmica dos geradores de vapor, uma vez que elementos como silício (Si), fósforo (P) e sódio (Na) tendem a diminuir a temperatura de fusão da cinza.

As características anatômicas são importantes parâmetros para predizer utilizações adequadas para a madeira, inclusive para a geração de energia. Segundo Paula (2003), quanto maior for a fração parede, maior lignina terá a fibra. Portanto, madeira rica em fibras de fração parede a partir de 60% e densidade igualmente alta, a partir de 600 kg/m^3 , devem ser recomendadas para geração de energia.

Outro fator anatômico importante é a proporção de cerne/alburno presentes na madeira, uma vez que estes tecidos têm comportamentos muito diferenciados, tanto do ponto de vista físico, como químico, afetando as propriedades energéticas da madeira. Segundo Pereira et al. (2013), a relação C/A tem correlação negativa com densidade básica, sendo altos valores dessa propriedade desejáveis para a produção direta de calor. Assim, menor relação C/A são mais indicadas para a produção energética em plantios jovens, pois o cerne, formado de dentro para fora, inicialmente corresponde à madeira juvenil de menor densidade (PEREIRA et al., 2013; COSTA et al., 2017).

Entretanto, o cerne apresenta lignina de peso molecular mais elevado e é mais condensada (BROWNING, 1963). A maior condensação da lignina implica em uma maior

resistência da mesma à decomposição térmica obtendo um elevado rendimento gravimétrico e carvão com alto teor de carbono. Explica-se o fato pela sua composição químico-estrutural mais complexa, aliada ao fato da mesma possuir cerca de 65% de carbono elementar (c) (BRITO BARRICHELO, 2006).

Outro ponto importante, são os maiores teores de extrativos totais encontrados na madeira do cerne. A presença de altos teores de extrativos é uma característica vantajosa para produção de energia devido ao elevado poder calorífico desses componentes (KLITZKE et al, 2008; BUFALINO et al., 2012)

3.1.3. Espaçamento de plantio

O crescimento da árvore é consequência de diferentes fatores bióticos e abióticos. Quando as árvores são submetidas a diferentes condições de crescimento, podem ocorrer variações nos componentes celulares da madeira e, conseqüentemente, nas propriedades tecnológicas, podendo ocasionar modificações nas propriedades energéticas da madeira (MOULIN et al., 2015).

A densidade de plantio exerce influência sob o crescimento e a produtividade das árvores na floresta. Altas taxas de crescimento dependem, dentre outros fatores, do espaçamento de plantio (BINKLEY et al., 2017). Deste modo, é possível induzir variações na taxa de crescimento das árvores interferindo no espaçamento plantio utilizado (ROCHA et al., 2016).

A maioria dos estudos do espaçamento e as propriedades de madeira, estão relacionados a espécies do gênero *Eucalyptus*. Estes estudos incluem, o efeito do espaçamento sob o volume e estimativas de biomassa seca, massa de carbono e lignina (GOULART et al., 2003; ROCHA et al., 2017). Espaçamentos mais densos mostram, em termos de produção total por hectare, maior volume, maior produção de biomassa seca, maior massa de carbono e lignina.

Rocha et al. (2016) encontram em clones de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade plantados em espaçamentos de 4,5 a 9,0 m², densidade básica da madeira de 550 kg/m³, sendo aproximadamente 8% maior que a de árvores plantadas em espaçamento de 1,5 m² (510 kg/m³). Miranda et al. (2003) observaram variações semelhantes para mesma espécie em relação a densidade básica da madeira de 565 kg/m³ a 594 kg/m³ nos espaçamentos de 3 x 2 m e 4 x 5 m, respectivamente.

Porém, Migliorini et al. (1980) observaram comportamento inverso, concluindo que madeira produzida sob espaçamentos mais densos apresentou um aumento na densidade

básica. Como observado, a densidade básica da madeira apresenta comportamento controverso e, por isso, é necessário estudo complementares.

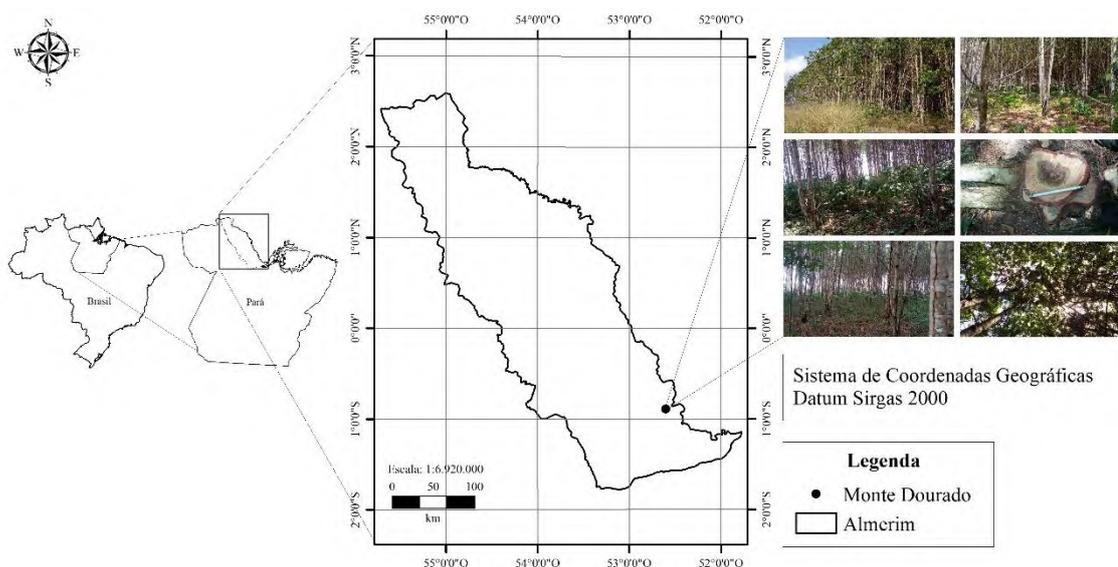
Souza (2012) observou acréscimo de 23% no teor de cinzas para a espécie *Eucalyptus urophylla* e para o híbrido de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*, que variou de 0,27 % a 0,35 % do menor espaçamento (3x3) para o maior espaçamento (9x2). Entretanto, é importante mencionar que o teor de cinzas é altamente influenciado pelo ambiente. Para o teor de lignina, Rocha et al. (2016) observaram aumento de 12% dessa variável com o aumento dos espaçamentos (6,0 e 9,0 m²) a partir de 3,0 m².

4. MATERIAL E MÉTODOS

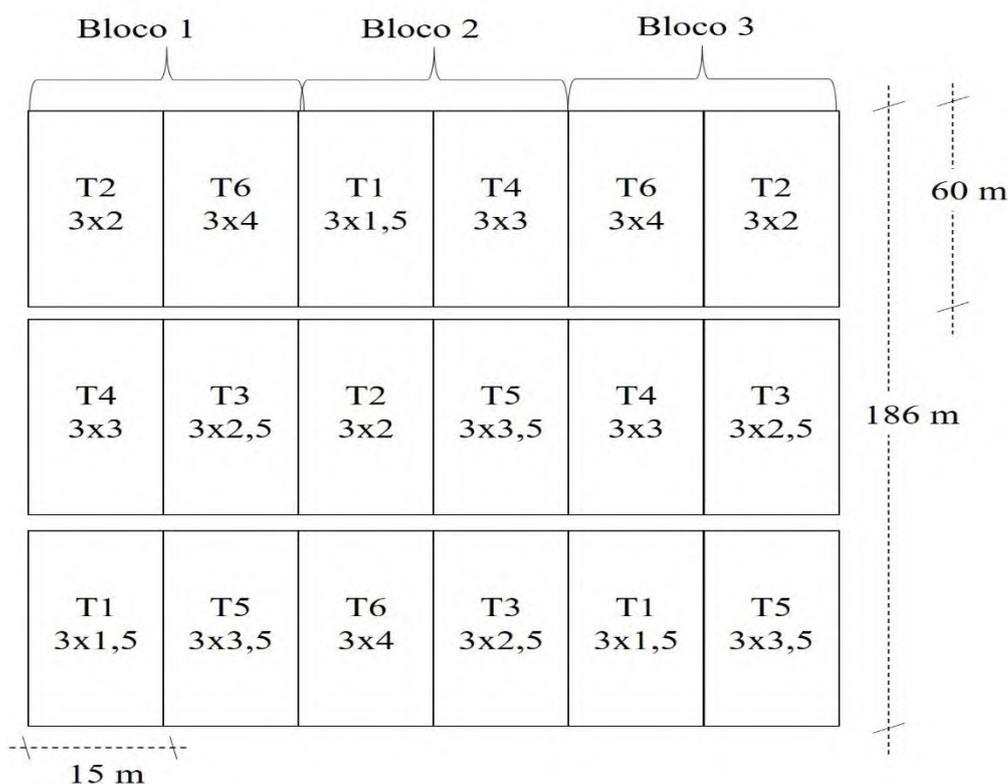
4.1. Área de estudo e modelo experimental

A coleta de dados foi realizada em um plantio experimental de aproximadamente 6 hectares, pertencente à empresa Jari Celulose S.A., localizada no distrito de Monte Dourado, Pará, Brasil. Os plantios da empresa estão localizados em áreas cuja temperatura média anual é de aproximadamente 26 °C (DEMOLINARI et al., 2007).

Figura 2. Localização da área de estudo



O solo da região é denominado de Latossolo Amarelo distrófico, textura média. Foi realizada uma aplicação de calcário 402 kg/ha no plantio. Além disso, foram aplicados 150 kg ha⁻¹ de NPK 6-30-6 no primeiro e 85 kg ha⁻¹ 15-0-30 no segundo ano de plantio, respectivamente. A área de plantio foi subdividida em três blocos de acordo com as características da área de estudo, conforme observado na figura 3.

Figura 3. Subdivisão da área de plantio

Neste estudo foram avaliados seis espaçamentos (Tabela 2) e 54 árvores-amostras (3 árvores x 3 blocos x 6 espaçamentos) da espécie *Tachigali vulgares*, aos 7 anos de idade. De acordo com as características do plantio, foram selecionadas 31 árvores de fuste único e 23 árvores bifurcadas, excluindo-se aquelas que, visualmente, apresentavam defeito e, também, as que estavam localizadas nas bordas dos plantios.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos

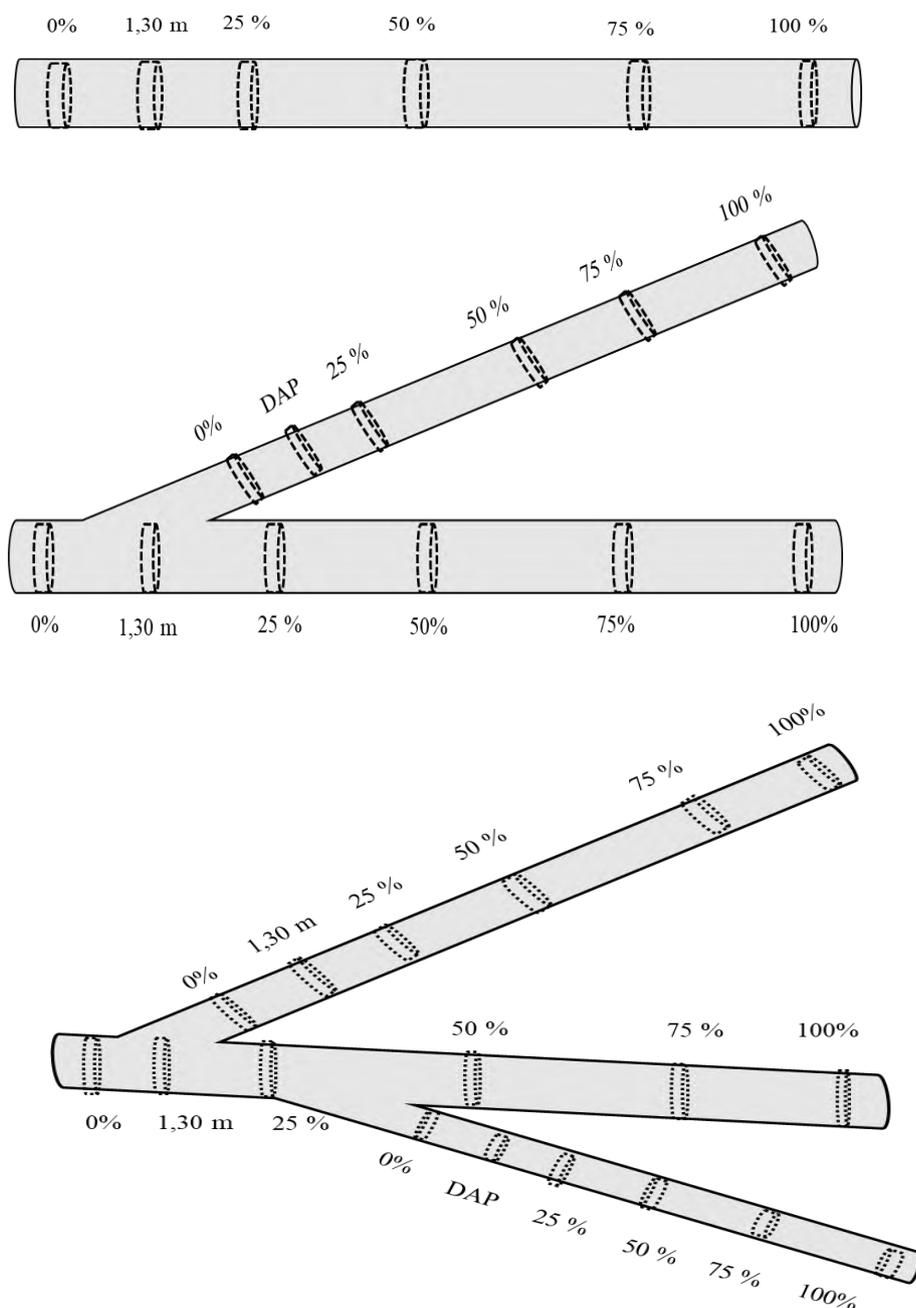
Espaçamento	Área útil (m ² /árvore)	DAP (cm)	Ht (m)
3,0 m x 1,5 m	4,5	12,03	19,04
3,0 m x 2,0 m	6,0	12,52	17,87
3,0 m x 2,5 m	7,5	11,84	17,76
3,0 m x 3,0 m	9,0	14,04	18,15
3,0 m x 3,5 m	10,5	13,22	17,98
3,0 m x 4,0 m	12,0	14,72	18,31

Todas as árvores foram devidamente medidas nas posições de 0,5m, 0,70m, 1,30m, 2,0m, e a partir desta última, a cada 2 metros até a altura com diâmetro de 5 cm com casca, sendo também cubados os fustes secundários. Posteriormente, o volume individual, com e sem casca, foi estimado pela equação de Smalian.

4.2. Coleta de dados e preparo do material

Foram retirados discos, em seis pontos longitudinais ao longo do fuste (principal e secundário no caso de árvores bifurcadas), na base (0%), DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura árvore com diâmetro mínimo de 5 cm casca (figura 4). Os discos foram numerados e encaminhados ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia.

Figura 4. Esquemas de amostragem do material para fuste único, bifurcado e trifurcado

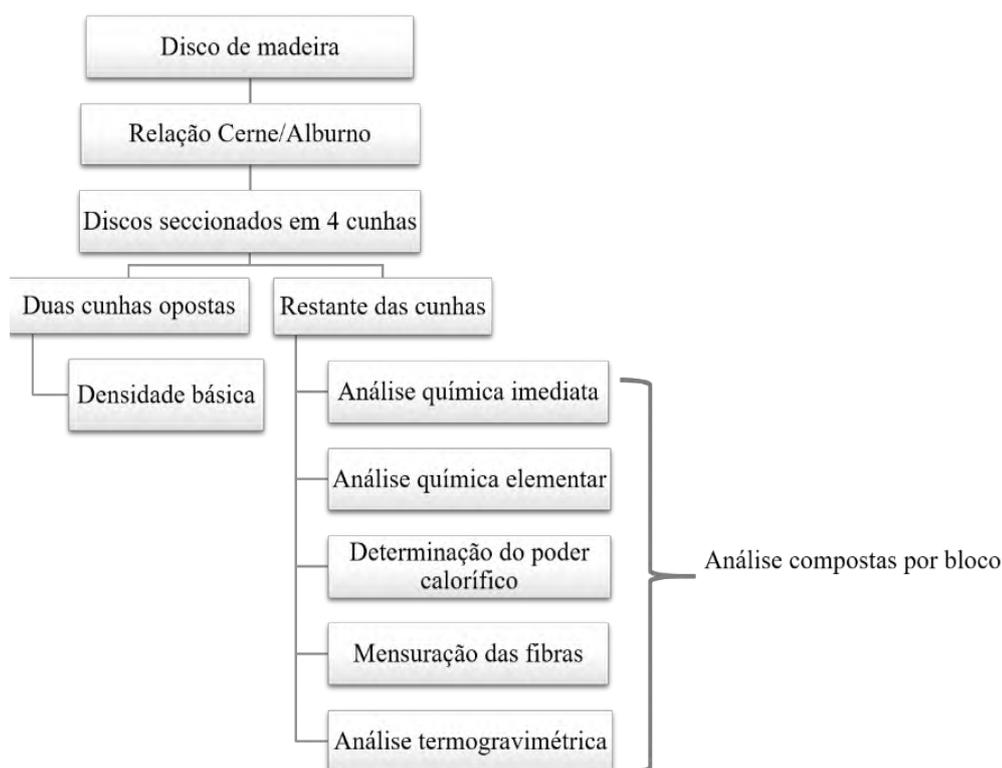


Foi realizada a medição das porcentagens de cerne e alburno nos discos retirados do DAP. Posteriormente, todos os discos, foram seccionados em 4 cunhas das quais

utilizou-se duas cunhas opostas para a determinação da densidade básica. As demais foram utilizadas para as outras análises do trabalho, conforme figura 5.

É importante mencionar que para as análises químicas, energéticas, térmicas e anatômicas foi preparada uma amostra composta por bloco de todas as posições de amostragem ao longo do fuste. As repetições de cada tratamento então foram homogeneizadas com intuito de formar uma amostra composta representativa do tratamento analisado.

Figura 5. Esquema de realização das análises



4.3. Propriedades físicas e anatômicas

4.3.1. Relação cerne/alburno e mensuração das fibras

Foram realizadas as medições do diâmetro da árvore e do diâmetro do cerne dos discos retirados do diâmetro a altura do peito, utilizando-se uma régua de 10 mm de precisão. A relação cerne/ alburno (C/A) foi calculada de acordo com a equação sugerida por Pereira et al (2013):

$$C/A = \frac{Dc^2}{D^2 - Dc^2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Dc é o diâmetro do cerne (cm);

D é o diâmetro do disco sem casca (cm).

Para a mensuração das fibras, pequenos fragmentos de madeira foram retirados em cada posição de amostragem e amostras compostas por bloco foram preparadas. Posteriormente, as fibras vegetais das amostras foram individualizadas quando imersas em solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial (1:1) por 48 horas a 60°C. Em seguida, montaram-se lâminas temporárias para medição do comprimento e diâmetro das fibras e do diâmetro dos lúmens. Para cada amostra, 30 fibras foram mensuradas, conforme recomendações da IAWA (1989).

A espessura e a fração de parede foram obtidas por meio das seguintes equações:

$$EP = \frac{D-DL}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$FP = \left(\frac{2 \times EP}{D} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

EP é a espessura da parede da fibra (μm);

D é o diâmetro da fibra (μm);

DL é o diâmetro do lume da fibra (μm);

FP é a fração de parede em (%).

4.3.2. Densidade básica da madeira

Para a determinação da densidade básica foram utilizadas duas cunhas opostas provenientes dos discos de cada posição de amostragem ao longo do fuste. A densidade básica de cada cunha foi determinada conforme o procedimento descrito na norma NBR11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), conforme a Equação 4. A densidade básica média da árvore foi calculada a partir da média aritmética de cada cunha em cada posição longitudinal de amostragem.

$$\rho = \frac{Ms}{Vs} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

ρ é a densidade básica (kg/m^3)

Ms é a massa seca (kg)

Vs é o volume saturado (m^3)

4.3.3. Teor máximo de umidade da madeira

O teor máximo de umidade foi obtido por meio da Equação 5, conforme sugerido por Simpson e Tenwolde (1999):

$$\text{MTU (\%)} = ((1,54 - \rho) / (1,54 \times \rho)) \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

MTU é o teor máximo de umidade (%)

ρ é a densidade básica (kg/m^3)

4.4. Propriedades químicas

4.4.1. Composição química elementar

Para a realização das análises químicas da madeira, uma cunha proveniente de cada de posição de amostragem foi transformada em cavaco e posteriormente moída em um moinho do tipo willey. Os teores de materiais voláteis e cinzas foram obtidos por meio do procedimento descrito na norma D1762-84 (ASTM, 2007), utilizando as frações das amostras retidas entre as peneiras de 40-60 *mesh*. Já o teor de carbono fixo, foi obtido por diferença subtraindo-se o teor de matérias voláteis e o teor de cinzas de 100%.

4.4.2. Composição química imediata

Para a composição química elementar, utilizou-se as frações das amostras que passaram pela peneira de 60 *mesh*. A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), com base na massa seca de madeira, foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube). O teor de oxigênio foi obtido por diferença, conforme a equação 6:

$$O (\%) = 100 - C (\%) - H\% - N (\%) - S (\%) - Cz (\%) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

O é o teor de oxigênio (%);

C é o teor de carbono (%);

H é o teor de hidrogênio (%);

N é o teor de nitrogênio (%);

S é o teor de enxofre (%);

Cz é o teor de cinzas (%).

Adicionalmente, foram calculadas as relações entre N/C, H/C e O/C pelas equações 7, 8 e 9 e obtidas as fórmulas empíricas das madeiras analisadas em cada espaçamento.

$$H/C = \frac{\text{número de átomos de H}}{\text{número de átomos de C}} = \frac{\%H/1}{\%C/12} \quad (\text{Equação 7})$$

$$N/C = \frac{\text{número de átomos de N}}{\text{número de átomos de C}} = \frac{\%N/14}{\%C/12} \quad (\text{Equação 8})$$

$$O/C = \frac{\text{número de átomos de O}}{\text{número de átomos de C}} = \frac{\%O/16}{\%C/12} \quad (\text{Equação 9})$$

4.5. Poder calorífico da madeira

Para a determinação do poder calorífico, foi considerado as frações das amostras que passaram pela peneira de 40 *mesh* e ficaram retidas na peneira de 60 *mesh*. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por meio da bomba calorimétrica digital, seguindo os preceitos na norma E711-87 (ASTM, 2004).

O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico líquido (PCL) foram calculados conforme as equações 10 e 11. Para o poder calorífico líquido, foi considerado o teor máximo de umidade da madeira até a umidade base seca (0%).

$$PCI = PCS - \left(\frac{600 \times 9H}{100} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

$$PCL = \left(\frac{PCI - (6 \times U_{bs})}{100 + U_{bs}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

PCS é o poder calorífico superior (kcal/kg);

H é o teor de hidrogênio (%);

PCL é o poder calorífico líquido (kcal/kg);

PCI é poder calorífico inferior (kcal/kg);

U_{bs} é a umidade da madeira (%).

4.6. Estimativas de massa seca de madeira, carbono, combustível, produtividade e densidade energética

Com o volume individual sem casca (m³) e a densidade básica média (kg/m³), foi estimada a massa seca individual das árvores (kg/árvore), conforme a equação abaixo:

$$MSM = V_{sc} \times \rho \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

MSM é a massa seca de madeira (kg/árvore)

V_{sc} é o volume sem casca (m³)

ρ é a densidade básica da madeira (kg/m³)

Já as estimativas de massa de carbono e massa combustível foram determinadas a partir das seguintes equações:

$$MC = MSM \times TC \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

MC é a massa de carbono (kg/árvore);

MSM é a massa seca da madeira (kg/árvore);

TC é o teor de carbono (%) dividido por 100.

$$M_{\text{combustível}} = MSM \times (C + H + S - CZ) \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

M_{combustível} é a massa de combustível (kg/árvore)

MSM é a massa seca da madeira (kg/árvore);

C + H + S é a soma das porcentagens de carbono (%), hidrogênio (%) e enxofre (%), previamente divididas por 100;

CZ é a porcentagem de cinza (%) dividida por 100;

Por meio da biomassa seca e do poder calorífico inferior, foram estimadas a produtividade energética e a produtividade energética líquida por árvore, conforme as equações abaixo:

$$PE = MSM \times PCI \quad (\text{Equação 15})$$

$$PEL = MU \times PCL \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

PE é a produtividade energética (Mcal/árvore);

PEL é a produtividade energética líquida (Mcal/árvore);

PCI é o poder calorífico inferior (kcal/kg);

MSM é a produção de massa seca (kg/árvore);

PCL é o poder calorífico líquido (kcal/kg);

MU é a massa úmida (g) obtida pela equação $MU = MSM \cdot (1 + U_{bs}/100)$

Para o cálculo da energia estocada por m³ de madeira, expressa em Mcal/m³, multiplicou-se a massa seca da madeira (kg) pelo respectivo poder calorífico inferior de cada espaçamento, conforme apresentado a seguir:

$$DE = \rho \times PCI \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

DE é a densidade energética (Mcal/m³);

ρ é densidade básica média em (kg/m³);

PCI é o poder calorífico inferior em (kcal/kg).

4.7. Caracterização térmica da madeira

Para as análises termogravimétricas (TGA), foram utilizadas amostras compostas por todas as posições longitudinais de amostragem, com partículas que passaram pela peneira de 60 *mesh*. As análises foram realizadas com o equipamento TGA-60 da marca SHIMADZU em atmosferas de nitrogênio e oxigênio, a uma vazão constante de 50 ml.min⁻¹ e 30 ml.min⁻¹, respectivamente, sendo utilizados aproximadamente 4 mg de serragem. As análises foram submetidas ao ensaio a partir da temperatura ambiente até a temperatura máxima de 600°C, a uma taxa de aquecimento de aquecimento de 10 °C/minuto em atmosfera de nitrogênio e 5°C/minuto em atmosfera de oxigênio.

Para as análises de TGA em atmosfera de nitrogênio, calculou-se, com base na massa inicial de cada amostra, as perdas de massa expressas em porcentagem, subtraindo-se do valor da massa final obtida nos seguintes intervalos de temperatura: 30- 100 °C, 100-200 °C, 200-300 °C, 300-400 °C, 400-500 °C e 500-600 °C. Os valores da massa residual foram obtidos a partir do somatório dos valores das perdas de massa observados em cada intervalo, decrescido de 100%.

Com base nas curvas de TG e DTG em atmosfera oxidante, foram obtidos os seguintes parâmetros de combustão: a temperatura de ignição (Ti), a temperatura final da combustão (Tf), o índice característico da combustão (S), o índice de ignição (Di), o tempo correspondente à máxima taxa de combustão (tp), o tempo de ignição (tig), a taxa máxima de combustão e a taxa média de combustão.

A temperatura de ignição da madeira foi definida como a temperatura na qual a taxa de combustão aumentou a $1\% \text{ min}^{-1}$, iniciando-se o maior processo de combustão. A temperatura final da combustão foi definida como a temperatura na qual a taxa de combustão diminuiu a $1\% \text{ min}^{-1}$ e refere-se ao final do processo (MOON et al., 2013; SAHU et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2017). Para determinar o índice de combustão (S), foi utilizada a equação proposta por Moon et al. (2013):

$$S = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{máx}} \frac{dw}{dt}_{\text{média}}}{T_i^2 T_f} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$(dw/dt)_{\text{máx}}$ é a máxima taxa de perda de massa em $\% \text{ min}^{-1}$

$(dw/dt)_{\text{média}}$ é a média taxa de perda de massa em $\% \text{ min}^{-1}$

T_i é a temperatura de ignição em $^{\circ}\text{C}$

T_f é a temperatura final da combustão em $^{\circ}\text{C}$

Para a determinação do índice de ignição (Di), foi utilizada a equação proposta por Qian et al. (2012):

$$Di = \frac{\left(\frac{dw}{dt}\right)_{\text{máx}}}{t_p t_i} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

$(dw/dt)_{\text{máx}}$ é a taxa máxima de combustão em $\% \text{ min}^{-1}$

t_p é o tempo correspondente à máxima taxa de combustão em minutos

t_{ig} é o tempo de ignição (min)

4.8. Análises estatísticas

O experimento foi conduzido sob o delineamento de blocos ao acaso. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk para testar a normalidade, de Levene e Bartlett para testar a homogeneidade das variâncias e de Durin-Watson para a autocorrelação de resíduos. Em seguida, os resultados foram interpretados com auxílio de análise de variância (ANOVA) e, para as variáveis que apresentaram efeito significativo do espaçamento, foi ajustado um modelo de regressão linear simples.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Características de crescimento da espécie *Tachigali vulgaris*

A análise de variância para as características de crescimento das árvores da espécie *Tachigali vulgaris* mostrou efeito significativo do espaçamento para o volume com e sem casca, estimativas de massa seca de madeira, massa de carbono e massa combustível por árvore, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para o volume com e sem casca, massa seca de madeira, carbono combustível

FV	GL	Quadrado médio				
		Vcc	Vsc	MSM	MC	Mcombustível
Espaçamento	5	0,0029**	0,0021**	742,6059**	191,6520**	241,3412**
Bloco	2	0,006**	0,005**	1354,270**	318,9896**	411,17789**
Erro	10	0,0007	0,0005	196,5345	47,7416	61,6601
Média Geral	-	0,18371	0,16145	80,94	40,33	45,46
CVe (%)	-	13,97	14,36	17,32	17,13	17,27

GL= graus de liberdade; Vcc = volume com casca; Vsc = volume sem casca; MSM = massa seca de madeira; MC = massa de carbono; Mcombustível = massa combustível; ** = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; CVe = coeficiente de variação experimental

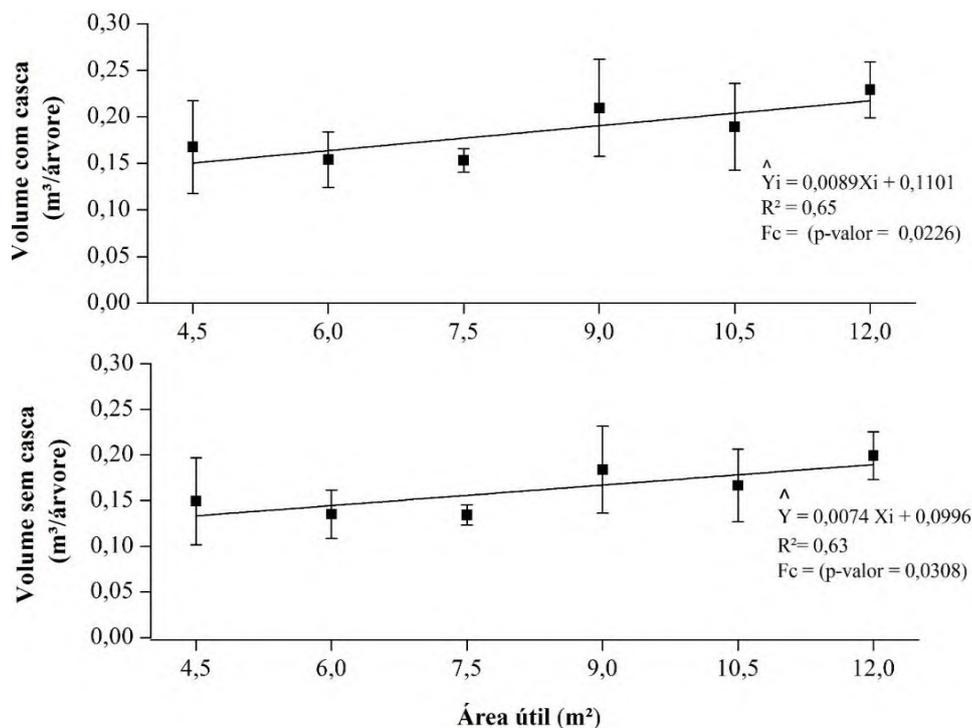
Verifica-se que o volume com e sem casca, apresentou relação funcional positiva com área útil ocupada por planta (figura 6), indicando que os maiores espaçamentos implicam em uma maior área útil por árvore, e conseqüentemente, um maior volume individual. Berger et al. (2002) e Binkley et al. (2017) observaram comportamento semelhante para o volume individual de clones de *Eucalyptus*.

Os espaçamentos iguais a 9 m² e 12 m², alcançaram as maiores produções em volume, demonstrando ter maior potencialidade na produção de madeira quando relacionados aos demais espaçamentos. Já os menores espaçamentos iguais a 6 m² e 7,5 m² apresentaram menores produções volumétricas.

Os maiores potenciais de crescimento volumétrico nos maiores espaçamentos, são justificados pela maior eficiência das árvores na captura e uso de recursos primários como água, CO₂, luz e nutrientes devido a menor competição (COSTA et al., 2015).

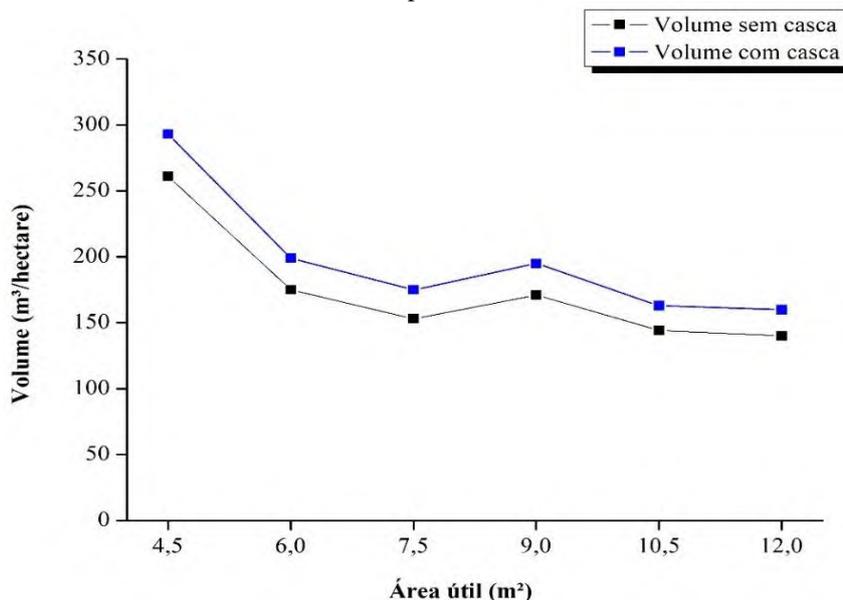
Em espaçamentos amplos, o espaço para o crescimento de cada árvore é ampliado, proporcionando maior conicidade e um bom desenvolvimento das raízes e da copa. Esse conjunto de características contribui diretamente na qualidade e na quantidade da produção em termos individuais (LIMA, et al., 2013).

Por meio da figura 6 é possível observar que houve uma certa variabilidade dos dados em relação à média no povoamento. Esse fato potencializa o uso da espécie em programas de melhoramento genético, já que o tachi-branco não é clonal.

Figura 6. Relação funcional entre volume e o espaçamento

Prioritariamente, as plantações florestais destinadas à produção de energia tem como finalidade a produção de maior volume de biomassa por área em um curto espaço de tempo (ELOY et al., 2015). Portanto, deve-se avaliar não somente o volume individual das árvores, mas sim o total obtido por hectare. O volume de madeira por área aumentou com o adensamento do plantio (figura 7), isto ocorre devido ao maior número de árvores por área nos menores espaçamentos. Comportamentos semelhantes foram observados por Berger et al. (2002) e Moulin et al. (2017) ao estudarem diferentes espécies e idades do gênero *Eucalyptus*.

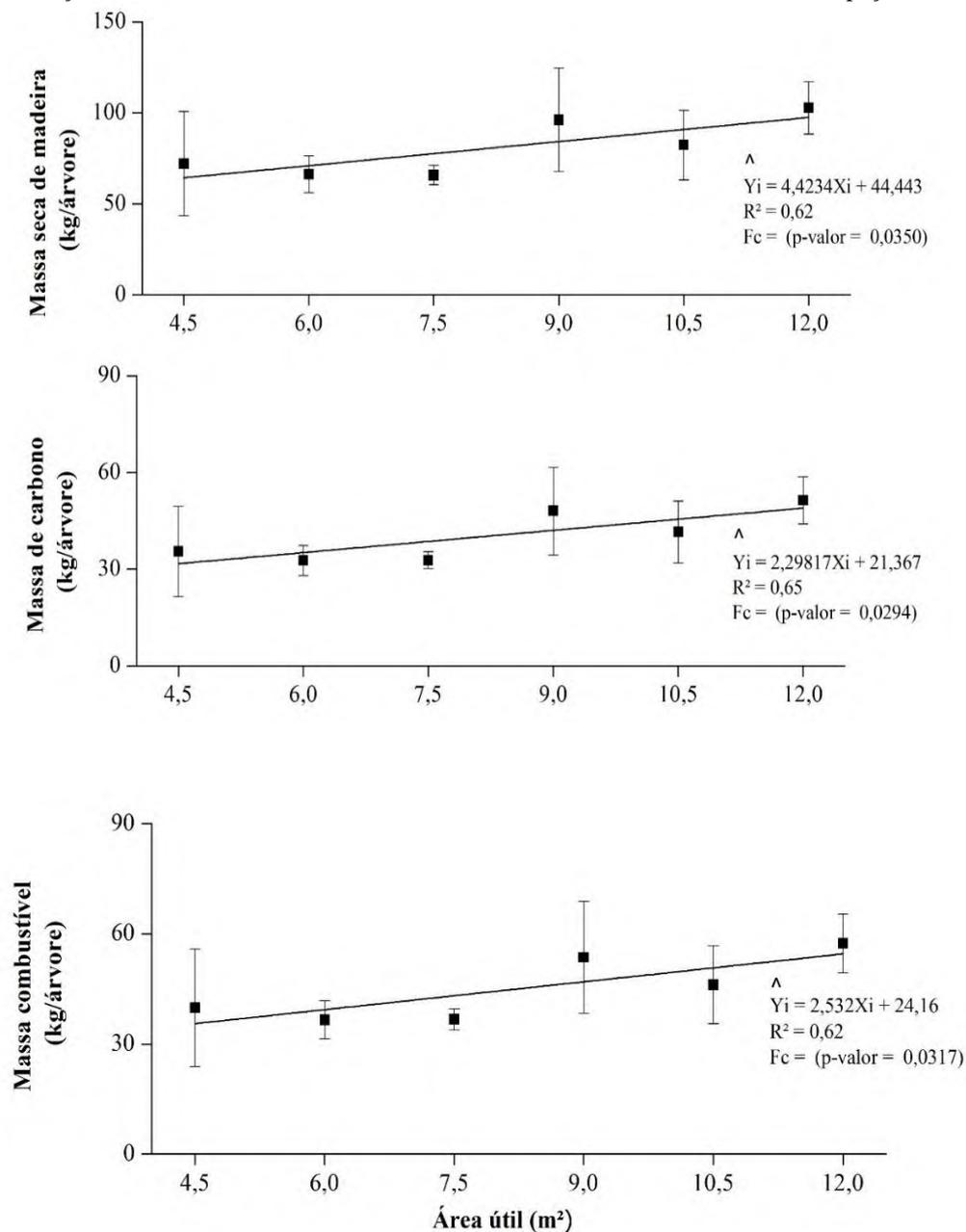
Para a produção volumétrica por hectare, a menor área útil (4,5 m²) foi a que mais se destacou, seguida pelas áreas de 6 m² e 9 m². Deste modo, é possível observar que o espaçamento de 3 x 3 (9 m²) se destacou tanto na produção volumétrica individual (figura 6), quanto na produção de volumétrica por hectare (figura 7).

Figura 7. Estimativa de volume com e sem casca por hectare

A massa seca de madeira, aumentou com o espaçamento de plantio (figura 8). Isto ocorre, porque em espaçamentos amplos há uma menor competição das árvores por nutrientes ocasionando um aumento no incremento de biomassa das plantas. Da mesma forma, árvores plantadas em espaçamentos reduzidos terão menores disponibilidade de recursos de crescimento e aumento da produção de biomassa (SOUZA et al., 2008; NETO et al., 2003).

Os espaçamentos iguais 9 m² e 12 m² produziram árvores com maiores estimativas de biomassa seca de madeira. Já os espaçamentos de 6 m² e 7,5 m² apresentaram resultados opostos. Assim, pode-se concluir que nos maiores espaçamentos houve uma maior taxa de conversão CO₂ em matéria-prima sólida para a conversão energética, contribuindo para a redução desse gás na atmosfera e do efeito estufa (TRUGILHO et al., 2015).

Figura 8. Relação funcional entre massa seca de madeira, carbono e combustível com o espaçamento



Assim como a estimativa de massa seca da madeira, a massa de carbono estocada na madeira nos espaçamentos de 9 m² e 12 m² também foi superior aos demais. Por outro lado, as menores massas de carbono foram observadas nos espaçamentos de 6 m² e 7,5 m².

As árvores plantadas nos maiores espaçamentos possibilitam um maior sequestro de carbono da atmosfera com maior alocação por unidade de massa. Para produção energética, as maiores massas de carbono na madeira são mais indicadas. Na queima direta o carbono é totalmente consumido, logo espera-se que madeiras que têm maiores

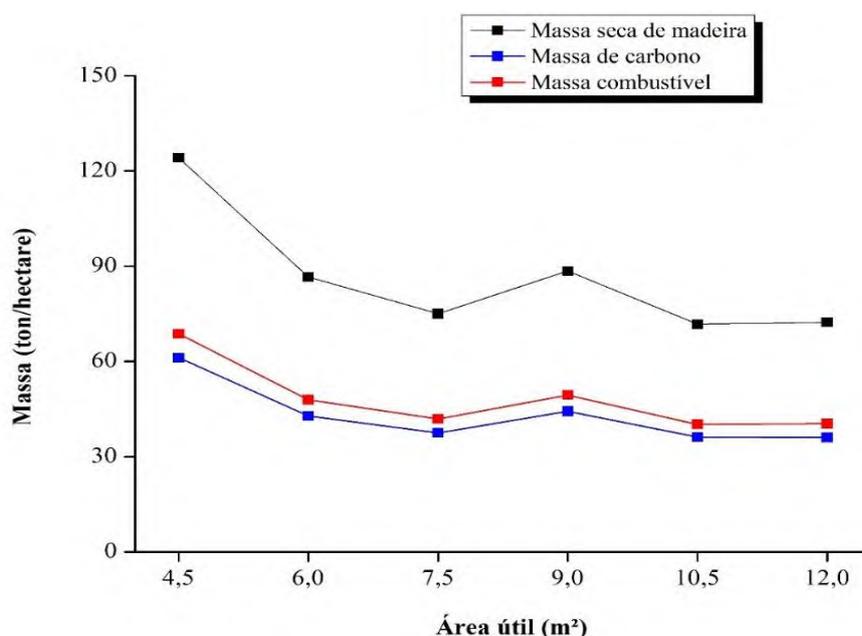
teores de carbono possuem também maior capacidade térmica em função da maior energia liberada (SANTOS et al., 2011).

Já a massa combustível representa quantidade em massa de carbono, hidrogênio e enxofre presentes na biomassa. Esses elementos estão intimamente relacionados com o calor de combustão da madeira, principalmente o carbono e hidrogênio, pois esses são os principais elementos químicos combustíveis (TELMO et al., 2010; PEREIRA et al., 2013; FERNANDES et al., 2013). Deste modo, pode-se dizer que a massa combustível representa a massa que será efetivamente convertida em energia.

Os espaçamentos que obtiveram a maior massa combustível foram o de 9 m² e 12 m², já os espaçamentos de 6 m² e 7,5 m², foram observadas as menores produções de massa combustível por árvore. Portanto em espaçamentos amplos haverá uma maior massa de madeira que será efetivamente convertida em energia.

Entende-se que espaçamentos mais largos ocasionem menor produção de biomassa por área, mas maior produção de biomassa por árvore (JUNIOR et al., 2016). Essa tendência foi observada para a espécie tachi-branco aos 7 anos de idade (figura 9). De tal modo, a massa de carbono e a massa combustível exibiram o mesmo comportamento, pois ambas estão estritamente relacionadas com a biomassa seca de madeira.

Figura 9. Estimativa de massa seca de madeira, massa de carbono e massa combustível por hectare



Quando o crescimento da espécie é considerado por área, os menores espaçamentos de 4,5 m², 6 m² e 9 m² são mais indicados, pois apresentam maiores massas de madeira, carbono e combustível. Assim como para produção volumétrica, é possível observar que o espaçamento 3 x 3 (9 m²) se destacou na produtividade das árvores individuais (figura

8) e por hectare (figura 9). Portanto, é o espaçamento mais indicado para a espécie *Tachigali vulgaris*, aos 7 anos de idade, destinada a produção bioenergética.

5.2. Características físicas e anatômicas

Não foram encontradas diferenças estatísticas entre os espaçamentos para os parâmetros físicos e anatômicos, conforme observado na tabela 4.

Tabela 4. Resumo da análise de variância para as características físicas e anatômicas da madeira do tachi-branco

FV	GL	Quadrado médio						
		Db	C/A	C	D	DL	EP	FP
Espaçamento	5	802,15 ns	0,040 ns	2978,4 ns	2,554 ns	3,572 ns	0,138 ns	35,20 ns
Bloco	2	389,39 ns	0,0827 ns	5036,6 ns	0,566 ns	1,900 ns	0,151 ns	38,78 ns
Erro	10	981,43	0,121	1504,0	3,1174	2,267	0,1210	14,43
Média Geral		499	1,1	931,9	16,0	9,7	3,1	39,5
CVe (%)		6,3	31,3	5,2	10,1	16,6	11,4	12,2

GL= graus de liberdade; Db = densidade básica da madeira; C/A = relação cerne/alburno; C = comprimento da fibra; D = diâmetro da fibra; DL = diâmetro do lúmen da fibra; E = espessura da parede da fibra; FP = fração de parede da fibra; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; CVe = coeficiente de variação experimental.

5.2.1. Densidade básica

Em média, a densidade básica encontrada para a madeira do tachi-branco foi de 499 kg/m³ (Tabela 4). Esse resultado foi semelhante ao reportado na literatura para a mesma espécie por Moraes et al. (2012) e Oliveira et al. (2008), de 520 kg/m³ e 530 kg/m³ aos 13 e 18 anos, respectivamente. Vale et al. (2000) encontraram 700 kg/m³ de densidade básica para árvores da espécie proveniente de florestas nativas, possivelmente por se tratar de indivíduos de maior idade.

Apesar de não ter sido observada diferença estatística da densidade básica da madeira entre os diferentes tratamentos, as pequenas variações dessa propriedade podem ser relevantes do ponto de vista tecnológico. Nos espaçamentos de 9 m² e 12 m², a média da densidade básica foi 518 kg/m³, ou seja, aproximadamente 9 % superior ao menor espaçamento de 4,5 m², que apresentou densidade básica de 476 kg/m³. Resultados semelhantes foram reportados para espécies de eucalipto por Rocha et al. (2016) ao observarem um aumento de aproximadamente 8% na média da umidade quando o espaçamento aumentou de 1,5 m² para 4,5 m² e 9 m².

Esse comportamento pode estar relacionado à maior disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento secundário das árvores. Plantios com menores

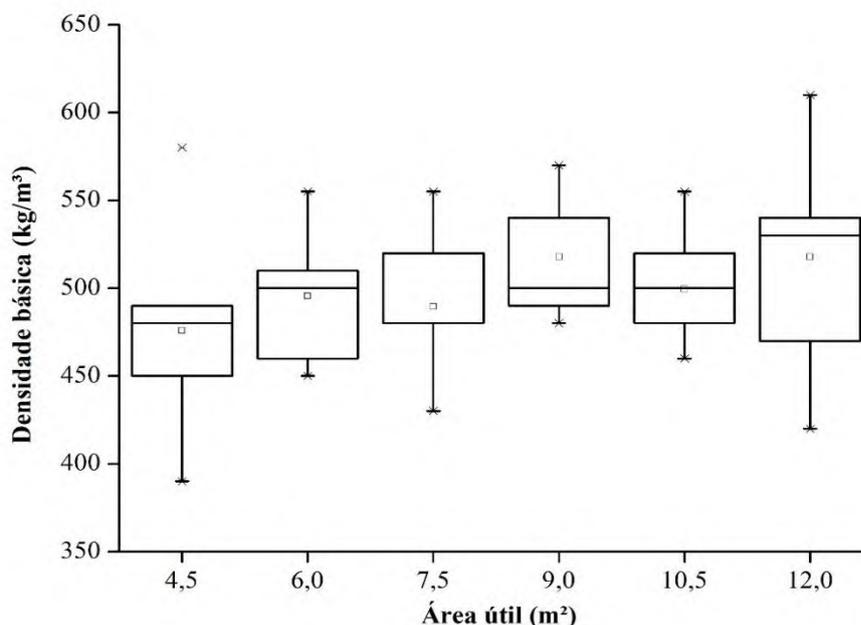
espaçamentos têm uma densidade populacional maior por unidade de área, o que irá provocar maior competição entre plantas por água, luz e nutrientes (TORRES et al., 2016).

Deste modo, os maiores espaçamentos (9 m² e 12 m²) apresentaram árvores com maior densidade básica da madeira, e conseqüentemente, maior quantidade de energia estocada por metro cúbico. Em contrapartida, os menores espaçamentos (4,5 m² e 7,5 m²) vão proporcionar madeira que queima mais rápido e com menor produção de energia por unidade de volume, em função de menor densidade básica (BARROS et al., 2012). Para a produção carvão, o uso de madeira mais densa resulta em carvão mais denso que permite maior produção por operação gravimétrica no forno.

Adicionalmente, é importante destacar a distribuição dos valores densidade básica para cada espaçamento de plantio (figura 10). Essas variações foram maiores no espaçamento de 12 m², em que foram observados valores mínimos de 430 kg/m³ e máximos de 610 kg/m³. Indicando que maiores densidades poderão ser alcançadas a partir de programas de melhoramento genético com a espécie.

Ressalta-se, que outros autores como Leles et al. (2014) e Sturion et al. (1988), para as espécies *Melia azedarach* L e *Eucalyptus vimanalis*, respectivamente, não observaram influência estatística do espaçamento na densidade básica da madeira. Deste modo, pode-se inferir que a densidade da madeira é uma propriedade que é mais influenciada pela herança genética que pelo ambiente, como foi dito por Trugilho et al. (2010).

Figura 10. Densidade básica em função do espaçamento



5.2.2. Mensuração das fibras e relação cerne/alburno

O comprimento e diâmetro médios das fibras e diâmetros dos lumes foram 932 μm , 16 μm e 9,7 μm . Entretanto, as relações entre as dimensões das fibras são mais importantes do que os valores de suas dimensões isoladas para classificação da sua qualidade energética. A fração de parede média encontrada para a espécie foi de 40 %, indicando que do espaço total ocupado pela fibra 40 % são biomassa (celulose, lignina e hemiceluloses) e 60% são espaços vazios (Tabela 5). Paredes mais espessas indicam um aumento na produção de biomassa dos principais constituintes da madeira (celulose, lignina e hemiceluloses), portanto haverá uma maior quantidade de massa por unidade de volume e, conseqüentemente, maior capacidade de liberação de energia durante a decomposição térmica (PAULA, 2003).

Tabela 5. Estatística descritiva das características morfológicas das fibras de madeira tachi-branco em função do espaçamento

Área útil (m^2)	C (μm)	D (μm)	DL (μm)	E (μm)	Fp (%)
4,5	925 (± 22)	15,4 (± 2)	9,4 (± 2)	3,03 ($\pm 0,3$)	39,5 (± 4)
6,0	930 (± 55)	17,4 (± 3)	11,8 (± 3)	2,83 ($\pm 0,1$)	33,1 (± 5)
7,5	966 (± 29)	15,3 ($\pm 0,5$)	8,6 ($\pm 0,1$)	3,31 ($\pm 0,2$)	43,3 (± 1)
9,0	970 (± 25)	16,2 ($\pm 0,5$)	9,8 (± 1)	3,24 ($\pm 0,6$)	39,7 (± 6)
10,5	887 (± 67)	15,1 ($\pm 0,7$)	9,0 (± 1)	3,04 ($\pm 0,3$)	40,4 (± 5)
12,0	914 (± 55)	16,7 ($\pm 1,4$)	9,8 (± 1)	3,42 ($\pm 0,4$)	41,0 (± 2)
Média	932	16,0	9,7	3,14	40,0
Máximo	997	20,6	14,7	3,83	45,0
Mínimo	845	13,3	7,5	2,58	28,7
Desvio padrão	48,5	1,63	1,61	0,35	4,84

C = comprimento da fibra; D = diâmetro da fibra; DL = diâmetro do lúmen; E = espessura da parede da fibra; FP = fração de parede.

Assim como as características morfológicas das fibras, a relação cerne/alburno não foi influenciada estatisticamente pelo espaçamento de plantio (tabela 4). A menor relação C/A indica que o lenho é composto em maior quantidade por alburno.

De forma geral, trata-se de uma madeira de espécie jovem com idade de aproximadamente 7 anos, e como o desenvolvimento do cerne acompanha o avanço da idade do lenho, sua proporção é maior onde o lenho é mais velho, ou seja, árvores mais velhas (PEREIRA et al., 2013; COSTA et al., 2016).

O cerne e o alburno apresentam características distintas, e que podem influenciar a qualidade da madeira para a produção bioenergética. O cerne apresenta densidade maior quando comparado ao alburno, devido a variações morfológicas, como maior espessura da parede celular e, também, devido a diferenças químicas (TRUGILHO e SILVA, 2001).

Entretanto, Pereira et al. (2013) observaram que a relação C/A tem correlação negativa com densidade básica, sendo altos valores dessa propriedade desejáveis para a produção direta de calor. Assim, menor relação C/A são mais indicadas para a produção energética em plantios jovens, pois o cerne, formado de dentro para fora, inicialmente corresponde à madeira juvenil de menor densidade (COSTA et al., 2017).

Durante a combustão, a relação C/A pode afetar a etapa inicial do processo, caracterizada pela secagem da madeira. Apesar do cerne apresentar menor umidade logo após derrubada da árvore devido à redução da atividade fisiológica, por ser bastante impermeável pode dificultar a secagem da madeira (SILVA; TRUGILHO, 2003; PEREIRA et al., 2013).

Segundo Gomide et al. (2005), o diâmetro do cerne aumenta com o diâmetro da árvore, independentemente do espaçamento utilizado. Esse comportamento foi observado para a madeira do tachi-branco (figura 11), cujo o diâmetro do cerne apresentou elevada relação funcional positiva com diâmetro total da árvore, com o coeficiente de determinação (R^2) de 0,91. Porém, não foi encontrada relação entre o diâmetro cerne e a relação cerne/alburno (figura 12). Indicando apesar do diâmetro do cerne aumentar, a proporção entre C/A na árvore se mantém equilibrada.

Figura 11. Relação funcional entre o diâmetro do cerne e o diâmetro total da árvore

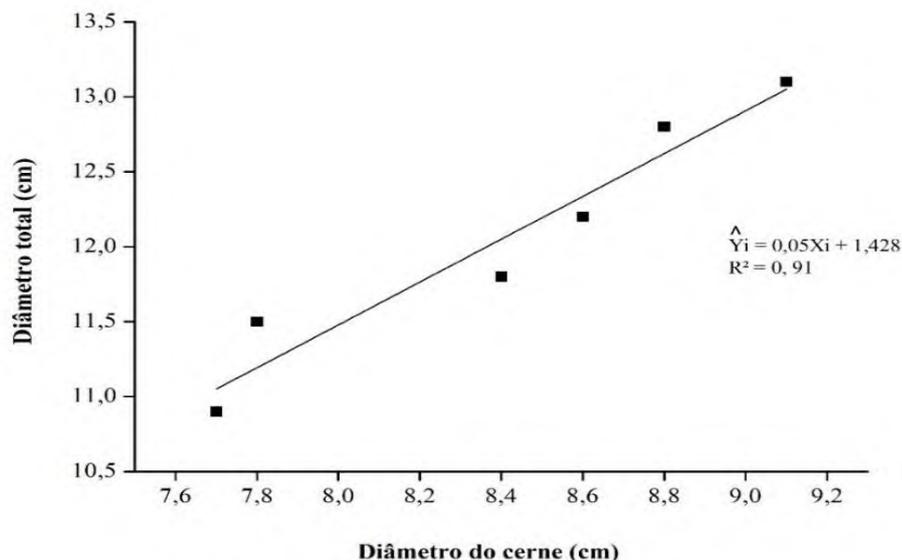
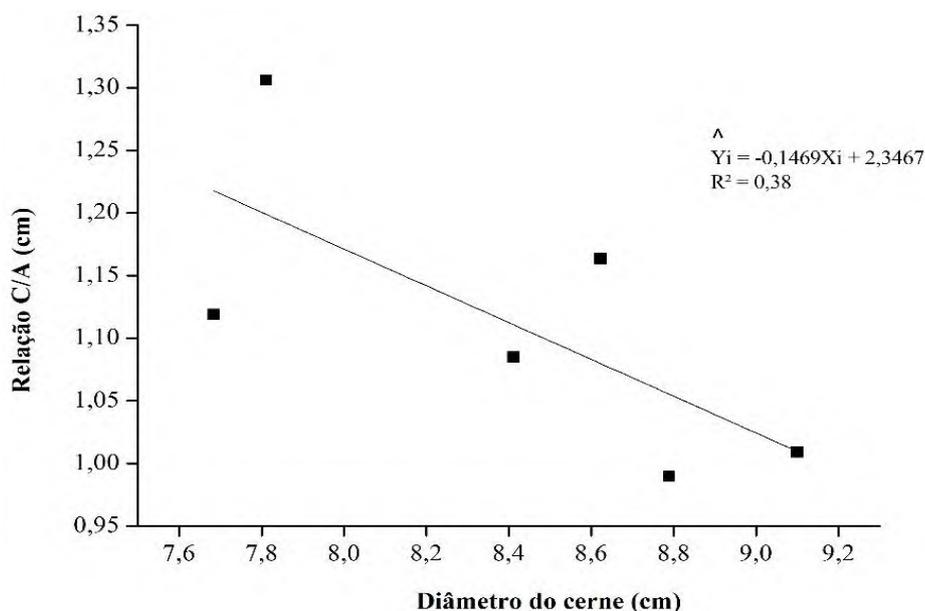


Figura 12. Relação funcional entre o diâmetro do cerne e a relação cerne/alburno

5.3. Composição química da madeira

Não foram observados efeitos estatísticos do espaçamento de plantio na composição química elementar e imediata da madeira da espécie tachi-branco (tabelas 6 e 7). Conseqüentemente a relação atômica estabelecida entre os componentes (H/C, N/C e O/C), apresentou fórmula empírica semelhante.

Tabela 6. Resumo da análise de variância para a composição química elementar da madeira do tachi-branco

FV	GL	Quadrado médio				
		N	H	O	C	S
Espaçamento	5	0,003 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,643 ^{ns}	0,511 ^{ns}	0,023 ^{ns}
Bloco	2	0,001 ^{ns}	0,005 ^{ns}	0,156 ^{ns}	0,350 ^{ns}	0,007 ^{ns}
Erro	10	0,003	0,001	0,256	0,148	0,010
Média Geral		0,75	6,3	42,6	49,8	0,02
CVe (%)		7,29	0,61	1,19	0,77	174,35

GL= graus de liberdade; N = nitrogênio; H = hidrogênio; O = oxigênio; C = carbono; S = enxofre; ns = não significativo 5% de probabilidade, pelo teste F; CVe = coeficiente de variação experimental.

Tabela 7. Resumo da análise de variância para a composição química imediata da madeira do tachi-branco

FV	GL	Quadrado médio		
		TMV	TCZ	TCF
Espaçamento	5	0,1598 ^{ns}	0,0385 ^{ns}	0,1556 ^{ns}
Bloco	2	0,0372 ^{ns}	0,0476 ^{ns}	0,1689 ^{ns}
Erro	10	0,20482	0,02206	0,1686
Média Geral		78,54	0,49	21,0
CVe (%)		0,58	30,6	1,96

GL= graus de liberdade; TMV= teor de materiais voláteis; TCZ= teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo; ns = não significativo 5% de probabilidade, pelo teste F; CVe = coeficiente de variação experimental.

5.3.1. Composição química elementar

Para os componentes elementares da madeira, valores médios foram de 49,8% para o teor de carbono; 6,3% para o hidrogênio; 42,6% para o oxigênio; 0,75% para o nitrogênio e 0,02% para o teor de enxofre (tabela 8). Em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake aos 7 anos, Reis et al. (2012) observaram teor de carbono e hidrogênio de 46,76% e 6,14%, respectivamente, inferiores ao observados para a madeira do tachi-branco.

Mesmo que as diferenças sejam mínimas, quando o objetivo é a geração de energia da madeira por combustão e pirólise, espécies com maiores porcentagens de carbono e hidrogênio são preferidas (PEREIRA et al., 2013). Durante a combustão, o carbono e o hidrogênio tornam-se oxidados por reações exotérmicas (formação de CO₂ e água) influenciando positivamente o poder calorífico do combustível. Já o oxigênio apresenta correlação negativa com o valor calórico da biomassa (TELMO et al., 2010). Entretanto, parte do oxigênio da biomassa, participa do processo de combustão.

Observou-se, que teor médio de nitrogênio para a madeira do tachi-branco foi de 0,75%, sendo superior ao reportado por Santos et al. (2016) de 0,15% a 0,20% para clones de *Eucalyptus* spp. Essa diferença na porcentagem de nitrogênio pode ser atribuída à associação simbiótica entre as bactérias do gênero *Rhizobium* fixadoras de nitrogênio atmosférico com a espécie tachi-branco.

Apenas traços de enxofre foram observados (em média 0,02%). Baixas concentrações de N (nitrogênio) e S (enxofre) são desejáveis, uma vez que, quando são liberados, formam óxidos prejudiciais ao meio ambiente (NO_x e SO_x). Para que haja emissão desses constituintes, são necessárias concentrações superiores a 1% para o teor de nitrogênio e acima de 0,2% para o teor de enxofre (TELMO et al., 2010; GARCÍA et al., 2012). Deste modo, o teor desses elementos não compromete o uso da espécie para a produção bioenergética.

A similaridade entre os componentes elementares da madeira cultivada em diferentes espaçamentos, fez com que houvesse semelhança na relação atômica estabelecida entre eles, conforme observado na fórmula empírica média C₁₀₀H₁₅₁O₆₄N₁.

A menor relação H/C está associada a menor relação siringil/guaiacil. Espera-se que quanto menor a relação S/G, maior seja o poder calorífico da madeira, já que o grupo guaiacil apresenta na sua estrutura química (C₁₀H₁₂O₃), proporcionalmente, mais carbono que oxigênio comparativamente à unidade siringil (C₁₁H₁₄O₄), o que aumenta o valor calórico, pois o carbono é o principal elemento químico combustível (PROTÁSIO et al.,

2017).

Durante o processo de pirólise, o grupo guaiacil é o mais preservado devido à maior condensação deste tipo de lignina. Conseqüentemente, menores relações S/G e H/C são mais indicadas para a produção de energia por combustão direta ou para a produção de carvão vegetal (SOARES et al., 2014).

Já a menor relação O/C indica que as superfícies deste material têm uma baixa afinidade com a água, pois o oxigênio se liga ao hidrogênio por meio das ligações de hidrogênio. Dessa forma, quanto menor o teor de oxigênio, menor a possibilidade desta ligação ocorrer (CHUN et al., 2004). Menor relações N/C também são mais indicadas, pois implicam em uma quantidade menor de nitrogênio a ser liberada para o ambiente após a combustão da biomassa, evitando a poluição do ar (LEITE et al., 2015).

Tabela 8. Composição química elementar da madeira do tachi-branco

Área útil (m ²)	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	Fórmula empírica
4,5	0,77 ^(± 0,1)	49,3 ^(± 0,1)	6,3 ^(± 0,1)	0,23 ^(± 0,1)	43,0 ^(± 0,5)	C ₁₀₀ H ₁₅₂ O ₆₆ N ₁
6	0,79 ^(± 0,1)	49,5 ^(± 0,5)	6,3 ^(± 0,1)	0,01 ^(± 0,1)	43,1 ^(± 0,5)	C ₁₀₀ H ₁₅₂ O ₆₅ N ₁
7,5	0,74 ^(± 0,1)	49,9 ^(± 0,5)	6,3 ^(± 0,1)	0,02 ^(± 0,1)	42,6 ^(± 0,6)	C ₁₀₀ H ₁₅₂ O ₆₄ N ₁
9	0,78 ^(± 0,2)	50,1 ^(± 0,6)	6,3 ^(± 0,1)	0,02 ^(± 0,1)	42,3 ^(± 0,7)	C ₁₀₀ H ₁₅₁ O ₆₃ N ₁
10,5	0,74 ^(± 0,2)	50,4 ^(± 0,2)	6,3 ^(± 0,2)	0,05 ^(± 0,2)	41,9 ^(± 0,2)	C ₁₀₀ H ₁₅₀ O ₆₂ N ₁
12	0,70 ^(± 0,2)	49,9 ^(± 0,2)	6,3 ^(± 0,2)	0,01 ^(± 0,01)	42,7 ^(± 0,3)	C ₁₀₀ H ₁₅₁ O ₆₄ N ₁
Média	0,75	49,8	6,3	0,02	42,6	C ₁₀₀ H ₁₅₁ O ₆₄ N ₁
CVe (%)	7,29	0,77	0,61	174,35	1,19	-

N= nitrogênio; C= carbono; H= hidrogênio; S= enxofre; O= oxigênio

5.3.2. Composição química imediata

Para a composição química imediata foram encontrados valores médios de 78,54% para o teor de materiais voláteis, 21,0% para o teor carbono fixo e 0,49% para o teor de cinzas (tabela 9). Esses valores foram semelhantes ao reportado por Vale et al. (2000) para a mesma espécie em uma floresta nativa do cerrado. Os autores encontraram 78,61% para o teor de materiais voláteis, 21% para o carbono fixo e 0,39% para o teor de cinzas.

O material volátil é a fração da biomassa que queima no estado gasoso, enquanto que o carbono fixo é a porcentagem que queima no estado sólido. Desta forma, um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência dentro do equipamento de queima. Em contrapartida, os materiais voláteis volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão.

Adicionalmente, é necessário destacar que os materiais voláteis facilitam a inflamabilidade e o início do processo de combustão, ou seja, quanto maior o teor de

materiais voláteis no combustível, mais reativo e facilmente é inflamado ele é (FERNANDES et al., 2013). Logo, é necessário que haja um equilíbrio entre o teor de matérias voláteis e o teor carbono fixo presentes na madeira.

As relações estabelecidas entre esses componentes (MV/CF) na madeira do tachi-branco foram semelhantes para os diferentes espaçamentos (Tabela 9), com média de 3,75. Assim, espera-se que a combustibilidade da madeira dessa espécie em ambos os espaçamentos analisados seja a mesma.

Em altas temperaturas, durante o processo de combustão, as cinzas podem ser derretidas produzindo depósitos de escória no forno. Além disso, esses componentes diminuem o poder calorífico da biomassa. Portanto, o menor valor desse componente é desejável para o bom desempenho da biomassa. Os valores estabelecidos para o tachi-branco foram semelhantes ao encontrado por Juízo et al. (2017) para espécies de eucalipto, cuja a variação foi de 0,35% a 0,58%.

Tabela 9. Composição química imediata da madeira do tachi-branco

Área útil (m ²)	TMV (%)	TCF (%)	TCZ (%)	MV/CF
4,5	78,27 ($\pm 0,5$)	21,28 ($\pm 0,4$)	0,45 ($\pm 0,1$)	3,68
6	78,48 ($\pm 0,4$)	21,10 ($\pm 0,5$)	0,42 ($\pm 0,1$)	3,72
7,5	78,64 ($\pm 0,6$)	20,95 ($\pm 0,6$)	0,42 ($\pm 0,1$)	3,76
9	78,86 ($\pm 0,3$)	20,59 ($\pm 0,2$)	0,55 ($\pm 0,2$)	3,83
10,5	78,30 ($\pm 0,3$)	21,01 ($\pm 0,5$)	0,69 ($\pm 0,2$)	3,73
12	78,69 ($\pm 0,2$)	20,92 ($\pm 0,1$)	0,39 ($\pm 0,3$)	3,76
Média	78,54	20,98	0,49	3,75
CVe (%)	0,58	1,96	30,56	1,2

TMV= teor de materiais voláteis; TCF= teor de carbono fixo; TCZ = teor de cinzas; MV/CF= relação materiais voláteis/carbono fixo

5.4. Propriedades energéticas da madeira

Para as propriedades energéticas da madeira, a análise de variância mostrou que os efeitos do espaçamento foram não significativos a 5% de significância.

Tabela 10. Resumo da análise de variância para características energéticas da madeira do tachi-branco

FV	GL	Quadrado médio			
		PCS	PCI	DE	PE
Espaçamento	5	36038,9 ^{ns}	36602,3 ^{ns}	17352,7 ^{ns}	12803,9 ^{ns}
Bloco	2	4817,6 ^{ns}	4431,7 ^{ns}	3214,6 ^{ns}	24954,7 ^{ns}
Erro	10	20307,4	20489,6	26313,7	4167,1 ^{ns}
Média Geral		4720	4381	2187	354,12
CVe (%)		3,02	3,27	27,0	6,6

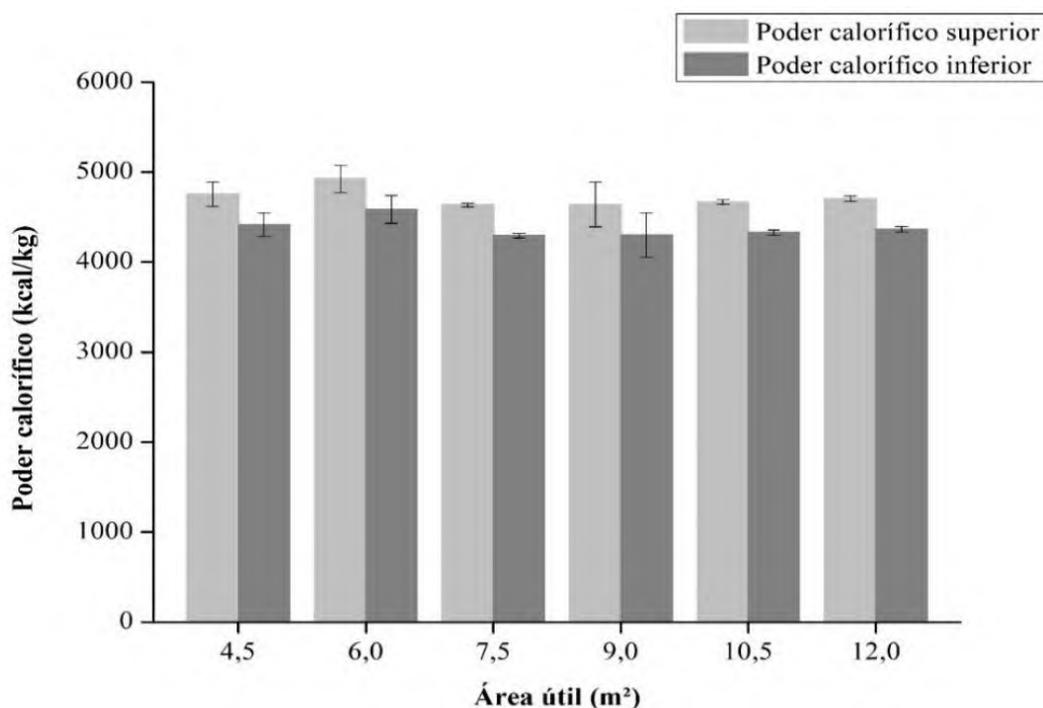
GL= graus de liberdade; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; DE = densidade energética; PE = produtividade energética; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; CVe = coeficiente de variação experimental.

O poder calorífico apresenta relação direta com os teores de carbono e de hidrogênio e inversa com teor de oxigênio, como mencionado anteriormente. Portanto, a semelhança de valores dessa propriedade entre os diferentes espaçamentos (tabela 8) deve-se à semelhança entre as composições químicas elementares apresentadas anteriormente.

O poder calorífico é uma indicação da energia química contida na madeira que, durante o processo de combustão, é convertida em energia térmica. O valor médio encontrado para o poder calorífico superior (PCS) foi de 4720,1 kcal/kg, inferior ao encontrada por Vale et al. (2000) e Quirino et al. (2004) para a mesma espécie, mas obtida de florestas nativas, que foi de 4849,0 kcal/kg. Essa variação pode ser atribuída à possível maior idade dos indivíduos estudados pelos autores. Segundo Silva et al. (2005), o teor de lignina aumenta com a idade. Por sua vez, elevados teores de lignina aumentam o poder calorífico superior da madeira (DEMIRBAS et al., 2002)

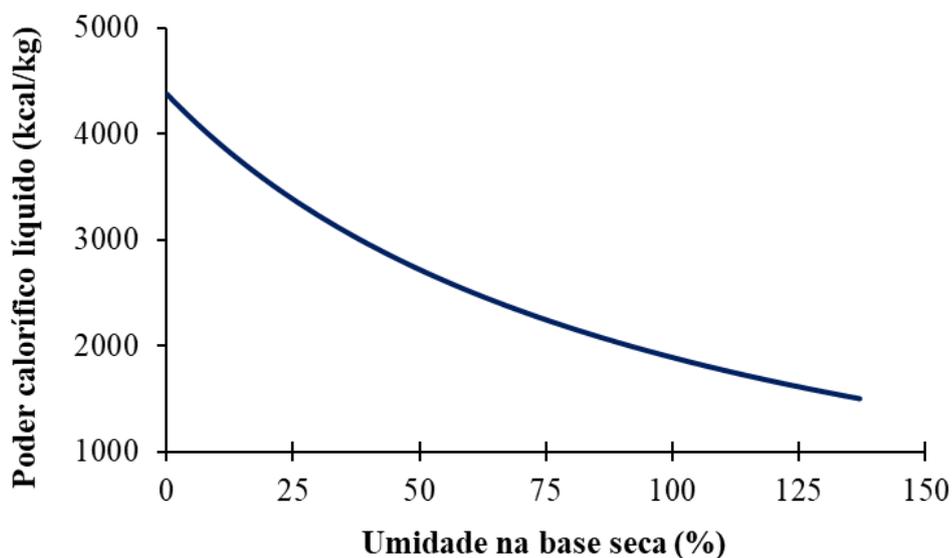
O poder calorífico superior (PCS) considera o calor latente do vapor d'água, ou seja, é a máxima quantidade de energia disponível, enquanto que para o poder calorífico inferior (PCI) não são levadas em consideração as calorias liberadas pela condensação do vapor d'água. A água gerada na combustão completa evapora e, conseqüentemente, leva consigo uma parte da energia do sistema. Logo, no cálculo do PCI é necessário considerar o teor de hidrogênio elementar da biomassa. Assim, o PCS é maior que o PCI, conforme observado na Figura 13.

Para a madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* aos 6 anos de idade, Jesus et al. (2017) encontraram para o poder calorífico superior uma variação de 4538 kcal/kg a 4669 kcal/kg e para o poder calorífico inferior de 4234 kcal/kg a 4365 kcal/kg. Esses resultados foram inferiores ao observado para a madeira do tachi-branco, que foi em média de 4720 kcal/kg para PCS e 4381 kcal/kg para o PCI.

Figura 13. Poder calorífico superior e inferior da madeira

Já o PCL (poder calorífico líquido) é a quantidade de calor liberado útil, descontada a quantidade de calor usada para evaporar a água formada pela combustão do hidrogênio elementar e a umidade do combustível (BRITO, 1993). Portanto, é o mais indicado para fornecer a quantidade real de energia contida na madeira.

Observa-se, que o PCL é inversamente proporcional à umidade da madeira, ou seja, quanto maior a umidade que a madeira se encontra, menor será a produção de calor por unidade de massa (figura 14).

Figura 14. Variação do poder calorífico líquido com a umidade da madeira

Esta relação entre poder calorífico e a umidade é bastante conhecida e pode ser confirmada pelo estudo de Moura et al (2012) que demonstram que quanto maior a umidade presente na madeira, menor será sua capacidade de combustão.

Para um bom aproveitamento do material durante a combustão, a umidade utilizada não deve ser acima de 25%, porque acima desse valor, além da redução do poder calorífico disponível, possivelmente serão formadas crostas e fuligem nas chaminés e no interior da câmara de combustão (FARINHAQUE, 1981).

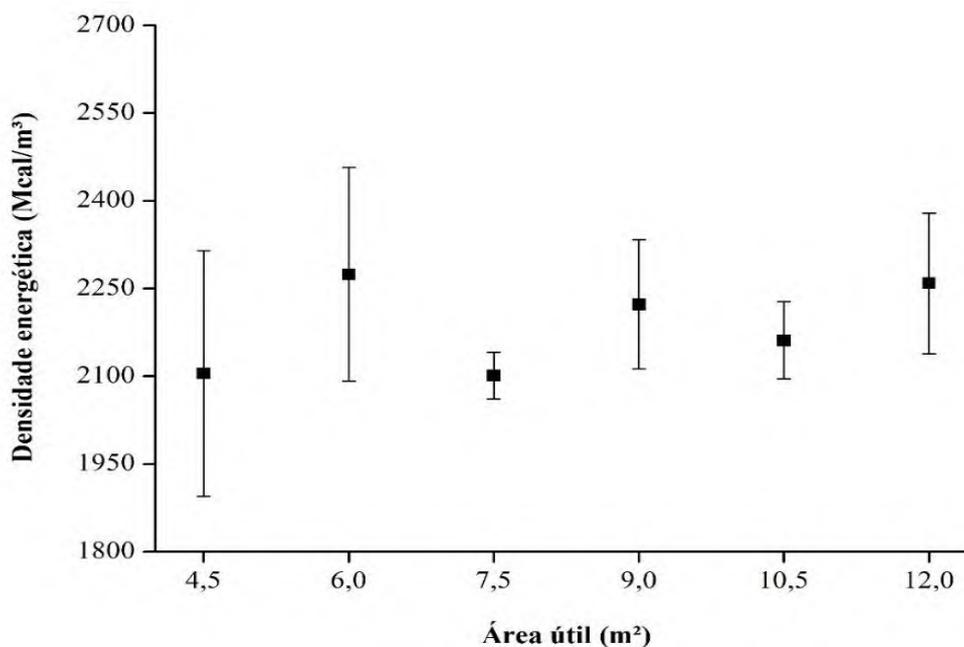
A madeira com 0 % de umidade apresentou em média poder calorífico líquido de 4381 kcal/kg, enquanto que com 25 % de umidade o poder calorífico caiu para 3385 kcal/kg (figura 14). Isto significa que, do ponto de vista de eficiência energética, se a queima for realizada com 25 % de umidade, teremos somente 77 % de toda energia aproveitada.

Nos sistemas modernos de cogeração a partir de biomassa onde a princípio tecnológico é a combustão, é desejado valor calórico líquido mínimo de 1900 kcal/kg (BRAND et al., 2011). Deste modo, qualquer um dos resultados obtidos nesta pesquisa superam o valor mínimo pré-estabelecido, indicando o uso da espécie para esta finalidade.

Estaticamente a densidade energética da madeira do tachi-branco (tabela 10) não foi influenciada pelo espaçamento de plantio. Esse fato está relacionado aos efeitos não significativos sobre o poder calorífico e a densidade básica da madeira, visto que a densidade energética encontra-se correlacionada positivamente com a densidade básica (0,71) e com o poder calorífico inferior (0,41).

Pode-se dizer, que comportamento da densidade energética se mostrou semelhante ao comportamento da densidade básica da madeira. Sendo observado um aumento na densidade energética, com o aumento do espaçamento. Os espaçamentos de maior densidade energética foram o de 6 m², 9 m² e 12 m², com densidades iguais a 2274 Mcal/m³, 2223 Mcal/m³ e 2259 Mcal/m³, respectivamente. Esses espaçamentos foram superiores em cerca de 8 %, 6 % e 7,3 %, em relação ao menor espaçamento de 4,5 m² que foi de 2105 Mcal/m³.

Assim, quando o objetivo é a utilização energética da madeira os maiores espaçamentos (6 m², 9 m² e 12 m²) são mais indicados em relação ao menor espaçamento (4,5 m²). Ou seja, em espaçamentos amplos haverá maior energia por m³ de madeira, possibilitando maior quantidade de energia liberada após a combustão completa. O que refletirá em uma diminuição dos custos com transporte e armazenamento da madeira.

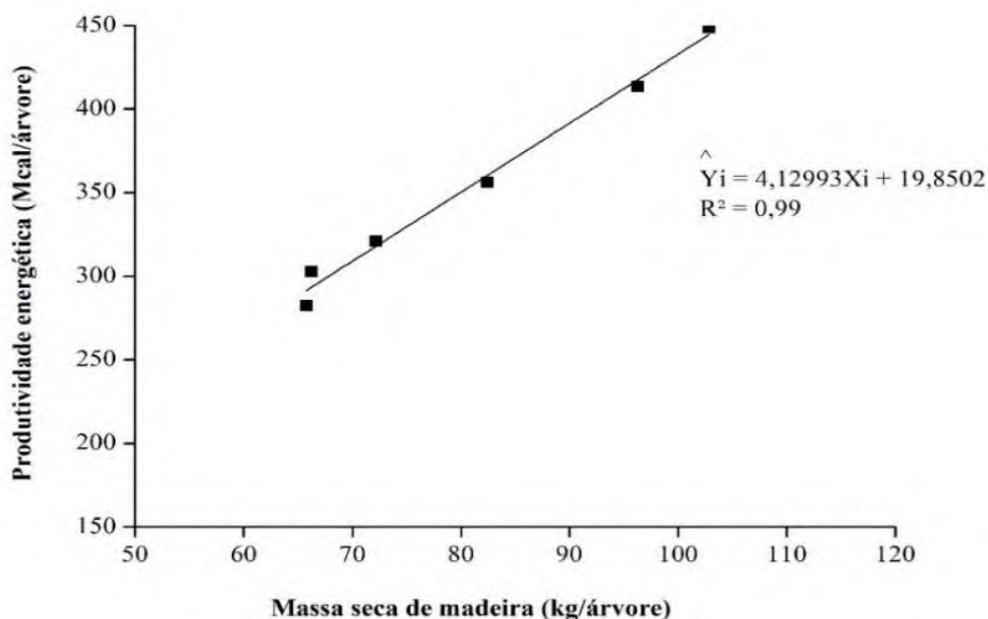
Figura 15. Densidade energética em função do espaçamento

A produtividade energética da madeira foi estaticamente semelhante nos espaçamentos de plantio avaliados. Porém, observou-se uma tendência de aumento da produtividade energética com a estimativa de massa seca de madeira (figura 16).

A equação ajustada a partir de um modelo linear simples, demonstra que há tendência de aumento nos valores de produtividade energética com o aumento massa seca de madeira. Portanto, a estimativa de massa seca é um fator de fundamental importância quando a madeira é destinada para a produção de energia.

Deve-se considerar que o poder calorífico inferior da madeira não apresentou diferenças significativas nos espaçamentos analisados, ou seja, esse parâmetro não influenciou na produtividade energética por árvore.

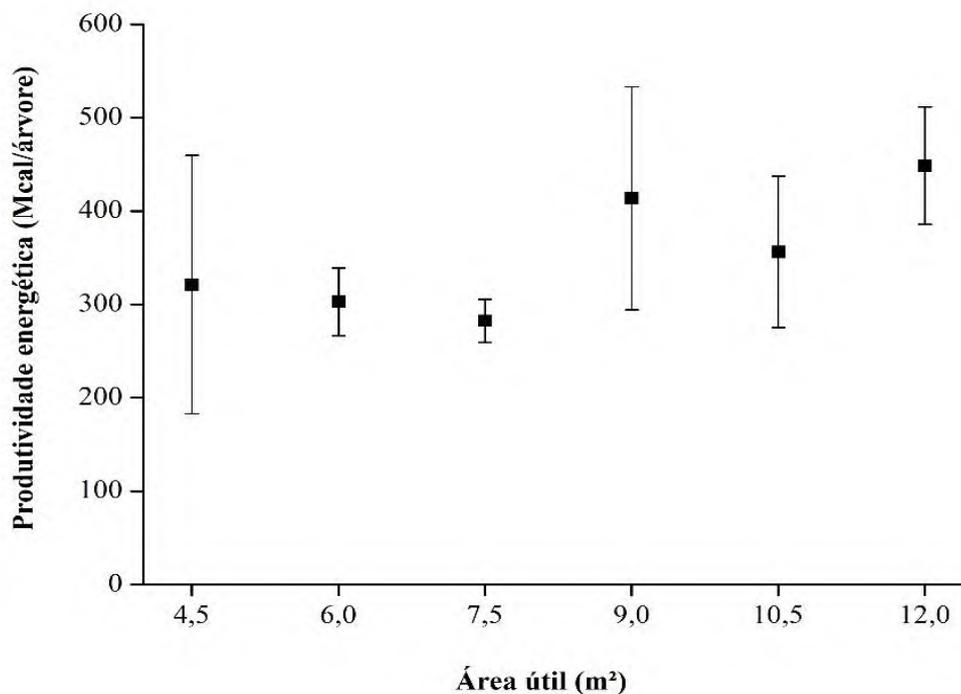
Figura 16. Produtividade energética em função da massa seca de madeira



Assim como para a estimativa de massa seca, a produtividade energética por árvore aumentou com o aumento do espaçamento. Onde os espaçamentos iguais a 9 m² e 12 m², produzem maiores produtividades energéticas por árvore e os espaçamentos de 6 m² e 7,5 m², as menores.

A produção energética a partir da madeira do tachi-branco no espaçamento de 9 m² foi de 413,53 Mcal/árvore ou 1,4 vezes maior que a do espaçamento 6 m² que foi de 302,80 Mcal/árvore. Enquanto que o espaçamento 12 m² foi de 448,68 Mcal/árvore equivalente a 1,6 vezes a do espaçamento 7,5 m² que foi de 282,40 Mcal/árvore.

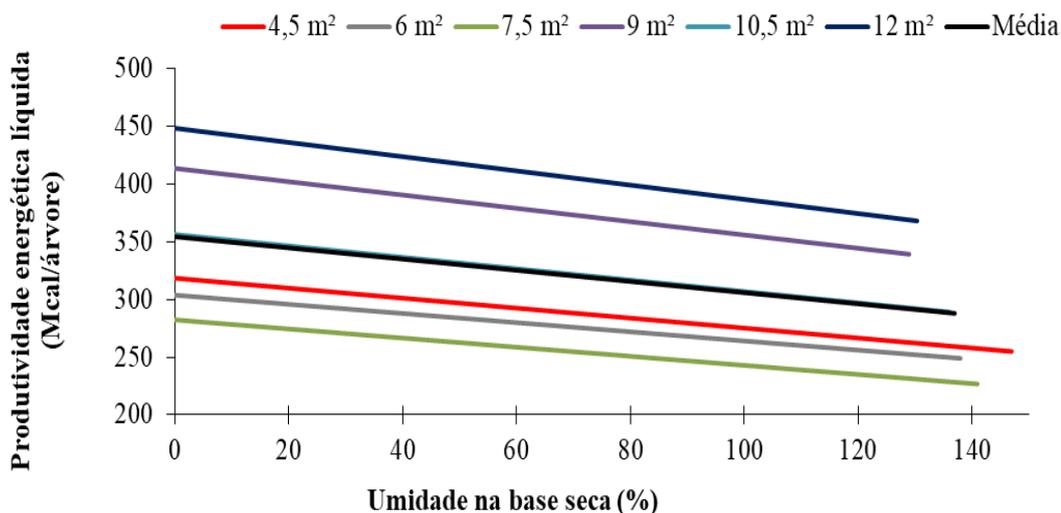
A análise da produtividade energética permite uma melhor visualização do potencial energético da cultura. Em média a produtividade energética de madeira do tachi-branco foi de 354,12 Mcal/árvore, superior ao encontrado por Vale et al. (2000) para a madeira de *Acacia mangium* de 91,3 Mcal/árvore e de *Eucalyptus grandis* de 222 Mcal/árvore, ambas aos 7 anos de idade. Esses resultados demonstram que a espécie tachi-branco possui maior produção energética quando comparada a outras espécies utilizadas para a produção energética.

Figura 17. Produtividade energética em função do espaçamento

Entretanto, é importante mencionar que o teor de umidade é uma condição física da madeira em função do meio em que se encontra. E que influencia o poder calorífico líquido da madeira. Deste modo, é importante que se avalie a produtividade energética, deduzida a energia necessária para retirada da umidade presente na madeira.

Foi observado (figura 18) que ocorre uma redução da produtividade energética líquida em função do aumento da umidade da madeira. Esse fato está relacionado, a diminuição do poder calorífico líquido da biomassa com aumento da umidade (figura 16).

Contudo, observou-se comportamento semelhante ao observado para a produtividade energética total, em que os espaçamentos 9 m² e 12 m² foram superiores aos demais espaçamentos analisados (4,5 m², 6 m², 7,5 m² e 10,5 m²), ficando acima da média geral de todos os espaçamentos. Os resultados encontrados sugerem que nesses espaçamentos existirá maior produção energética útil, por árvore.

Figura 18. Variação da produtividade energética líquida com a umidade da madeira

5.5. Análise térmica da madeira

Para a degradação térmica da madeira, não foi observado efeito significativo do espaçamento de plantio, conforme observado nas Tabelas 11, 12 e 13. Pode-se dizer, que o espaçamento de plantio não influenciou a combustão e a pirólise da madeira do tachi-branco aos 7 anos de idade.

A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível (BRITO e BARRICHELO, 1978). Deste modo, a baixa variabilidade atribuída entre os espaçamentos para os parâmetros de combustão, deve-se à pequena variação na relação MV/CF (tabela 9). Portanto, a combustibilidade da madeira dessa espécie em ambos os espaçamentos analisados é a mesma.

Tabela 11. Resumo da análise de variância para a perda de massa e temperatura máxima em ambiente oxidativo

FV	GL	Quadrado médio			
		1º Estagio		2º Estagio	
		PM	TM	PM	TM
Espaçamento	5	3,156489 ^{ns}	2,73503 ^{ns}	2,23077 ^{ns}	16,28095 ^{ns}
Bloco	2	0,950572 ^{ns}	0,787106 ^{ns}	0,890385 ^{ns}	14,56167 ^{ns}
Erro	10	1,4051656	1,207285556	0,744145	6,19355
Média Geral		73,5	306,7	21,6	441,2
Cve (%)		1,43	0,26	3,73	0,57

GL= graus de liberdade; PM = perda de massa; TM = temperatura máxima; ns = não significativo 5% de probabilidade, pelo teste F; Cve = coeficiente de variação experimental.

Tabela 12. Resumo da análise de variância para os parâmetros da combustão da madeira

FV	GL	Quadrado médio			
		Ti	Tf	(dm/dt) _{máx.}	(dm/dt) _{médio}
Espaçamento	5	2,607569 ^{ns}	9,05792 ^{ns}	0,049507 ^{ns}	0,000794 ^{ns}
Bloco	2	1,83771 ^{ns}	7,46187 ^{ns}	0,092136 ^{ns}	0,002124 ^{ns}
Erro	10	2,801126	8,580899	0,094214	0,002727
Média Geral		233,7	451,6	8,96	1,11
CVe (%)		0,59	0,62	3,27	3,66

GL= graus de liberdade; Ti= temperatura de ignição; Tf= temperatura final da combustão; (dm/dt)_{máx.}= taxa de máxima perda de massa; (dm/dt)_{médio}= taxa média de perda de massa; ns= não significativo 5% de probabilidade, pelo teste F; CVe= coeficiente de variação experimental.

Tabela 13. Resumo da análise de variância para os parâmetros da combustão da madeira (cont.)

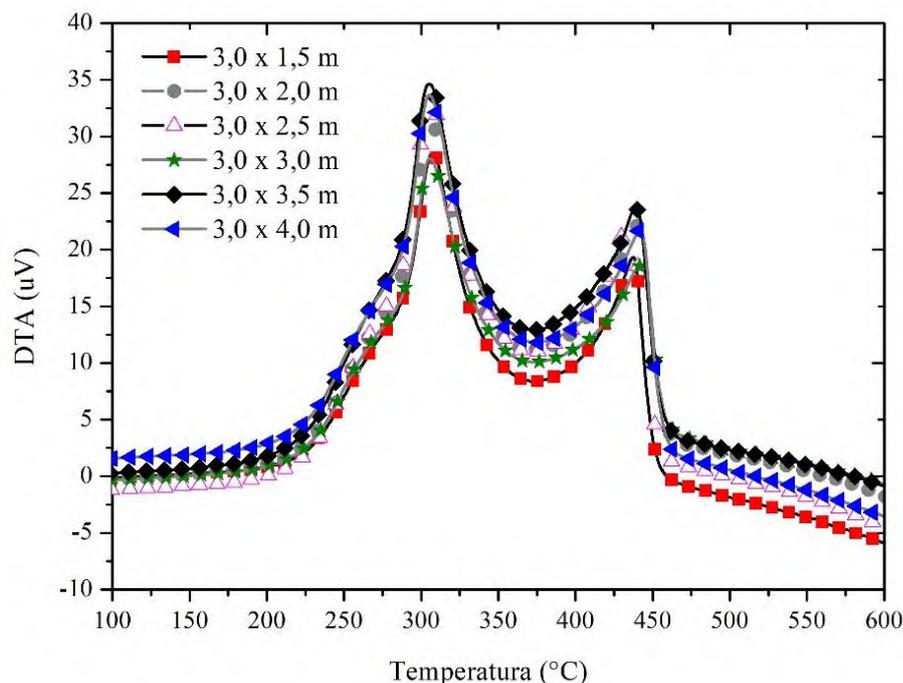
FV	GL	Quadrado médio			
		tp	t _{ig}	S	Di
Espaçamento	5	0,939342 ^{ns}	1,246716 ^{ns}	0,009228 ^{ns}	0,044269 ^{ns}
Bloco	2	0,755206 ^{ns}	0,926539 ^{ns}	0,11134 ^{ns}	0,026169 ^{ns}
Erro	10	0,967386	1,279719	0,0914	0,068009
Média Geral		54	41	4,0	4,0
CVe (%)		1,73	2,53	6,36	5,62

GL= graus de liberdade; t_p = tempo correspondente à máxima taxa de combustão; t_{ig} = tempo de ignição; S = índice de combustão; Di = índice de ignição; ns= não significativo 5% de probabilidade, pelo teste F; CVe= coeficiente de variação experimental.

As curvas termogravimétricas (TG) representam perda de massa em porcentagem em função da temperatura. Enquanto as curvas de análise termogravimétrica diferencial (DTG) correspondem à derivada primeira das curvas TG e apresentam a variação da massa em relação ao tempo, registradas em função da temperatura (PEREIRA et al., 2013).

De forma geral, o comportamento da madeira dos diferentes espaçamentos durante a degradação térmica foi semelhante, com perdas de massa mais acentuadas numa faixa aproximada de temperatura e com picos de energia liberada expressos pela análise térmica diferencial, também bem próximos.

Figura 19. Análise térmica diferencial (DTA) da combustão da madeira do tachi-branco



A combustão da madeira do tachi-branco pode ser agrupada em duas reações principais (figuras 20 e 21). A primeira é a volatilização dos principais constituintes da biomassa e produção de carvão vegetal, posteriormente na segunda fase, ocorre a combustão desse carvão gerado em estágios iniciais (GARCÍA et al., 2012; LI et al., 2013; LÓPEZ-GONZÁLEZ et al., 2013).

O primeiro estágio da combustão está compreendido entre as temperaturas de 250°C a 350°C, com máxima perda da massa (73,5%) na temperatura de 306,7°C (Tabela 14). Nessa etapa ocorre a degradação dos voláteis, incluindo a decomposição total das hemiceluloses, celulose e da decomposição parcial da lignina. De acordo com López-González et al. (2013), esta etapa representa o lançamento de voláteis e sua ignição levando a formação do carbono fixo (figura 21).

A lignina é o principal contribuinte nesta fase, pois é a principal responsável pela formação de carvão vegetal (SANCHEZ-SILVA et al., 2012). Nesta primeira etapa, a perda de massa da madeira foi acentuada, em função da combustão dos voláteis provenientes da combustão de estruturas de alto peso molecular (hemiceluloses e celulose).

A temperatura de máxima taxa de perda de massa foi de aproximadamente de 300°C (figura 21), semelhante ao observado por López-González et al. (2013) para madeira de eucalipto, cujo de degradação ocorreu na temperatura de 290°C. Tenorio e Moya (2013) atribuíram essa taxa máxima de perda de massa à degradação da celulose. A celulose é o

principal constituinte químico da madeira, constituindo de 40% a 45% da matéria seca da maioria das madeiras (PEREIRA et al., 2013). O alto teor de celulose promove maior desvolatilização e aumenta a taxa de decomposição a temperaturas mais baixas (KAI et al., 2011).

Durante o segundo estágio, que acontece entre as faixas de temperatura de 400°C a 475°C, a máxima perda de massa foi de 21,6% e ocorreu sob a temperatura 441,2°C (Tabela 14). Nesta etapa, ocorre decomposição da lignina remanescente e a combustão do carvão vegetal, produzido na primeira etapa da combustão. Segundo Haiping et al. (2007) a biomassa é convertida em carvão vegetal entre as temperaturas de 250°C e 300°C devido à decomposição total da hemiceluloses e parcial da celulose.

Observa-se que a perda de massa nesse segundo estágio de decomposição foi consideravelmente inferior àquela obtida na fase inicial. Esse fato está associado a oxidação do carvão vegetal na segunda etapa, que é a fração não volátil que se oxida no estado sólido (BRAND, 2010). Enquanto que na primeira etapa, ocorre a queima dos voláteis de alto peso molecular.

Figura 20. Curvas de TG da madeira de tachi-branco em atmosfera de oxigênio

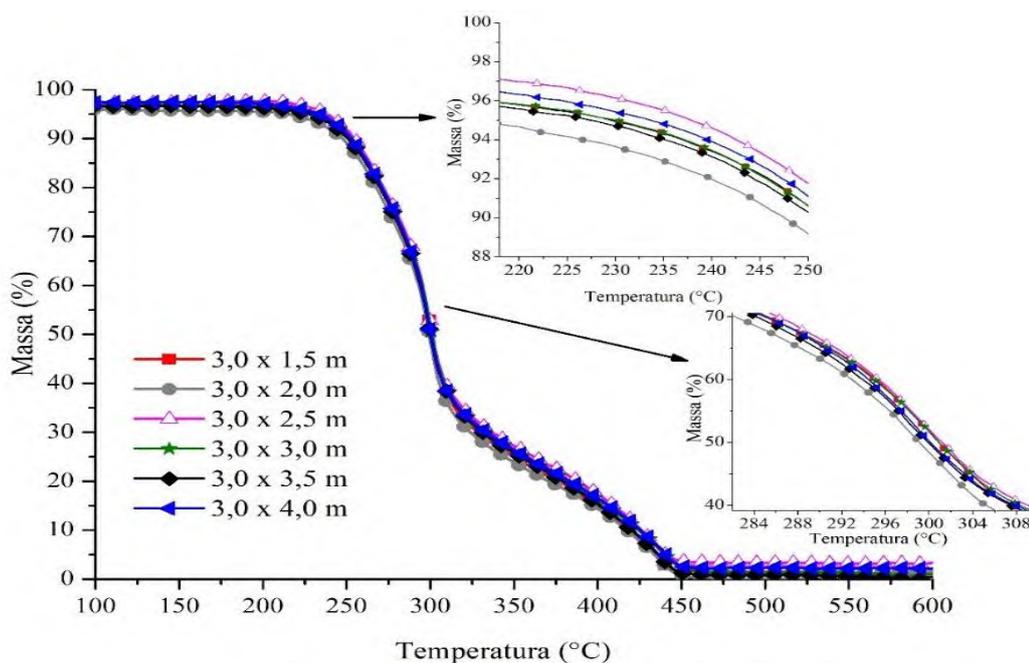
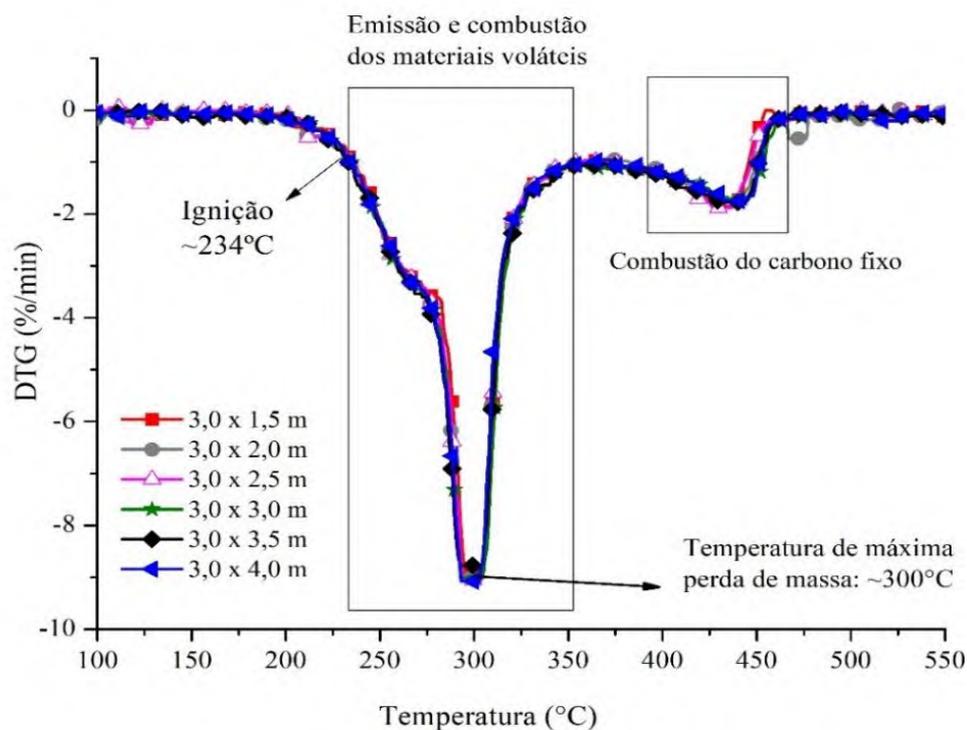


Figura 21. Curvas de DTG da madeira de tachi-branco em atmosfera de oxigênio**Tabela 14.** Perda de massa e temperatura de pico, obtidas por TGA, nos estágios característicos da combustão da madeira do tachi-branco.

Área útil (m ²)	1º Estagio		2º Estagio	
	Perda de massa (%)	Temperatura máxima (°C)	Perda de massa (%)	Temperatura máxima (°C)
4,5	73,4(± 0,8)	308,3(± 0,1)	22,5(± 1,3)	439,5(± 0,9)
6,0	73,0(± 1,2)	306,8(± 0,1)	22,5(± 0,8)	441,9(± 3,8)
7,5	74,0(± 1,9)	305,8(± 0,9)	21,3(± 0,4)	437,5(± 1,5)
9,0	71,9(± 0,4)	306,3(± 0,9)	21,9(± 0,7)	442,9(± 3,0)
10,5	73,9(± 0,8)	305,8(± 0,9)	21,3(± 0,4)	441,8(± 2,4)
12	75,0(± 1,3)	307,3(± 2,1)	20,2(± 1,2)	443,8(± 3,6)
Média	73,5	306,7	21,6	441,2

Os parâmetros de combustão são apresentados na Tabela 15. A temperatura de ignição corresponde ao ponto em que o perfil de queima sofre um aumento repentino (HAYKIRI-AÇMA, 2003). Em média, observa-se que a temperatura de ignição (T_i) da madeira do tachi-branco foi de 233,7°C, próximo ao valor observado por Protásio et al. (2017), que foi de 240,35°C para a casca de coco babaçu. Vale ressaltar, quanto menor for a temperatura de ignição, maior facilidade de queima terá o combustível (LEROY et al., 2006).

A temperatura final da combustão foi de 451,6°C. Esse valor foi próximo ao encontrado por Tenorio e Moya (2013) para a espécie *Vochysia guatemalensis* de 400°C.

Segundo os autores, a temperatura final da combustão encontra-se correlacionada positivamente com o teor de extrativos (solúveis em água quente), ou seja, quanto maior o teor de extrativos na madeira maior, será a temperatura final de combustão. E quanto menor for a temperatura final da combustão, maior eficiência de queima terá a biomassa.

As taxas máxima e média de perda de massa foram de $8,96\% \text{ min}^{-1}$ e $1,11\% \text{ min}^{-1}$, respectivamente. A maior proporção de materiais voláteis em relação ao teor de carbono, pode aumentar a intensidade da combustão, aumentando o consumo de massa (LEWANDOWSKI et al., 1997).

Do mesmo modo, o aumento no teor de materiais voláteis na biomassa implica em uma queima mais rápida do combustível. O tempo correspondente a máxima combustão (t_p) foi de 54 min e o tempo de ignição (t_i) de 40 min.

O índice de combustão (S) e o índice de ignição (Di) encontrados para madeira do tachi-branco foram de $4 \times 10^7 \%^2 / (\text{min}^2/\text{C}^3)$ e $4 \times 10^3 \% \text{ min}^{-3}$. Sahu et al. (2010) observaram índice de ignição de $3,54 \times 10^3 \% \text{ min}^{-3}$ para o carvão de casca de arroz, menor do que o encontrado neste estudo. Assim, a madeira do tachi-branco tem maior facilidade de queima em comparação o carvão de casca de arroz.

Já o índice característico da combustão (S) reflete a reatividade durante todo o processo de combustão, ou seja, madeira com maior valor de S tem melhor desempenho combustão (XIONG et al., 2014).

Tabela 15. Parâmetros da combustão da madeira do tachi- branco

Área útil (m ²)	T _i (°C)	T _f (°C)	(dm/dt) _{max} (% min ⁻¹)	(dm/dt) _{média} (% min ⁻¹)	t _p (min)	t _{ig} (min)	S x 10 ⁷ % ² /min ² °C ³)	Di x 10 ³ (% min ⁻³)
4,5	233,3 (± 1,3)	449,8 (± 3,2)	8,95 (± 0,4)	1,12 (± 1,1)	54,6 (± 0,8)	41,5 (± 0,7)	4,1 (± 0,5)	3,9 (± 0,1)
6,0	232,2 ^(± 3,1)	451,7 (± 3,2)	8,94 (± 0,4)	1,11 (± 0,3)	53,0 (± 1,3)	39,8 (± 1,6)	4,1 (± 0,4)	4,3 (± 0,4)
7,5	233,9 ^(± 1,3)	449,3 (± 2,2)	9,05 (± 0,3)	1,11 ^(± 0,1)	54,3 (± 0,8)	41,1 (± 0,7)	4,1 (± 0,2)	4,1 (± 0,2)
9,0	234,3 ^(± 1,2)	453,7 (± 4,0)	8,81 (± 0,2)	1,13 (± 0,1)	54,3 (± 1,0)	40,6 (± 1,5)	4,0 (± 0,1)	4,0 (± 0,2)
10,5	233,7 ^(± 0,2)	452,2 (± 2,0)	8,85 (± 0,4)	1,10 (± 0,1)	54,3 (± 0,5)	41,4 (± 0,7)	3,9 (± 0,2)	3,9 (± 0,1)
12	234,9 ^(± 1,2)	453,0 (± 2,2)	9,16 (± 0,1)	1,08 (± 0,1)	54,0 (± 1,1)	41,1 (± 1,1)	4,0 (± 0,1)	4,1 (± 0,2)
Média	233,7	451,6	8,96	1,11	54	41	4,0	4,0

T_i = temperatura de ignição; T_f = temperatura final da combustão; (dm/dt) máx = taxa máxima de perda de massa; (dm/dt) média = taxa média de perda de massa; t_p = tempo correspondente à máxima taxa de combustão; t_{ig} = tempo de ignição; S = índice de combustão; Di = índice de ignição

A pirólise da madeira pode ser melhor compreendida ao se estudar o comportamento dos seus três principais componentes (celulose, hemiceluloses e lignina) durante o processo (SOARES et al., 2014). As Figuras 22 e 23 demonstram que as curvas TG e DTG, sob atmosfera de nitrogênio, exibiram três estágios distintos de perda de massa, correspondentes à degradação térmica de cada um desses componentes.

O primeiro estágio de perda de massa, corresponde à perda de água na fase inicial do processo que foi de aproximadamente 8% (tabela 16). Nessa fase, ocorre perda da água de adesão presente na parede celular e que necessita de energia para ser retirada da madeira. Portanto trata-se de uma fase endotérmica, conforme observado no pico inverso da curva do DTG (Figura 23).

Na faixa de temperatura compreendida entre 100°C e 200°C (tabela 16), a perda de massa foi mínima (1% em média). Essa faixa de temperatura é a chamada zona de estabilidade térmica da madeira, que é limitada pela temperatura inicial de degradação térmica dos principais componentes da madeira.

Nessa faixa de temperatura, os componentes da madeira são termicamente estáveis desde que não sejam expostos ao calor por períodos prolongados (RAAD et al., 2006). Em estudos termogravimétricos da madeira, Santos et al. (2012) não observaram perda de massa nessa faixa de temperatura, ao estudarem quatro clones de *Eucalyptus* spp. aos 7 anos.

Posteriormente, nota-se dois picos de intensa decomposição térmica. O primeiro, em a taxa de decomposição a temperaturas mais baixas, pode estar associado a pirólise de hemiceluloses e o pico a temperaturas mais elevadas pode estar associado à celulose, que se decompõem em temperaturas mais elevadas (CARNEIRO et al., 2013; MÜLLER-HAGEDORN et al., 2003).

A faixa de decomposição térmica das hemiceluloses foi de 280°C a 320°C (Figura 23), sendo em média uma a perda de massa de 17% (tabela 16). Santos et al. (2012) observaram perdas de massa entre 16 e 19% para clones de *Eucalyptus* spp. aos 7, e Carneiro et al. (2013) de 18% para a espécie *Mimosa tenuiflora*, aos 20 anos de idade.

A última fase de decomposição é caracterizada pela degradação da celulose. Nesta etapa, na maioria dos espaçamentos analisados a maior perda de massa ocorreu na faixa de temperatura de 340 a 380 °C (Figura 23). Observa-se uma perda de massa de aproximadamente 50%, sendo semelhante aos resultados reportados por Pereira et al. (2013) e Vidaurre et al. (2012), que encontraram picos máximos de degradação nas faixas

de temperaturas entre 342°C e 350 ° C para clones de *Eucalyptus* spp. e *Schizolobium amazonicum*, respectivamente.

A partir de temperaturas próximas a 400°C (figura 22), verifica-se que a degradação térmica da madeira se tornou menor, correspondendo principalmente, à degradação de lignina. Nessa temperatura, a celulose e as hemiceluloses componentes químicos em maior proporção na madeira, já foram degradadas, portanto a perda de massa nessa fase foi baixa, em média cerca de 5% (PEREIRA et al., 2013).

Em temperaturas até 600 °C as perdas de massa são maiores que 95% para hemiceluloses e maiores de 80% para a celulose, enquanto as perdas em massa de lignina não excedem 60% (BARTKOWIAK e ZAKRZEWSKI, 2004).

Figura 22. Curvas de TG da madeira de tachi-branco em atmosfera de nitrogênio

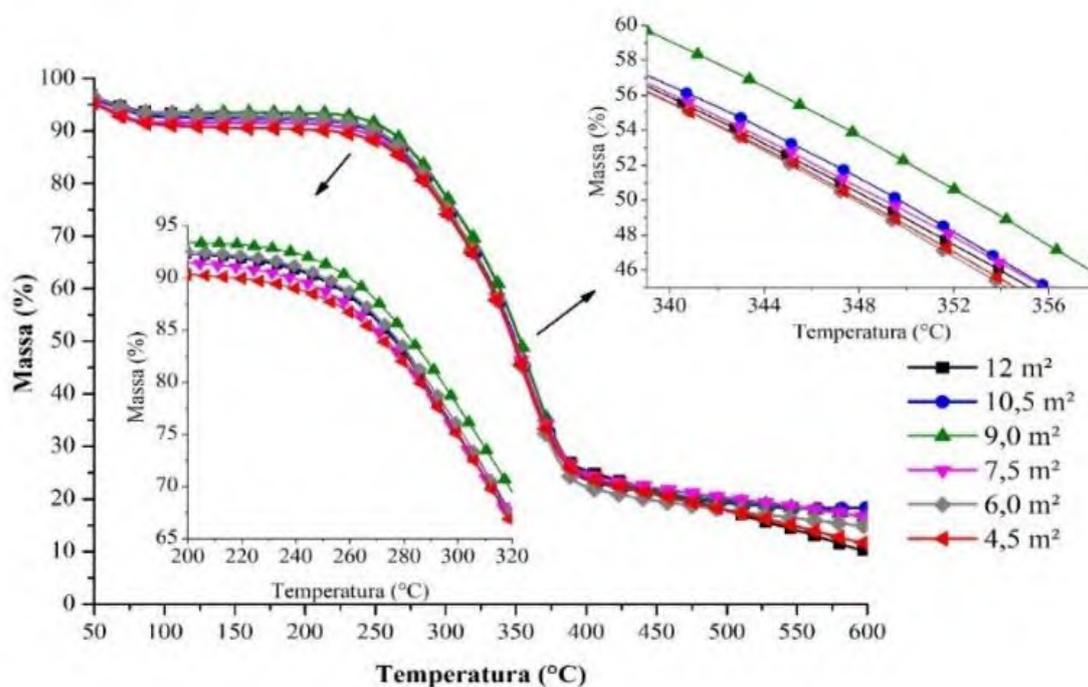
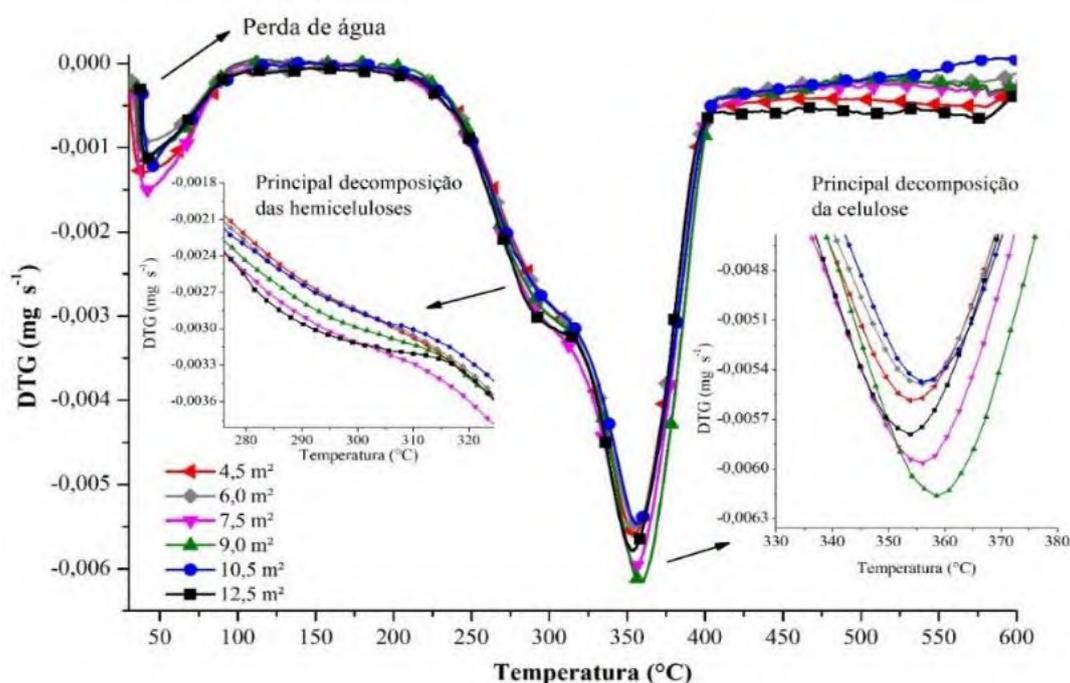


Figura 23. Curvas de DTG da madeira de tachi-branco em atmosfera de nitrogênio

Os valores de massas residuais nos diferentes espaçamentos, variaram entre 11% a 17%. As áreas úteis 6,0 m², 7,5m² e 9 m² foram as que apresentaram maiores valores (tabela 16), portanto esses espaçamentos são considerados mais estáveis termicamente em relação aos demais. Por outro lado, a área útil de 12,0 m² foi a menos estável, apresentando a menor massa residual (11%) até a temperatura de 600°C. De modo geral, quanto mais estável termicamente a madeira, maior será o rendimento em carvão vegetal (SANTOS et al., 2012).

Tabela 16. Parâmetros da análise térmica da pirólise da madeira do tachi-branco

Área útil (m ²)	Faixa de Temperatura (°C)						Massa Residual
	30 - 100	100 - 200	200 - 300	300 - 400	400 - 500	500 - 600	
	-----%-----						
4,5	7 (± 1,5)	1 (± 0,21)	17 (± 0,8)	49 (± 1,5)	7 (± 1,4)	7 (± 2,2)	12
6,0	7 (± 0,9)	1 (± 0,07)	17 (± 0,5)	50 (± 2,4)	5 (± 0,5)	3 (± 0,2)	17
7,5	9 (± 0,8)	0 (± 0,06)	16 (± 0,6)	50 (± 0,5)	5 (± 0,2)	3 (± 0,2)	17
9,0	7 (± 2,8)	0 (± 0,39)	16 (± 0,1)	51 (± 2,1)	5 (± 0,6)	3 (± 1,1)	17
10,5	8 (± 0,6)	1 (± 0,26)	18 (± 1,6)	49 (± 3,6)	8 (± 6,4)	5 (± 5,4)	12
12,0	8 (± 1,1)	1 (± 0,18)	17 (± 0,5)	51 (± 1,2)	7 (± 1,0)	6 (± 1,5)	11
Média	8	1	17	50	6	5	14
CVe (%)	19,3	56,1	4,8	4,0	44,0	56,2	31,7

CONCLUSÕES

- O espaçamento de plantio influenciou estatisticamente as características de crescimento das árvores. Porém, não influenciou estatisticamente, a qualidade da madeira para uso energético.
- Verificou-se que os maiores espaçamentos (9 m² e 12 m²) apresentaram maiores produções de madeira por árvore, em relação aos menores espaçamentos (6 m² e 7,5 m²). Entretanto, o menor espaçamento fornece um quantitativo maior de madeira por área.
- O espaçamento indicado para a espécie *Tachigali vulgaris* aos 7 anos de idade, foi o 3 x 3 m (9 m²), pois apresentou bom desempenho em termos de crescimento individual e por hectare, sem alterar negativamente a qualidade da madeira para bioenergia.
- Os resultados encontrados demonstram que o uso da espécie *Tachigali vulgaris* como fonte bioenergética, pode ser altamente viável dadas as suas características físicas, químicas, energéticas e térmicas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941-02 - Determinação da densidade básica em madeira**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **D1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2007. 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **E711-87**: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia: ASTM International, 2004. 8 p.

ASSIS, M. et al. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

BARROS, S. et al. Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no Amazonas: alternativa para produção de lenha. **Floresta**, v. 42, n. 4, p. 725-732, 2012.

BALLONI, E; SIMÕES, J. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais, **IPEF**, v.1, n.3, p. 1-6, 1980.

BARCELLOS, D. et al. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para a produção de energia: um enfoque nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, v 2, p.141-158, 2005.

BARTKOWIAK, M; ZAKRZEWSKI, R. Thermal degradation of lignins isolated from wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.77, n. 1, p. 296-304, 2004.

BERGER, R. et al. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, 2002.

BINKLEY, et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017.

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

BRAND, M. et al. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2581 - 2588, 2011.

BREWBAKER, J. et al. Utilização de árvores fixadoras de nitrogênio. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 19, p. 193 - 204, 1984.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In Congresso Florestal Panamericano, 1, Congresso Florestal Brasileiro, 7, 1993, Anais...Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, p. 280-282, 1993.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF**, 1993. 6p. (Circular Técnica, 181).

- BRITO, J.; BARRICHELO, L. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n.16, p. 63 - 70, 1978.
- BRITO, J.; BARRICHELO, L. Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização (Circular Técnica, 28). **IPEF**, p. 0 - 4, 2006.
- BUFALINO, L. et al. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, p. 129- 137, 2012.
- CARNEIRO, A. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375 - 381, 2014.
- CARPANEZZI, A. et al. Aspectos ecológicos e silviculturais de taxi-branco-da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum* Vogel). **Circular Técnica 8**. Embrapa, 1983.
- CASTRO, A. et al. Comportamento silvicultural de *Sclerolobium paniculatum* (Taxi-branco) no cerrado amapaense. **Comunicado Técnico 7**, p. 1- 4, 1990.
- CHUN, Y. et al. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 17, p. 4649 - 4655, 2004.
- CONESA, J. A. et al. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Thermochimica Acta**, v. 254, p. 175-192, 1995.
- COSTA, A. et al. Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p.10-20, 2017.
- COSTA, K. et al. Biomass and energy yield of leguminous trees cultivated in Amazonas. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 705-712, 2015.
- COUTO, L. et al. Programa de pesquisa para avaliação de densidades de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para produção de biomassa. **Biomassa & Energia**, v 1, p.107-112, 2004.
- DAMÁSIO, R. et al. Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 75, p. 261-267, 2013
- DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.
- DEMIRBAS, A. et al. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy, Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002.
- DEMOLINARI, R. et al. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de monte dourado (PA). **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 503-512, 2007.
- ELOY, E. et al. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. **Revista Árvore**, v. 38, p.551-55, 2014.
- ELOY, E. et al. Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação. **Ciência Rural**, v.45, n.8, p.1424-1431, 2015.

- FARIAS, J. et al. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* – *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016.
- FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e aspectos gerais da combustão. FUPEF, Seria Técnica, n. 6, 1981.
- FERNANDES, E. et al. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 603-608, 2013.
- FRIEDL, A. et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chimica Acta**, v. 544, n. 1-2, p. 191-198, 2005.
- FURTADO, T. et al. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, v.36, n.3, p.577-582, 2012.
- GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 249-258, 2012.
- GARLET, V.N. **Influência do espaçamento das árvores de *Eucalyptus grandis* na qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica Kraft**. 1995. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.
- GIL, M. et al. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 22, p. 8859-8867, 2010.
- GOMINHO, J. et al. The influence of tree spacing in heartwood content in *Eucalyptus globulus* Labill. **Wood and Fiber Science**, v. 37, n. 4, p. 582 - 590, 2005.
- GOULART, M. et al. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 167 - 175, 2003.
- Haiping, Y. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, p. 1781 - 1788, 2007.
- HAYKIRI-AÇMA, H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energ. Convers. Manage**, n. 44, p. 155 - 162, 2003.
- HAYKIRI-ACMA, H. et al. Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 91, p. 759 - 764, 2010.
- IAWA Committee. 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. E.A. Wheeler; P. Baas & P. Gasson (eds.). IAWA Bulletin 10: 219-332.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2017**. Brasília, DF, 2017. 77 p.
- JESUS, M. et al. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.
- JUIZO, C. et al. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Agrária**, v. 12, n. 3, p. 386 - 390, 2017.

- JUNIOR, H. et al. Management of *Eucalyptus* short-rotation coppice and its outcome on fuel quality. **Renewable Energy**, v. 121, p. 309 - 314, 2018.
- JUNIOR, H. et al. Sustainable use of *Eucalyptus* biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, n. p. 15-21.
- KAI, X. et al. The effect of biomass components on the co-combustion characteristics of biomass with coal. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL MANUFACTURING AND AUTOMATION, 2., 2011, Zhangjiajie. **Proceedings...** Zhangjiajie: IEEE, 2011. p. 1274-1278
- LEITE, E. et al. Composição química elementar da madeira e do carvão vegetal de *coffea arabica* para uso bioenergético, **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 537 - 547, 2015.
- LELES, P. et al. Crescimento e Biomassa de *Melia azedarach* L. em Diferentes Espaçamentos e Características Tecnológicas da Madeira Visando à Produção de Carvão. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 214-223, 2014.
- LEROY, V. et al. Thermal degradation of ligno-cellulosic fuels: DSC and TGA studies. **Thermochimica Acta**, v. 451, n. 1/2, p. 131-138, 2006.
- LEWANDOWSKI, I. et al. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. **European Journal of Agronomy**, v. 6, n. 3/4, p. 163- 177, 1997.
- LI, L. et al. Thermogravimetric and kinetic analysis of Spirulina wastes under nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, v. 140, p. 152- 157, 2013.
- LIMA, E. et al. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n.65, p. 9-17, 2011.
- LIMA, R. **Crescimento do *Sclerolobium paniculatum* Vogel na Amazônia, em função de fatores de clima e solo**. 2004. 212f. Tese (Doutorado em ciências florestais) - Universidade Federal do Paraná, 2004.
- LIMA, R. et al. Efeito do Espaçamento no Desenvolvimento Volumétrico de *Pinus taeda* L. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 2, p. 223-230, 2013.
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 143, p. 562-574, 2013.
- MAGALHÃES, M. et al. Desempenho silvicultural de clones e espécies/procedências de *Eucalyptus* na região noroeste de Minas Gerais. **Revista Cerne**, v. 13, n. 4, p. 368–375, 2007.
- MARAFON, A. et al. **Poder Calorífico do Capim-Elefante para a Geração de Energia Térmica**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016.
- MARTINS, R. et al. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.
- MIGLIORINI, A. et al. Influência das práticas silviculturais na produção de carvão vegetal. Piracicaba: **Circular técnica IPEF**; 1980.

- MIRANDA, I. et al. The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globulus* Labill pulpwood. **Appita Journal**, v. 56, n. 2, p. 140-144, 2003.
- MIRANDA, I. et al. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacings. **Trees-Structure and Function**, Heidelberg, v.23, n.3, p. 367-372, 2009.
- MOCHIUTTI, S. et al. Taxi-branco (*Sclerolobium gumiferum* Vogel.): leguminosa arbórea para recuperação de áreas degradadas e abandonadas pela agricultura migratória. **Comunicado técnico**, p.1-5, n. 28. Macapá: Embrapa Amapá, 1999.
- MOON, C. et al. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232-240, 2013.
- MORAES, R. et al. Avaliação da adaptabilidade e produtividade de plantios de Taxi-Branco (*Sclerolobium paniculatum*) na região de Manaus e Iranduba, Amazonas. In: **anais da IX jornada de iniciação científica da Embrapa Amazônia ocidental**. Manaus: Embrapa Amazônia ocidental, 2012.
- MOULIN, J. et al. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da Madeira de eucalipto, **Revista Árvore**, v. 39, p. 199-208, 2015.
- MOULIN, J. et al. Efeito do Espaçamento, Idade e Irrigação no volume e densidade Básica do Eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 25, p.1-10, 2017.
- MÜLLER, M; COUTO L. Avaliação de densidades de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para produção de biomassa. **Documento técnico**, p. 65, 2006
- MÜLLER-HAGEDORN, M. et al. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 68, n. 1, p. 231-249, 2003.
- NETO, S. et al. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 15 - 23, 2003.
- NOGUEIRA, L. et al. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.
- OLIVEIRA, A. et al. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 59 - 68, 2012.
- OLIVEIRA, I. et al. Biomassa e características da madeira de *Sclerolobium paniculatum* cultivado em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 14, n. 4, p. 351 - 357, 2008.
- ÓRFÃO, M. et al. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materialsthree independent reactions model. **Fuel**, London, v. 78, p. 349 - 358, 1999.
- PALERMO, G. et al. Análise da densidade da madeira de *Pinus elliottii* e por meio de radiação gama de acordo com as direções estruturais (longitudinal radial) e a idade de crescimento. **Floresta e Ambiente**, v.10, n.2, p.47-57, 2003.
- PAULA, J. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia e papel. **Acta Amazonica**, v. 33, n. 2, p. 243-262, 2003.

- PAULA, J. E. de. Madeiras que produzem álcool, coque e carvão. – **Atualidades do Conselho Nacional do Petróleo**, v. 12, p. 31 - 45, 1980.
- PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.
- PELANDA, et al. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como Biocombustível em Geradores de Vapor, **Ciência da madeira**, v. 6, n. 2, p. 112-121, 2015.
- PEREIRA, B. et al. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, Railegh, v. 8, p. 4574-4592, 2013.
- PROTÁSIO, et al. Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 327-341, 2017.
- PROTÁSIO, T. **Características de crescimento, madeira e carvão para classificação de clones de *Eucalyptus* spp. visando o uso energético**. 2016. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, 2016.
- PROTÁSIO, T. et al. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, v. 42, p. 113-127, 2014.
- PROTÁSIO, T. et al. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 1-10, 2017
- PROTÁSIO, T. et al. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.
- PROTÁSIO, T. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.
- QIAN, W. et al. Combustion characteristics of semicokes derived from pyrolysis of low rank bituminous coal. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 22, n. 5, p. 645-650, 2012.
- QUIRINO, W. et al. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v.1, n. 2, p. 173-182, 2004.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.
- RAGLAND, K. et al. Properties of wood for combustion analysis, **Bioresource Technology**, n. 37, p. 161-168, 1991.
- REIS, A. et al. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

REZENDE, R. N; et al. Air drying of logs from a *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. **Cerne**, v. 16, n. 4, p. 565-572, 2011.

RIOS, T. et al. Avaliação físico-química do carvão de cachamorra (*Sclerolobium paniculatum* vogel) e pau-terra de folha larga (*Qualea grandiflora* mart.). **Bioenergia em revista: diálogos**, n. 2, p.120-133, 2017.

ROCHA, M. et al. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark, **Journal of Tropical Forest Science**, n. 28 v.3, 243–248, 2016.

ROCHA, M. et al. Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Ciência da madeira**, v.8, n.2, p. 54-63, 2017.

SAHU, S. G. et al. Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 3, p. 369-378, 2010

SÁNCHEZ-SILVA, L. et al. Pyrolysis and combustion kinetics of microcapsules containing carbono nanofibers by thermal analysis-mass spectrometry. **J. Anal**, v. 94, p. 246–252, 2012.

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

SANTOS, R. et al. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v.18, n.1, p. 143 - 151, 2012.

SANTOS, R. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v.39, n.90, p.221-230, 2011.

SANTOS, R. et al. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 493-504, 2013.

SEREGHETTI, G. et al. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v. 30, n.3, p.257-262, 2015.

SILVA, A. et al. Desempenho do tachi-branco em resposta à adubação combinada de fósforo e potássio em Latossolos. **Acta Iguazu**, v.5, n.2, p. 37-48, 2016.

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

SILVA, C. et al. Lenho e Casca de *Eucalyptus* e *Acacia* em Plantios Monoespecíficos e Consorciados. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1-8, 2018.

SILVA, D. et al. Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

- SILVA, J. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.455-460, 2005.
- SILVA, L; LIMA, H. Mudanças nomenclaturais no gênero *Tachigali* Aubl. (Leguminosae – caesalpinioideae) no Brasil. **Rodriguésia**, v.2, n.58, p-397-401, 2007.
- SILVA, M. et al. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p-61-70, 2007.
- SIMPSON, W; TENWOLDE, A. Physical Properties and Moisture Relations of Wood. In _____. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison. 1999. p. 3-25.
- SOARES, V. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.
- SOUZA, A. et al. Ajustando os botões: como as plantas lidam com o aumento do CO₂ atmosférico. In: BUCKERIDGE, M. S. (Org.). **Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil**. São Carlos: Rima Editora. p. 101–113, 2008.
- SOUZA, F. **Estudo comparativo da madeira e polpação de *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* em dois modelos silviculturais**. 2012. 70 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) - Universidade Estadual Paulista, 2012.
- SOUZA, M. et al. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.
- STURION, J. et al. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 16, p. 55-59, 1988.
- TELMO, C. et al. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. **Bioresour Technol**, n. 101, p. 3808 - 3815, 2010.
- TENORIO, C; MOYA, R. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. **Thermochimica Acta**, v. 563, p. 12- 21, 2013.
- TOMASELLI, I. et al. Caracterização da madeira de tachi-branco-da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) para energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 6, p. 33-44, 1983.
- TORRES, et al. Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em Sistemas Agroflorestais. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 137-148, 2016.
- TRUGILHO, P, F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 104 - 114, 2001.
- TRUGILHO, P. et al. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência**

Rural, v. 45, n. 4, p. 661 - 666, 2015.

TRUGILHO, P. et al. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v.16, p. 33 - 40, 2010.

VALE, A et al. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VALE, A, et al. Rendimento da carbonização e qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 20, n.1, p. 93-99, 1996.

VALE, A. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* HILL EX-MAIDEN e *Acacia mangium* WILLD em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v.6, n.1, p. 83 - 88, 2000.

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

WANG, C. et al. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion. **Biomass and bioenergy**, v. 33, p. 50 - 56, 2009.

XIONG, S. et al. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 86-92, 2014.

ZANUNCIO, A. et al. Composição química da madeira de *Eucalipto* com diferentes níveis de desbaste. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 755-760, 2013.

ZANUNCIO, A. et al. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 353 – 360, 2013.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: John Wiley, p. 689, 1963.

KLITZKE, R. et al. Caracterização dos lenhos de cerne, alburno e transição de jatobá (*Hymenaea* sp.) visando ao agrupamento para fins de secagem convencional. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 80, p. 279-284, 2008.