



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

UDSON DE OLIVEIRA BARROS JUNIOR

***Tachigali vulgaris* EM PLANTIOS HOMOGÊNEOS NA AMAZÔNIA:
PARÂMETROS DE CRESCIMENTO, MADEIRA E CARVÃO VEGETAL
PARA FINS ENERGÉTICOS**

**BELÉM
2020**

UDSON DE OLIVEIRA BARROS JUNIOR

***Tachigali vulgaris* EM PLANTIOS HOMOGÊNEOS NA AMAZÔNIA:
PARÂMETROS DE CRESCIMENTO, MADEIRA E CARVÃO VEGETAL
PARA FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, área de concentração em Ciências Florestais e linha de pesquisa em Tecnologias de Recursos Florestais para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio.
Coorientadora 1: Profa. Dra. Lina Bufalino.
Coorientadora 2: Dra. Fernanda Trislitz Perassolo Guedes.

**BELÉM
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B277t Barros Junior, Udson de Oliveira
Tachigali vulgaris em plantios homogêneos na Amazônia: Parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal para fins energéticos / Udson de Oliveira Barros Junior. - 2020.
117 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF),
Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

Coorientadora: Profa. Dra. Lina Bufalino e Fernanda Trislitz Perassolo Guedes.

1. Tachi branco. 2. Floresta energética. 3. Biomassa. 4. Bifurcação. I. Protásio, Thiago de Paula,
orient. II. Título

CDD

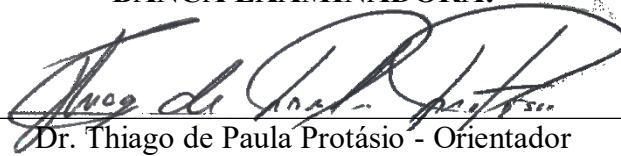
UDSON DE OLIVEIRA BARROS JUNIOR

***Tachigali vulgaris* EM PLANTIOS HOMOGÊNEOS NA AMAZÔNIA:
PARÂMETROS DE CRESCIMENTO, MADEIRA E CARVÃO VEGETAL
PARA FINS ENERGÉTICOS**

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

Aprovado em 16 de julho de 2020

BANCA EXAMINADORA:



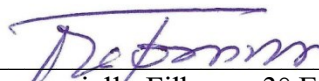
Dr. Thiago de Paula Protásio - Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA



Dr. Lourival Marin Mendes – 1º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS - UFLA



Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli – 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS - UFLA



Dr. Mario Tommasiello Filho – 3º Examinador
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “Luiz de Queiroz”/UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO (ESALQ/USP)

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

À minha família pelo apoio de sempre.

A todos os amigos que fiz em Belém do Pará durante o curso de mestrado.

À Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) por ter sido minha casa durante 7 anos da minha vida.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais (PPGCF/UFRA) pela oportunidade de me tornar mestre e por todo o apoio durante os 2 anos de curso.

Ao professor Dr. Thiago de Paula Protásio pela orientação e todo o aprendizado que me foi dado durante o curso de mestrado, bem como à professora Dra. Lina Bufalino e Dra. Fernanda Trislitz Perassolo Guedes pela coorientação desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão dos 24 meses de bolsa de estudo (Processo nº133775/2018-6).

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica na Amazônia (PROCAD), edital nº21/2018 da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da pesquisa.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Amazônia Oriental, na pessoa do pesquisador Delmam de Almeida Gonçalves, pela gestão da área experimental de *Tachigali vuulgaris*.

À Empresa Jari Celulose S/A por disponibilizar a área experimental de *Tachigali vulgaris* e por todo o suporte técnico e logístico para a realização desta pesquisa.

Ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF), da Universidade Federal Rural da Amazônia, *campus* Belém, na pessoa dos professores Suelo Numazawa, Manoel Sebastião Pereira de Carvalho e Lina Bufalino, pelo armazenamento dos discos de madeira e pela estrutura para as análises de densidade básica da madeira.

Ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais (LMB), da Universidade Federal de Lavras (UFLA), na pessoa do professor Dr. Paulo Fernando Trugilho e da pós-doutoranda Maíra Reis de Assis pelas análises de composição química elementar da madeira, bem como pelas carbonizações e análises de composição química imediata do carvão vegetal.

Aos discentes de graduação Evelyn, Elvis, Romel, Eidy, Lanna, Mirian e Eliana, orientados do professor Dr. Thiago de Paula Protásio, pelas análises de composição química imediata da madeira e do carvão vegetal realizadas no Laboratório de Química, da Universidade Federal Rural da Amazônia, *campus* Parauapebas.

Ao professor Mario Tommasiello Filho e Dra. Fernanda Trislitz Perassolo Guedes pela parceria firmada no âmbito do PROCAD que me possibilitou participar do curso de “Dendrocronologia: princípios e aplicações da análise dos anéis de crescimento das

árvores” e realizar as análises de densitometria de raios X usando a estrutura do Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeira (LAIM – ESALQ/USP).

Aos professores Dr. Alvaro Augusto Vieira Soares e Dr. Rodrigo Otávio Veiga de Miranda, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo processamento e análise dos dados de mortalidade, crescimento e produtividade, por meio da parceria do projeto “Rede brasileira de pesquisa em crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* (tachi branco) proveniente de plantios homogêneos para a geração de bioenergia na Amazônia”.

RESUMO

A espécie arbórea nativa *Tachigali vulgaris* tem potencial para a produção de carvão vegetal e lenha, podendo ser biomassa florestal complementar à produção dos plantios energéticos de *Eucalyptus*. O objetivo deste trabalho foi avaliar se diferentes espaçamentos de plantio, de tipos de fuste e de idades afetam o crescimento e a qualidade da madeira e do carvão vegetal de *T. vulgaris* para fins energéticos. O estudo foi conduzido em área experimental de aproximadamente 6 ha, conduzida pela Embrapa Amazônia Oriental, na empresa Jari Celulose S.A., distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, composto por 3 blocos e 6 espaçamentos. Foram avaliados parâmetros de crescimento e qualidade da madeira e do carvão vegetal. A ANAVA revelou ausência de efeito significativo do espaçamento de plantio sobre o crescimento, aos 8 e 9 anos de idade, sendo observados valores médios de 168,23 m³ ha⁻¹ e 195,37 m³ ha⁻¹, para o volume com casca, e de 73,04 t ha⁻¹ e de 92,19 t ha⁻¹, para a massa seca de madeira. A densidade básica da madeira, aos 7 anos de idade, sofreu alterações do espaçamento (0,443 a 0,529 g cm⁻³ entre os espaçamentos) e do tipo de fuste (0,478 g cm⁻³ e 0,515 g cm⁻³ para fustes bifurcados e não bifurcados, respectivamente). No entanto, aos 8,5 anos de idade, verificou-se efeito apenas do tipo de fuste, cuja variação foi de 0,523 g cm⁻³ a 0,537 g cm⁻³ para fustes bifurcados e não bifurcados, respectivamente. A densidade aparente média (12% de umidade), analisada pela densitometria de raios X, foi afetada apenas pela idade e apresentou valor médio de 0,699 g cm⁻³. O espaçamento de plantio e tipo de fuste não afetaram a relação cerne/alburno, a composição química imediata e elementar e o poder calorífico, sendo observados valores médios de 80,51%, 0,33%, 19,07%, 2,2%, 50,9%, 6,1%, 40,48%, 20,51 MJ/kg e 19,26 MJ/kg, respectivamente, para os teores de MV, Cz, CF, N, C, H, O, PCS e PCI. O espaçamento e o tipo de fuste apresentaram efeito sobre a densidade do carvão vegetal e consumo específico de madeira, sendo produzido, nos fustes bifurcados, carvão de menor densidade (0,316 g cm⁻³) e maior consumo específico (6,04 m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal). Os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis, composição química imediata, poder calorífico, produtividade em massa de carvão vegetal e incremento médio anual em carvão vegetal não foram influenciados pelo espaçamento de plantio. Os resultados desta dissertação indicam que devem ser adotados espaçamentos mais amplos visando ganhos em crescimento, produtividade e densidade básica, além de não comprometer os demais parâmetros da madeira e carvão vegetal. Além disso, pesquisas futuras devem avaliar as causas da bifurcação em árvores de *T. vulgaris*.

Palavras-chave: Tachi branco. Floresta energética. Biomassa. Bifurcação.

ABSTRACT

The native tree species *Tachigali vulgaris* has potential for charcoal and firewood production and may be a forestry biomass to support the production from the *Eucalyptus* species energy plantations. The aim of this research was to evaluate whether different planting spacing, forking and age affect the growth and quality of *T. vulgaris* wood and charcoal for energy purposes. The study was carried out in a trial of about 6 ha, performed by Embrapa Amazônia Oriental, at the company Jari Celulose S/A, Monte Dourado District, Almeirim municipality, Pará. The experiment was performed in a randomized complete block design, in a split plot scheme, consisting of 3 blocks and 6 spacings. Growth and wood and charcoal quality parameters has been evaluated. The ANOVA found no significant effect of planting spacing on growth, at 8 and 9 years-old, with a range of 168.23 m³ ha⁻¹ and 195.37 m³ ha⁻¹, for the volume with bark, and of 73.04 t ha⁻¹ and 92.19 t ha⁻¹, for the dry wood mass. The wood basic density, at 7 years-old, has changed as function of the spacing (0.443 to 0.529 g cm⁻³, among the spacings), and of the forking (0.478 g cm⁻³ and 0.515 g cm⁻³ to the forked and not forked trees, respectively). Otherwise, at 8.5 years-old, it has been reported effect only of forking, with a range of 0.523 g cm⁻³ to 0.537 g cm⁻³ to the forked and not forked trees, respectively. The apparent density at 12% of moisture, analyzed by X-rays densitometry, has been affected only by age with an average of 0.699 g cm⁻³. The planting spacing and forking had no effect on heartwood/sapwood ratio, on the immediate and elemental chemical composition and on the heating value, with averages of 80.51%, 0.33%, 19.07%, 2.2%, 50.9%, 6.1%, 40.48%, 20.51 MJ/kg and 19.26 MJ/kg, respectively, to VM, Az, FC, N, C, H, O, HHV and LHV. The planting spacing and forking affect the charcoal apparent density and wood specific consumption, being produced, in the forked stems, charcoal of lower density (0.316 g cm⁻³) and higher wood specific consumption (6.04 m³ of wood/1 ton of charcoal). The carbonization yields in charcoal, pyroligneous liquid and non-condensable gases, immediate chemical composition, heating value, productivity in charcoal mass and annual mean increment in charcoal had not been affect by plating spacing. The findings of this thesis highlight the adoption of wider plating spacing in order to increase the growth, productivity and wood basic density, with no changes on the other wood and charcoal parameters. Therefore, further researches should be evaluating the causes of forking in *T. vulgaris* trees.

Key words: Charcoal tree. Energy forest. Biomass. Forking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aspecto geral do plantio experimental de <i>Tachigali vulgaris</i> , em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará.....	19
Figura 2. Aspectos de fustes de <i>T. vulgaris</i> bifurcados (A) e trifurcados (B).....	23
Figura 3. Organograma geral da pesquisa. Em que: AB é área basal; V_{cc} e V_{sc} são os volumes com e sem casca; MSM é a massa seca de madeira; MSC é a massa seca de carbono; MCO_{2eq} é a massa de CO_2 equivalente; IMA_{vcc} e IMA_{vsc} são os incrementos médios anuais em volume com e sem casca; IMAMS é o incremento médio anual em massa seca; IMACarb é o incremento médio anual em carbono; PE é a produtividade energética; PE_{tep} é a produtividade energética em toneladas equivalentes de petróleo; IMA_{Energ} e $IMA_{Energ_{tep}}$ são os incrementos médios anuais em produtividade energética e produtividade energética em toneladas equivalentes de petróleo.....	28
Figura 4. Localização e características (plantio, copa, fuste e disco) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade, em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. Fonte: Rosário (2019)	29
Figura 5. Esquema de casualização dos 6 espaçamentos nos 3 blocos de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil.....	31
Figura 6. Sequência da cubagem rigorosa: mensuração do CAP (1,30 m) (A), da HT e HC (m) (B) e das circunferências nas posições da seção do fuste (C e D) de <i>T. vulgaris</i> em um plantio experimental aos 8 e 9 anos de idade.....	33
Figura 7. Esquema de amostragem de árvores não bifurcadas (a), bifurcadas (b) e trifurcadas (c) ao longo do fuste e seccionamento dos discos em cunhas (d). Fonte: O autor	34
Figura 8. Retirada dos discos ao longo do fuste (A), discos das diferentes posições longitudinais (B), seccionamento dos discos em cunhas opostas (C) e discos seccionados no sentido transversal (D) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade. Fonte: O autor.....	35
Figura 9. Equipamento de dupla serra circular paralela no Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeira (LAIM/ESALQ/USP) utilizado para a retirada de cortes na direção transversal (A) e mensuração da espessura das amostras com paquímetro de precisão (B) de discos do DAP do lenho	39

Figura 10. Aparelho de raios X digital Faxitron X-ray, modelo LX 60 no LAIM – ESALQ/USP. Vista geral do equipamento de raios X digital (A); câmara de irradiação com destaque para as prateleiras e o local de saída dos feixes de raios X (B) e amostras dispostas na câmara de irradiação (C).....	40
Figura 11. Testes preliminares das análises de amostras do lenho de <i>T. vulgaris</i> com auxílio do software WinDendro™ que mostram a delimitação automática dos anéis de crescimento e do lenho inicial (A) e a delimitação manual com elevado grau de precisão (B)	41
Figura 12. Mortalidade de árvores (%) em função do espaçamento de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 (A) e 9 anos de idade (B).	49
Figura 13. Área basal ($m^2 ha^{-1}$) e volume com casca e volume sem casca ($m^3 ha^{-1}$) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade.	52
Figura 14. Massa seca de madeira ($t ha^{-1}$), massa seca de carbono ($t ha^{-1}$) e massa de dióxido de carbono equivalente ($t ha^{-1}$) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade	55
Figura 15. Incremento médio anual em volume com e sem casca ($m^3 ha^{-1} ano^{-1}$), incremento médio anual em massa seca ($t ha^{-1} ano^{-1}$) e incremento médio anual em carbono ($t ha^{-1} ano^{-1}$) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade	57
Figura 16. Produtividade energética ($GJ ha^{-1}$), produtividade energética em toneladas equivalentes de petróleo ($tep ha^{-1}$), incremento médio anual em energia ($GJ ha^{-1} ano^{-1}$) e incremento médio anual em toneladas equivalentes de petróleo ($tep ha^{-1} ano^{-1}$) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade	58
Figura 17. Densidade básica da madeira em função do espaçamento de plantio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade.....	59
Figura 18. Densidade básica da madeira nos diferentes espaçamentos de plantio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8,5 anos de idade.....	61
Figura 19. Distribuição dos dados de densidade básica em fustes não bifurcados e bifurcados em um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 e 8,5 anos de idade	63
Figura 20. Densidade básica média das duas idades de árvores bifurcadas em função do espaçamento de plantio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	64
Figura 21. Distribuição dos dados de densidade básica de árvores bifurcadas de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 e 8,5anos de idade	65
Figura 22. Densidade básica média das duas idades de árvores não bifurcadas nos diferentes espaçamentos de plantio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	65

Figura 23. Distribuição dos dados de densidade básica de árvores não bifurcadas de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 e 8,5 anos de idade	66
Figura 24. Perfil de variação radial da densidade aparente do lenho do DAP do tronco de árvores de <i>T. vulgaris</i> , nos diferentes espaçamentos de plantio	67
Figura 25. Densidades relativas aparentes média (A), máxima (B) e mínima (C) em função da idade/anel de crescimento de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	69
Figura 26. Efeito do espaçamento de plantio dentro de cada idade/anel de crescimento para a densidade relativa aparente média de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> ...	70
Figura 27. Efeito do espaçamento de plantio sobre a largura do anel de crescimento de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	72
Figura 28. Efeito da idade cambial sobre a largura do anel de crescimento de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	72
Figura 29. Efeito do espaçamento de plantio sobre a proporção de lenho inicial/lenho tardio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	73
Figura 30. Efeito da idade cambial sobre a proporção de lenho inicial/lenho tardio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	74
Figura 31. Efeito do espaçamento de plantio sobre a densidade do lenho tardio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	75
Figura 32. Efeito da idade cambial sobre a densidade do anel de crescimento de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	75
Figura 33. Efeito do espaçamento de plantio sobre a densidade do lenho inicial de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	76
Figura 34. Efeito da idade cambial sobre a densidade do lenho inicial de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	77
Figura 35. Efeito do espaçamento de plantio sobre a densidade do lenho tardio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	77
Figura 36. Efeito da idade cambial sobre a densidade do lenho tardio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	78
Figura 37. Relação cerne alburno e porcentagens (%) de cerne e alburno de discos da base de árvores de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8,5 anos de idade.....	79
Figura 38. Relação cerne alburno e porcentagens (%) de cerne e alburno de discos do DAP (1,30 m) de árvores de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8,5 anos de idade	80

Figura 39. Discos na posição do DAP (1,30 m) do fuste de árvores nos espaçamentos de 4,5 m ² (A), 6,0 m ² (B), 7,5 m ² (C), 9,0 m ² (D), 10,5 m ² (E) e 12,0 m ² (F) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8,5 anos de idade.	81
Figura 40. Densidade relativa aparente do carvão vegetal em função do espaçamento de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade.....	87
Figura 41. Correlação da densidade relativa aparente do carvão vegetal e densidade básica da madeira (g cm ⁻³) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade	88
Figura 42. Densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal (g cm ⁻³) em fustes bifurcados e não bifurcados de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade	89
Figura 43. Consumo específico (m ³ de madeira por tonelada de carvão vegetal) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade.....	90
Figura 44. Consumo específico (m ³ de madeira/tonelada de carvão vegetal) em fustes bifurcados e não bifurcados de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade	91
Figura 45. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC%), em líquido pirolenhoso (RLP%) e em gases não condensáveis (RGNC%), calculados na base seca, da madeira de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 7 anos de idade	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características de qualidade e produtividade do carvão vegetal de tachi-branco em dois ambientes.....	21
Tabela 2. Características do plantio e esquema de amostragem de árvores de <i>T. vulgaris</i> proveniente de um plantio experimental aos 8 e 9 anos de idade.....	32
Tabela 3. Resumo da análise de variância para a mortalidade de árvores (%) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade.....	48
Tabela 4. Densidade populacional inicial e real após a mortalidade de árvores (%) de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade.....	49
Tabela 5. Resumo da análise de variância para as variáveis de crescimento e produtividade de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 8 e 9 anos de idade.....	50
Tabela 6. Resumo da análise de variância das densidades relativas aparentes média, máxima e mínima de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	68
Tabela 7. Valores médios das densidades relativas aparentes média, máxima e mínima nos diferentes espaçamentos de plantio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	68
Tabela 8. Efeito da idade/anel de crescimento dentro de cada espaçamento de plantio para a densidade relativa aparente média de plantio de um plantio experimental de <i>T. vulgaris</i>	71
Tabela 9. Relação cerne/alburno (C/A), porcentagens de cerne (C%) e alburno (A%) em fustes bifurcados (BF) e não bifurcados (NB) de discos da base (0%) e DAP (1,30 m) do fuste de <i>T. vulgaris</i> de um plantio experimental aos 8,5 anos de idade.....	81
Tabela 10. Teores de materiais voláteis (MV), cinzas (Cz), carbono fixo (CF) e poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) da madeira do fuste de <i>T. vulgaris</i> de um plantio experimental aos 8,5 anos de idade.....	83
Tabela 11. Teores elementares de nitrogênio (N), carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e as relações H/C e N/C da madeira do fuste de <i>T. vulgaris</i> de um plantio experimental aos 8,5 anos de idade.....	85
Tabela 12. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC%), em líquido pirolenhoso (RLP%), em gases não condensáveis (RGNC%), materiais voláteis (MV%), cinzas (Cz%), carbono fixo (CF%) e poder calorífico superior (PCSMJ/kg) em fustes bifurcados (BF) e não bifurcados (NB) do fuste de <i>T. vulgaris</i> de um plantio experimental aos 7 anos de idade.....	91

Tabela 13. Composição imediata (%), poder calorífico superior (MJ/kg) e incremento médio anual em carvão vegetal ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) do carvão vegetal de *T. vulgaris* em um plantio experimental aos 7 anos de idade..... 94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS.....	17
2.1. Questões científicas.....	17
2.2. Hipóteses.....	17
2.3. Objetivos.....	18
2.3.1. Objetivo geral.....	18
2.3.2. Objetivos específicos.....	18
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1. A espécie.....	18
3.2. Espaçamento de plantio e idade.....	21
3.3. Bifurcação.....	22
3.4. Qualidade da madeira para a geração de energia.....	24
3.5. Densitometria de raios X para a avaliação da qualidade do lenho.....	26
3.6. Qualidade do carvão vegetal para a geração de energia.....	27
4. APRESENTAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
5.1. Área de estudo.....	29
5.2. Delineamento experimental.....	30
5.3. Mensuração da produtividade do plantio.....	32
5.4. Coleta e amostragem de material biológico.....	34
5.5. Avaliação do crescimento.....	35
5.6. Determinação da qualidade da madeira.....	38
5.6.1. Densidade básica da madeira.....	38
5.6.2. Variação radial da densidade por densitometria de raios X.....	38
5.6.3. Relação cerne/alburno.....	41
5.6.4. Composição química.....	42
5.6.5. Poder calorífico da madeira.....	43
5.7. Qualidade e produtividade do carvão vegetal.....	44
5.7.1. Processo de carbonização.....	44
5.7.2. Densidade relativa aparente (DRA).....	44
5.7.3. Consumo específico de madeira.....	45
5.7.4. Rendimentos da carbonização.....	45
5.7.5. Composição química imediata e poder calorífico.....	45
5.7.6. Produtividade em massa de carvão vegetal.....	46
5.7.7. Incremento médio anual em carvão vegetal.....	46
5.8. Análises estatísticas.....	46
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
6.1. Mortalidade, crescimento e produtividade.....	47
6.2. Variação da densidade básica da madeira.....	59
6.3. Variação radial da densidade por densitometria de raios X.....	66
6.4. Relação cerne/alburno.....	78
6.5. Composição química e poder calorífico da madeira.....	83
6.6. Qualidade e produtividade do carvão vegetal.....	87
7. CONCLUSÕES.....	95
8. RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	96
REFERÊNCIAS.....	97

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o líder mundial em produtividade de madeira e um dos países mais importantes no setor florestal global (BONASSA et al., 2018), tendo sua área de floresta plantada ampliada significativamente nos últimos 20 anos (PAYN et al., 2015). De acordo com o Relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2019), o país possui atualmente cerca de 7,83 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais 5,7 milhões são de espécies do gênero *Eucalyptus*, 1,6 milhões de *Pinus* e 590.000 ha de outras espécies, especialmente *Hevea brasiliensis*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis* e *Schizolobium amazonicum*.

Deste total de áreas plantadas, cerca de 14% são destinados exclusivamente à siderurgia à carvão vegetal, tendo em vista que esta atividade é destaque no país. O Brasil é o maior produtor e o único país a utilizar o carvão vegetal em larga escala para a biorredução do minério de ferro na indústria do ferro-gusa (FAO, 2017; LEME et al., 2018). O carvão vegetal é um produto de alto valor econômico, industrial e social, tendo a produção de 5,5 milhões de toneladas reportada no Balanço Energético Nacional em 2016 (EPE, 2017).

Apesar do destaque do setor florestal brasileiro, o reduzido número de áreas de florestas plantadas com espécies alternativas às tradicionalmente utilizadas para finalidades energéticas, chama a atenção para um problema: a forte dependência do setor por gêneros exóticos (*Eucalyptus* e *Pinus*). Isso instiga pesquisadores e estudiosos a conduzirem experimentos e estudos científicos com foco na avaliação do desempenho de madeiras de espécies nativas de potencial pouco conhecido, especialmente daquelas provenientes da Amazônia Brasileira, com o objetivo de complementar e/ou substituir a demanda pelas espécies mais utilizadas.

Reflorestamentos com espécies nativas apresentam diversas vantagens em relação aos reflorestamentos com espécies exóticas, tais como a substituição de madeiras de alto valor comercial oriundas de florestas nativas, disponibilidade local de fontes de propagação, ótima adaptação às condições ambientais locais, além da garantia de diversificação biológica e de uso do solo (MODES et al., 2018). Nesse contexto, a espécie arbórea *Tachigali vulgaris* (tachi-branco) tem potencial para a produção de carvão vegetal e lenha, sendo indicada como fonte de biomassa para substituir as espécies do gênero *Eucalyptus* em plantios comerciais (FARIAS et al., 2016). Os resultados desta pesquisa indicaram performance superior de *T. vulgaris* em comparação ao *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* em sobrevivência (52% contra 40% do *Eucalyptus*), produção de biomassa

(242 Mg ha⁻¹ contra 82 Mg ha⁻¹ do *Eucalyptus*) e deposição de serapilheira (12 Mg ha⁻¹ contra 5 Mg ha⁻¹ do *Eucalyptus*).

Adicionalmente, Silva et al. (2019a), caracterizando os parâmetros da madeira de *T. vulgaris* em plantio na mesma área experimental desta pesquisa, aos 7 anos de idade, registraram valores considerados satisfatórios para a finalidade energética quando comparados ao encontrado para espécies do gênero *Eucalyptus*. Neste estudo, os autores abordaram o efeito do espaçamento nos principais indicadores de qualidade da madeira para a finalidade energética. Contudo, as pesquisas com *T. vulgaris* precisam avançar para o melhor entendimento dos efeitos de espaçamento, tipo de fuste e idade nas propriedades da madeira que podem afetar diretamente a produção e propriedades do carvão vegetal. Nos plantios experimentais de *T. vulgaris* é recorrente a presença de árvores bifurcadas. Portanto, o efeito do tipo de fuste, associado aos diferentes espaçamentos e idade do plantio, nos parâmetros de qualidade da madeira precisa ser explorado.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa contribuirão com informações recentes acerca do crescimento e qualidade da madeira e carvão vegetal da espécie, além de adicionar conhecimento ainda não estudado, como, por exemplo, o perfil de densidade da madeira pela densitometria de raios X, que permitirá, com maior precisão, detalhar a qualidade do lenho desta espécie para a finalidade energética.

2. QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS

2.1. Questões científicas

- Quais espaçamentos de plantio e idade proporcionam maior crescimento do plantio homogêneo de *T. vulgaris*?
- Há efeito dos espaçamentos de plantio, tipo de fuste e idade sobre a qualidade da madeira de *T. vulgaris*?
- A qualidade e produtividade do carvão vegetal de *T. vulgaris* é modificada pelos diferentes espaçamentos de plantio e tipo de fuste?
- Os parâmetros de crescimento, madeira e carvão vegetal de *T. vulgaris* podem ser considerados satisfatórios para a aplicação energética?

2.2. Hipóteses

- O crescimento é maior nos espaçamentos mais amplos e em plantios de idade mais avançada.

- Os espaçamentos de plantio, tipo de fuste e idade interferem na qualidade da madeira de *T. vulgaris*.
- A qualidade e produtividade do carvão vegetal é modificada pelos espaçamentos de plantio e tipo de fuste.
- O crescimento, a madeira e o carvão vegetal de *T. vulgaris* possuem qualidade satisfatória para plantios dedicados à produção de biomassa para geração de energia.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo geral

Avaliar se diferentes espaçamentos de plantio, o tipo de fuste e a idade afetam o crescimento e a qualidade da madeira e do carvão vegetal de *T. vulgaris* para fins energéticos.

2.3.2. Objetivos específicos

- Analisar se o crescimento de *T. vulgaris* em plantio homogêneo tem comportamento diferente em função dos espaçamentos de plantio e idades.
- Verificar se há efeito dos espaçamentos de plantio, tipo de fuste e idade sobre a qualidade da madeira de *T. vulgaris*.
- Determinar o perfil de variação da densidade da madeira entre e dentro dos anéis de crescimento do fuste de *T. vulgaris*.
- Verificar se a qualidade e produtividade do carvão vegetal são modificadas pelos espaçamentos de plantio e tipo de fuste.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A espécie

Tachigali vulgaris é uma espécie arbórea pertencente à família das leguminosas (Fabaceae), sendo conhecida vulgarmente como tachi-branco, tachi-branco-da-terra-firme, carvoeiro, veludo, tachizeiro-branco. Seu nome é constantemente encontrado na literatura como *Sclerolobium paniculatum* Vogel, cuja alteração ocorreu pela inclusão do gênero *Sclerolobium* no gênero *Tachigali* (CARVALHO, 2005; SILVA; LIMA, 2007).

É uma espécie nativa e endêmica do Brasil que ocorre em uma ampla faixa de condições climáticas e edáficas, principalmente em matas de terra firme, áreas de transição nos cerrados e cerradões, e tem localização distribuída em todos os Estados da Amazônia Legal até os Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Bahia, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Brasília, São Paulo, além de ocorrer no Peru, Suriname, Guianas e Venezuela (CARPANEZZI et al., 1983; LORENZI, 2002; SOUSA et al., 2016; MARTORANO et al., 2018) (Figura 1).



Figura 1. Aspecto geral do plantio experimental de *Tachigali vulgaris*, em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. Fonte: O autor.

É uma espécie semidecídua, heliófila e pioneira que normalmente inicia sucessão em áreas recém-abertas, formando grupos moderadamente densos. Possui porte médio capaz de alcançar posições superiores do dossel em florestas secundárias com crescimento de 8 a 20 m de altura e 30 a 70 cm de diâmetro e incrementos médios anuais de 2,5 m ano⁻¹ e 3,4 cm ano⁻¹, em altura e diâmetro, respectivamente (YARED, 1990; LIMA, 2004; SOUCHIE et al., 2011; COSTA et al., 2015). Quanto à produtividade volumétrica, apresentou valores que variaram de 14,7 a 21 m³ ha⁻¹ em um plantio experimental, aos 5,8 anos de idade no Estado de Roraima, estabelecido nos espaçamentos de plantio de 2,0 x 2,0, 2,5 x 2,5, 3,0 x 2,0, 3,0 x 2,5 e 3,0 x 3,0 m, além de taxa de mortalidade variando de 6 a 10% (TONINI et al., 2018a). Gonçalves et al. (2009) reportaram incremento volumétrico entre 14 a 38,8 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em plantios de diferentes

idades e espaçamentos localizados em Belterra (PA), Igarapé-Açu (PA), Manaus (AM) e Cantá (RR).

Somado às características de rápido crescimento, boa produtividade volumétrica e baixa mortalidade, essa espécie possui elevada capacidade de produção, deposição e estoque de biomassa no solo, conforme verificado em um povoamento da espécie no Amapá, cujo valor foi de 9.646 kg/ha, superior ao encontrado para uma floresta secundária na mesma área (4.474 kg/ha) (MOCHIUTTI; QUEIROZ; MELÉM JUNIOR, 2006). Adicionalmente, tem aporte de grandes quantidades de nutrientes ao solo: 64,5 kg/ha de nitrogênio, 47,9 kg/ha de cálcio e 23,4 kg/ha de potássio e aumento de 47,5% no teor de matéria orgânica do solo devido à decomposição de serapilheira (MOCHIUTTI et al., 1998). Possui habilidade de associação simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium*, conforme verificado por Matos et al. (1993) em ensaio de nodulação de 13 espécies nativas e exóticas, no qual *T. vulgaris* foi capaz de formar nódulos, sugerindo boa capacidade para a fixação biológica de nitrogênio e, conseqüente melhoria das propriedades do solo. Portanto, a espécie é indicada para a composição de plantios homogêneos e mistos visando à recuperação de áreas degradadas, além de sistemas agroflorestais (CASTRO et al., 1998; BRIENZA JÚNIOR et al., 2011; SILVA et al., 2016a; SIMÕES et al., 2016).

As características da madeira de *T. vulgaris* são atrativas para a produção bioenergética, especialmente para a produção de carvão vegetal e lenha, além de apresentar resistência natural ao ataque do fungo *Postia placenta*, agente causador da podridão parda (STALLBAUN et al., 2016), podendo, eventualmente, serem similares e/ou superiores àquelas de madeiras de espécies do gênero *Eucalyptus* de uso amplamente consolidado no setor siderúrgico (LIMA, 2004). A densidade básica média da madeira varia de 0,499 g cm⁻³ a 0, 716 g cm⁻³, o poder calorífico é considerado alto (19,16 MJ kg⁻¹ a 20,14 MJ kg⁻¹) (OLIVEIRA et al., 2008; SILVA et al., 2015a; ORELLANA et al., 2018) e a relação cerne/alburno média é de 1,06 (SILVA et al., 2019a). Em relação à composição química imediata, Vale et al. (2002) reportaram concentrações médias de 21,0% e 0,39% para o teor de carbono fixo e cinzas, respectivamente, enquanto que Silva et al. (2019a), encontraram valores de 0,75, 6,3, 42,6, 49,8, 0,02, 78,54, 21,0 e 0,49%, para os teores de N, H, O, C, S, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, respectivamente.

Quanto à qualidade e produtividade do carvão vegetal, Tomaselli et al. (1983), ao caracterizar a madeira da espécie de árvores provenientes de área nativa e plantio experimental em Belterra (PA), reportaram resultados adequados para a finalidade energética, quando comparados a espécies do gênero *Eucalyptus*, conforme apresentado

na Tabela 1. Mouchiutti et al. (1999) encontraram produção estimada de carvão vegetal de 140 m³ ha⁻¹ após 8 anos de plantio no espaçamento de 3,0 x 2,0 m.

Tabela 1. Características de qualidade e produtividade do carvão vegetal de tachi-branco em dois ambientes.

Características	Mata nativa	Plantio
Poder calorífico (kcal/kg)	7690	7678
Rendimento gravimétrico (%)	37,8	35,9
Rendimento volumétrico (%)	57,5	55
Teor de carbono fixo (%)	74,9	74
Teor de cinzas (%)	1,62	1,17
Teor de materiais voláteis (%)	23,4	24,8

Fonte: Adaptado de Tomaselli et al. (1983).

3.2. Espaçamento de plantio e idade

O espaçamento inicial de plantio é um dos aspectos silviculturais mais importantes para as tomadas de decisão pelas empresas do setor florestal visando ao estabelecimento de povoamentos florestais, uma vez que o número de árvores plantadas por hectare influencia direta e indiretamente na competição interespecífica, nas taxas de crescimento, na formação e desenvolvimento de copa e galhos, produção e alocação de biomassa, nas propriedades da madeira e, conseqüentemente, nos custos de implantação, manejo e colheita e na quantidade e qualidade do produto final (GONÇALVES et al., 2004; CARDOSO et al., 2013; ROCHA et al., 2015; RIBEIRO et al., 2017; EUFRADE JUNIOR et al., 2018).

A escolha do espaçamento tem reflexos sobre o crescimento e produtividade dos povoamentos, especialmente para espécies de rápido crescimento, isso porque ele afeta a intensidade da competição por recursos, como luz, água e nutrientes (LELES et al., 1998). Em povoamentos muito adensados, o crescimento das árvores em diâmetro tende a ser reduzido, há maior área basal por hectare, maior volume total e maior taxa de mortalidade, enquanto que em espaçamentos amplos o desenvolvimento das árvores é maior em virtude da maior disponibilidade de recursos e menor competição entre as árvores (SCOLFORO et al., 1997; LEITE et al., 2006).

O número de árvores por unidade de área interfere significativamente nos parâmetros de qualidade da madeira. Quanto à densidade básica da madeira, são observadas tendências de comportamentos diferenciadas em diferentes espaçamentos, ora com aumento, ora com redução, ora sem efeito significativo, conforme verificado por Watson et al. (2003), cujos valores de densidade da madeira de *Tsuga heterophylla* não diferiram estatisticamente entre os espaçamentos. Por outro lado, Ahmed et al. (2019),

avaliando os efeitos de 4 espaçamentos (4,0, 9,0, 16,0 e 25,0 m²) sobre a madeira de híbridos de *Populus simonii* x *P. nigra* reportaram maiores valores de densidade nos espaçamentos mais reduzidos (1,527 e 1,035 g cm⁻³) em comparação aos espaçamentos mais amplos (0,900 e 0,885 g cm⁻³). Melo et al. (2018), reportaram valores de densidade básica da madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* aos 9 anos de idade, de 0,33 g cm⁻³ e 0,34 g cm⁻³, nos espaçamentos de 16 m² e 32 m², respectivamente.

Mmolotsi; Teklehaimanot (2006), estudando os efeitos de duas densidades de plantio (400 e 2500 árv. ha⁻¹) sobre as propriedades energéticas da madeira de *Alnus rubra* e *Acer pseudoplatanus*, não encontraram efeito significativo sobre o poder calorífico superior (21.218,7 e 23.481,8 kJ/kg, respectivamente) e teor de cinzas (0,97 e 0,59%, respectivamente). Efeitos significativos do espaçamento sobre o crescimento e propriedades comerciais da madeira de *Eucalyptus pilularis* aos 7 anos de idade foram relatados por Cassidy et al. (2013). Espaçamentos mais amplos afetaram significativamente a retidão do fuste, DAP, altura, esbeltez do fuste e o ângulo microfibrilar da madeira de *Pinus patula* aos 18 anos de idade (ERASMUS et al., 2018).

A idade é outro aspecto silvicultural de considerável influência sobre o crescimento e as propriedades da madeira, como, por exemplo, sobre o crescimento e alocação de biomassa, que tendem a serem maiores nos primeiros anos do plantio, até estabilizar quando o plantio atinge a fase adulta, e sobre a densidade básica da madeira, que segue uma tendência de aumento em função da idade (VITAL et al., 1984). Além disso, a idade afeta as proporções de madeira juvenil e adulta, sendo a madeira juvenil de características mais variáveis, como a menor densidade, maior ângulo de microfibrilas, fibras de menor comprimento e, paredes celulares mais delgadas (FERREIRA et al., 1997).

Segundo Sousa et al. (2004), deve-se adotar o espaçamento de 3 x 2 m nos plantios de *T. vulgaris* visando à produção de madeira nas condições do solos de baixa fertilidade na Amazônia, e o espaçamento de 3 x 1 m quando a finalidade for a produção de biomassa, haja visto que nesse espaçamento é utilizado menor número de plantas e produtividade de biomassa semelhante aos espaçamentos mais amplos.

3.3. Bifurcação

A bifurcação pode ser definida como o resultado de um processo biomecânico no qual fustes secundários surgem de um fuste principal (parental) e é caracterizada pela formação de dois ou mais fustes com diâmetros mais ou menos iguais, formando junções na estrutura da copa das árvores frequentemente conhecidas como fustes secundários ou

fustes codominantes (JUNGNIKL et al., 2009; SLATER et al., 2014). Do ponto de vista anatômico, os fustes secundários aparentam ter um padrão único de grã que permite suportar os demais fustes, o que está relacionado à eficiente condução de seiva no xilema pela produção desses fustes, garantindo maior resistência mecânica à região de junção dos fustes. Além disso, a morfologia destes fustes se altera de acordo com o ângulo de inclinação da bifurcação em relação ao eixo vertical, os quais se tornam mais elípticos à medida que os fustes se inclinam mais à vertical (DOMEQ; GARTNER, 2001; BUCKLEY et al., 2015; SLATER; ENNOS, 2015).

As causas que levam à formação de fustes secundários são desconhecidas, embora muitos autores acreditem que este processo esteja relacionado a causas genéticas, ambientais (ataque de pragas e doenças) e/ou à interação entre os dois fatores (RESENDE; FANTINI JÚNIOR, 2001; ENNOS; VAN CASTEREN, 2010). A bifurcação de espécies nativas e exóticas estabelecidas em plantios, homogêneos ou mistos, é uma característica já observada na literatura, como por exemplo para *Eucalyptus nitens* (JOHNSON, 1996), *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (SAMPAIO et al., 2000), *Swietenia macrophylla* (CORNELIUS, 2001), *Acacia koa* (SCOWCROFT et al., 2010), *Eucalyptus obliqua* (BAR-NESS; KIRKPATRICK; MCQUILAN, 2012) e *Tectona grandis* (CANÃDAS et al., 2013). O plantio objeto de estudo desta pesquisa apresenta muitos fustes bifurcados e, inclusive, árvores com três fustes secundários, sendo, portanto, uma característica muito notável e importante de ser estudada (Figura 2).

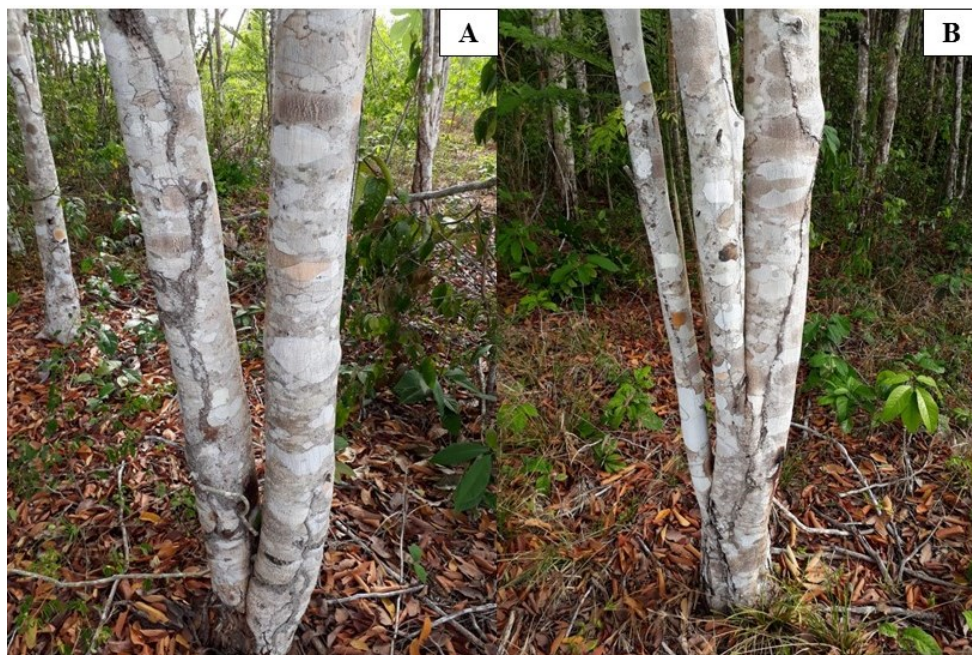


Figura 2. Aspectos de fustes de *T. vulgaris* bifurcados (A) e trifurcados (B). Fonte: O autor.

A presença de bifurcação é um sério problema para a qualidade da madeira, uma vez que gera grande quantidade de nós e grã irregular, reduzindo a resistência e uniformidade do fuste e, conseqüentemente, o seu valor econômico, o que impede a aplicação da madeira para algumas finalidades (SMILEY, 2003; KANE et al., 2008). Além disso, a bifurcação afeta negativamente a eficiência da colheita florestal, uma vez que as máquinas utilizadas têm melhor desempenho em plantios com árvores de apenas um fuste, altera a forma do fuste, promove variabilidade nas propriedades tecnológicas da madeira e aumenta a produção de lenho reativo (DVORAK et al., 2007; XIONG et al., 2014; MCEWAN; MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2016).

3.4. Qualidade da madeira para a geração de energia

A qualidade da madeira para a finalidade energética está diretamente associada às suas propriedades, tais como a densidade básica, a relação cerne/alburno, as composições químicas, bem como o poder calorífico e outras propriedades energéticas (ARAÚJO et al., 2018). Acredita-se que a densidade da madeira, definida como a quantidade de massa contida em uma unidade de volume, seja a propriedade mais importante para a caracterização da biomassa, podendo variar entre espécies, entre árvores da mesma espécie e até mesmo dentro de uma mesma árvore. Ela apresenta forte correlação com outras propriedades da madeira, como as físicas, químicas, anatômicas, mecânicas e energéticas (VITAL et al., 1986).

Para a finalidade energética, a densidade básica influencia na quantidade de massa disponível para combustão para um dado volume, além de influenciar a qualidade do carvão vegetal produzido (GOUVÊA et al., 2011; COUTO et al., 2012; COSTA et al., 2014;; PEREIRA et al., 2017; BAROTTO et al. 2018). Biomassas de maior densidade básica afetarão positivamente a capacidade produtiva da carvoaria, produzindo mais carvão para um determinado volume de madeira enforada (BRITO et al., 1993). Adicionalmente, madeiras mais densas produzirão carvão vegetal de maior densidade relativa aparente, maior resistência mecânica, menor friabilidade e, conseqüentemente, melhor qualidade para o uso siderúrgico (ASSIS et al., 2016).

A relação cerne/alburno expressa as porcentagens destes tecidos no lenho e tem impactos diretos sobre a utilização tecnológica da madeira, sendo aquelas de maior porcentagem de cerne desejáveis para a construção civil e indústria moveleira, enquanto que madeiras de maiores porcentagens de alburno têm mais aptidão para a indústria de celulose e usinas de tratamento devido à maior permeabilidade (TOMAZELLO FILHO, 1985). Quando a finalidade de uso da madeira for a energética, em plantios jovens com

predominância de madeira juvenil, são preferíveis madeiras de menor relação cerne/alburno, o que resultará em maior porcentagem de alburno e, portanto, de madeira mais permeável, facilitando a secagem da madeira durante a fase inicial da carbonização (SIAU, 1971; CASTRO, 2011).

A composição química imediata da madeira refere-se aos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas e se destaca por influenciar propriedades como o poder calorífico e, conseqüentemente, a geração de calor, além de ser uma propriedade de alta variação entre as espécies (VALE et al., 2000; QUIRINO et al., 2005). De modo geral, altos teores de cinzas reduzem o poder calorífico da madeira, enquanto que altos teores de carbono fixo afetam positivamente o valor calórico (TELMO et al., 2010; IMAM & CAPAREDA, 2012). Os materiais voláteis são a fração evaporada como vapor ou gás durante a decomposição térmica do combustível, enquanto que a outra quantidade de carbono não evaporada permanece relativamente intacta, no estado sólido, denominada de carbono fixo (VASSILEV et al., 2010; NASSER et al., 2016). Elevado teor de materiais voláteis facilita a ignição do combustível (WERTHER et al., 2000). O teor de carbono fixo e os materiais voláteis apresentam relação inversa, uma vez que são determinados por diferença (PROTÁSIO et al., 2011b).

As cinzas são resíduos compostos de óxidos minerais obtidos após a combustão completa da madeira (SOUZA et al., 2016). De acordo com Brand et al. (2015), o teor de cinzas de biomassas em geral adequado para produção bioenergética deve ser inferior a 5%, principalmente, pela relação inversa existente entre o teor de cinzas e o poder calorífico. Elevado teor de cinzas sugere elevados níveis de minerais. Sob altas temperaturas, as cinzas, por apresentar baixa temperatura de fusão, promovem prejuízos aos equipamentos de queima, como incrustações, corrosões e entupimentos, caracterizando-se como material abrasivo, além de reduzirem a qualidade do carvão vegetal como biorredutor do ferro na indústria siderúrgica (DEMIRBAS et al., 2002; BARCELOS et al., 2005; VIEIRA et al., 2013; MELISSARI, 2014).

Além das propriedades mencionadas anteriormente, a composição química elementar da madeira expressa, com base na massa seca de madeira, os teores de carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H), enxofre (S) e oxigênio (O), bem como as relações existentes entre esses elementos, tais como H/C e N/C (DIAS JÚNIOR et al., 2018). Visando à queima direta, são desejáveis biomassas com maiores teores de C e H, haja vista que estes dois elementos apresentam relação positiva com o poder calorífico e suas quantificações são muito importantes, pois a energia gerada no processo de combustão é oriunda da queima dos mesmos, melhorando o desempenho energético da biomassa

durante a carbonização (PROTÁSIO et al., 2013). Quanto menores os teores de oxigênio, melhor, pois este elemento não participa da combustão. Já os teores de N e S devem ser os menores possíveis, pois esses elementos são responsáveis pela formação de gases poluentes (NO_x e SO_x) (LEITE et al., 2015). Menores relações H/C e N/C são preferíveis para um melhor desempenho da biomassa.

O poder calorífico da madeira é definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou volume do combustível, expresso em kcal/kg e/ou MJ/kg (NOGUEIRA et al., 2000). Existem três tipos de poder calorífico: i) PCS - poder calorífico superior, ii) PCI - poder calorífico inferior e iii) poder calorífico líquido. A diferença entre eles é quanto à forma de obtenção e consideração ou não do calor latente do vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio elementar e umidade do combustível (TRUGILHO et al., 2017). Para o uso energético, o recomendado é madeira com alto poder calorífico (TELMO; LOUSADA, 2011a; CHAVES et al., 2013; NONES e al., 2015). Seus valores estão intimamente relacionados com a composição química da madeira, especialmente a lignina e os extrativos (resinas, óleos-resinas, graxas, etc.) (HUANG et al., 2009) e sofrem influência negativa da umidade, pois valores elevados de água presente na madeira reduzem o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape (FARINHAQUE, 1981; VALE et al., 2000; COUTO et al., 2005; SOUZA et al., 2012).

3.5. Densitometria de raios X para a avaliação da qualidade do lenho

A técnica da densitometria de raios X tem sido desenvolvida desde a década de 1960, a qual consiste na disposição de amostras do lenho sobre filmes radiográficos e, em seguida, sob fontes de raios X, sendo o filme radiográfico analisado em densitômetro e os valores de densidade óptica transformados em densidade relativa aparente do lenho (HUGHES e SARDINHA, 1975). No Brasil, a técnica foi implantada por Amaral (1994) e Amaral e Tomazello Filho (1998), e se trata de importante ferramenta na avaliação detalhada do efeito de tratamentos silviculturais sobre a caracterização tecnológica do lenho, possibilitando analisar produção anual de biomassa, relações genéticas, fertilização, irrigação, desrama, desbaste, estresses abióticos e bióticos e fatores climáticos (SILVA; LOUSADA, 2001; TOMAZELLO FILHO, 2005).

A partir das análises de densitometria de raios X é possível determinar o perfil (radial e longitudinal) da densidade relativa aparente do lenho, bem como delimitar os anéis de crescimento e suas larguras e diâmetro e as proporções de lenho inicial/lenho tardio, importantes variáveis para os estudos de qualidade do lenho. A utilização das

técnicas de densitometria de raios X para a avaliação da qualidade do lenho tem sido bem reportada para várias espécies arbóreas de interesse comercial, tais como *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (SURDI et al., 2014), *Aspidosperma pyrifolium* e *Poincianella pyramidalis* (PAGOTTO et al., 2017), *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (CAMARA et al., 2018), *Pinus taeda* (ORTEGA-RODRIGUEZ et al., 2018) e *Eucalyptus grandis* (CASTRO et al., 2020).

3.6. Qualidade do carvão vegetal para a geração de energia

As propriedades do carvão vegetal são primordialmente influenciadas pelas características da madeira de origem utilizada para a combustão e, subsequentemente, pelas condições de operação da pirólise, como os sistemas de produção, mão-de-obra, temperatura e tempo de pirólise utilizados (DUFOURNY et al., 2019). A densidade relativa aparente é a propriedade física mais relevante para a qualidade do carvão vegetal, cuja variação está diretamente associada à densidade básica da biomassa de origem, pois determina o volume ocupado pelo biorredutor no alto-forno siderúrgico. Portanto, sem prejuízos a outras propriedades, como a permeabilidade da madeira, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível para o melhor desempenho do alto forno siderúrgico (VITAL et al., 1986; PROTÁSIO et al., 2013).

Os rendimentos da carbonização, assim como os constituintes químicos do carvão vegetal, são fortemente influenciados pela temperatura final de carbonização. Quanto maior a temperatura final de carbonização, maior o teor de carbono fixo e menor será o rendimento em carvão vegetal. Além disso, a constituição química da madeira, como os teores de lignina e extrativos afetam os rendimentos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e em gases não condensáveis (OLIVEIRA et al., 2012a).

Quanto à composição química imediata do carvão vegetal, são sugeridas concentrações médias que variem de 25 a 35% para o teor de materiais voláteis, de 70 a 80% para o teor de carbono fixo e de 0,5 a 4% para o teor de cinzas (SANTOS, 2008). Para um melhor desempenho do carvão vegetal como biorredutor do minério de ferro, são desejados baixos teores de materiais voláteis, resultando em queima mais lenta (GRIESSACHER et al., 2012; AGUIRRE et al., 2013), e de cinzas, reduzindo os impactos sobre os equipamentos de queima (NEVES et al., 2011). Já o teor de carbono fixo deve ser superior a 70% para garantir maior eficiência (CHAVES et al., 2013). O poder calorífico do carvão vegetal, assim como para a madeira, deve ser o maior possível.

4. APRESENTAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação faz parte do projeto “Rede brasileira de pesquisa em crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* (tachi branco) proveniente de plantios homogêneos para a geração de bioenergia na Amazônia”, cadastrada na Pró-reitoria de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal Rural da Amazônia, sob o código PIPB146-2017. A pesquisa foi estruturada a partir dos dados de crescimento, qualidade da madeira e qualidade do carvão vegetal, conforme ilustrado na Figura 3.

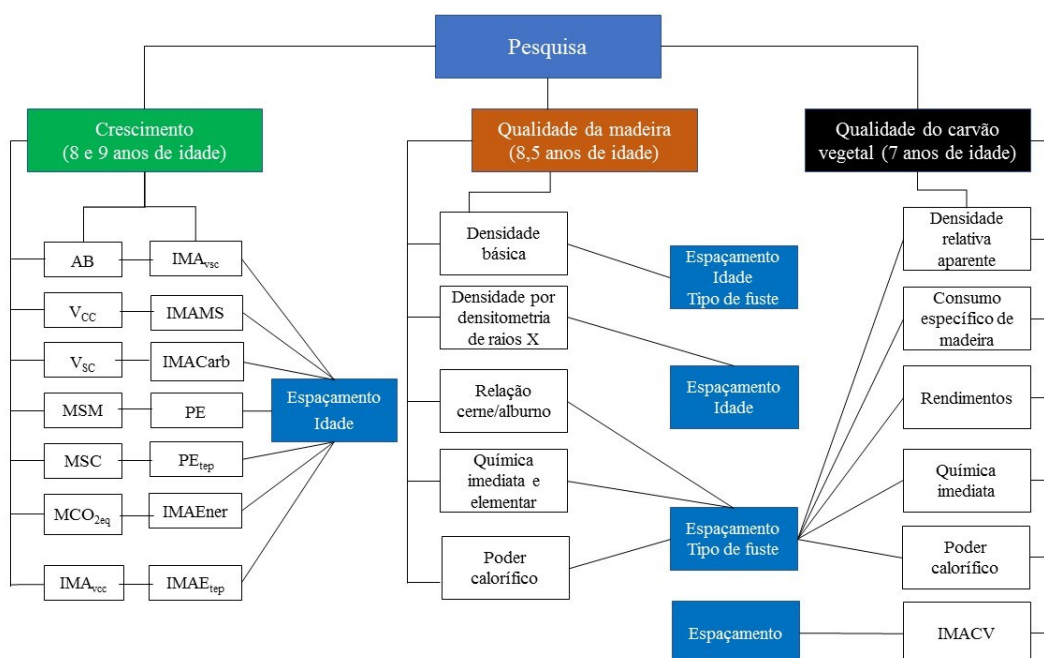


Figura 3. Organograma geral da pesquisa. Em que: AB é área basal; V_{cc} e V_{sc} são os volumes com e sem casca; MSM é a massa seca de madeira; MSC é a massa seca de carbono; MCO_{2eq} é a massa de CO_2 equivalente; IMA_{vcc} e IMA_{vsc} são os incrementos médios anuais em volume com e sem casca; IMAMS é o incremento médio anual em massa seca; IMACarb é o incremento médio anual em carbono; PE é a produtividade energética; PE_{tep} é a produtividade energética em toneladas equivalentes de petróleo; IMA_{Ener} e $IMA_{Ener_{tep}}$ são os incrementos médios anuais em produtividade energética e produtividade energética em toneladas equivalentes de petróleo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

O plantio homogêneo de *T. vulgaris* estudado nesta pesquisa foi implantado em meados de maio de 2010. Vale destacar que os parâmetros avaliados possuem idades distintas, uma vez que para a avaliação do crescimento foram utilizados os dados dos inventários florestais realizados aos 8 e 9 anos de idade, enquanto que os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal foram obtidos a partir de material biológico

coletado aos 7 anos, para as análises de qualidade e produtividade do carvão vegetal e de densidade básica da madeira, e aos 8,5 anos para as análises de qualidade da madeira.

5.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em um plantio homogêneo de *T. vulgaris* nas idades de 8 e 9 anos, em área experimental da Embrapa Amazônia Oriental de aproximadamente 6 ha localizada na empresa Jari Celulose S.A., distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, Brasil. No local, foram registradas as coordenadas geográficas por meio do Sistema de Posicionamento Global (GPS), utilizando aparelho modelo Garmin Etrex 10 (Figura 4).

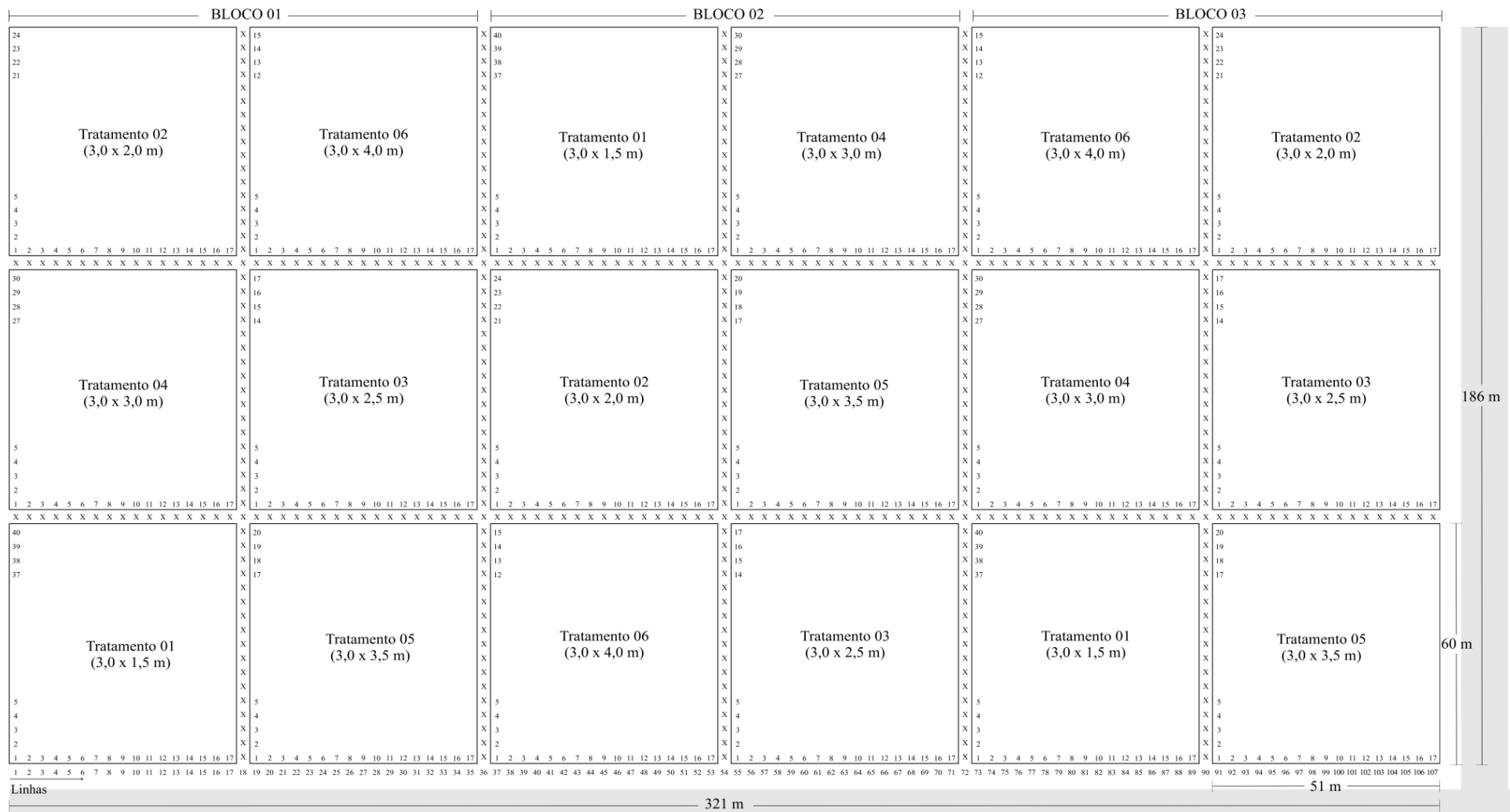


Figura 4. Localização e características (plantio, copa, fuste e disco) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade, em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará. Fonte: Rosário (2019).

Conforme classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, com características intermediárias entre Af e Aw, cujo regime pluviométrico define uma curta estação seca, entre os meses de agosto e dezembro e uma estação chuvosa entre os meses de janeiro a julho. A precipitação média anual registrada é de 2.300 mm e temperatura média anual de 26,8°C. O solo da área é do tipo Latossolo Amarelo Álico, com textura arenosa média (CASTRO et al., 2018).

5.2. Delineamento experimental

O experimento foi delineado em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, sendo os efeitos de parcela e subparcela definidos de acordo com cada parâmetro avaliado (descrito em 5.8. Análises estatísticas). O plantio foi instalado em 3 blocos em área experimental total de aproximadamente 6 ha (321 x 186 m). Em cada bloco, foram casualizados 6 espaçamentos de plantio em áreas com dimensões de 60 x 51 m (3.060 m²) cada (Figura 5).



1
2
3

Figura 5. Esquema de casualização dos 6 espaçamentos nos 3 blocos de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade em Monte Dourado, município de Almeirim, Pará, Brasil. Fonte: O autor.

5.3. Mensuração da produtividade do plantio

No centro de cada espaçamento (4,5, 6,0, 7,5, 9,0, 10,5 e 12,0 m²) foram instaladas parcelas permanentes de dimensões variáveis de acordo com o espaçamento, sendo instaladas 18 parcelas permanentes em toda a área experimental. Essas parcelas foram monitoradas nas idades de 8 e 9 anos (Tabela 2). Inicialmente, as parcelas apresentavam 49 árvores cada, tendo esse número diminuído de acordo com a mortalidade. (Tabela 4), das quais foram mensuradas a circunferência à altura do peito, à 1,30 m do solo (CAP) e estimada a altura total (HT) (m), e, posteriormente, estimado o volume comercial individual de cada árvore.

Tabela 2. Características do plantio e esquema de amostragem de árvores de *T. vulgaris* proveniente de um plantio experimental aos 8 e 9 anos de idade.

Espaçamento de plantio (m)	Área vital (m ²)	Densidade inicial (árv. ha ⁻¹)	Tamanho da parcela (m ²)	Nº árv. cubadas
3,0 x 1,5	4,5	2.222	220,5	9
3,0 x 2,0	6,0	1.666	294	9
3,0 x 2,5	7,5	1.333	367,5	9
3,0 x 3,0	9,0	1.111	441	9
3,0 x 3,5	10,5	952	514,5	9
3,0 x 4,0	12,0	833	588	9

Além das árvores inventariadas em cada parcela, 3 árvores foram cubadas em áreas externas às parcelas, totalizando 54 árvores representativas do plantio (3 árvores x 6 espaçamentos x 3 blocos), em cada idade, sendo 18 não bifurcadas e 36 bifurcadas, foram selecionadas aleatoriamente, excluindo-se aquelas que visivelmente apresentavam algum defeito ou estavam nas bordas do plantio. As árvores foram individualmente derrubadas com motosserra e foi mensurado o CAP (1,30 m do solo) e abatidas cada árvore com motosserra. Uma vez abatidas, foi realizada a cubagem rigorosa, que consistiu da mensuração da HT e altura comercial (HC) (posição da primeira inserção de galhos) e das circunferências da seção do fuste nas posições de 0,10 m, 0,70 m, 1,30 m, 2,0 m, e, a partir daí, de 2 em 2 m até a altura comercial (Figura 6). Para a obtenção do volume individual das 108 árvores selecionadas, utilizou-se a expressão de Smalian (HUSCH et al., 1972), segundo é apresentado na Equação 1:

$$V_{\text{Smalian}} = (\text{ASP}_1 + \text{ASP}_2 + \text{ASP}_3 + \text{ASP}_4 + \dots \text{ASP}_{\text{HT}}) \times L \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: V_{Smalian} é o volume pelo método de Smalian (m³); ASP_1 , ASP_2 , ASP_3 , ASP_4 e ASP_{HT} são as áreas seccionais nas posições de 0,10, 0,70, 1,30, 2,0 m e de 2,0 em 2,0 m até a altura comercial do fuste abatido (m²); e L é o comprimento do fuste abatido (m).

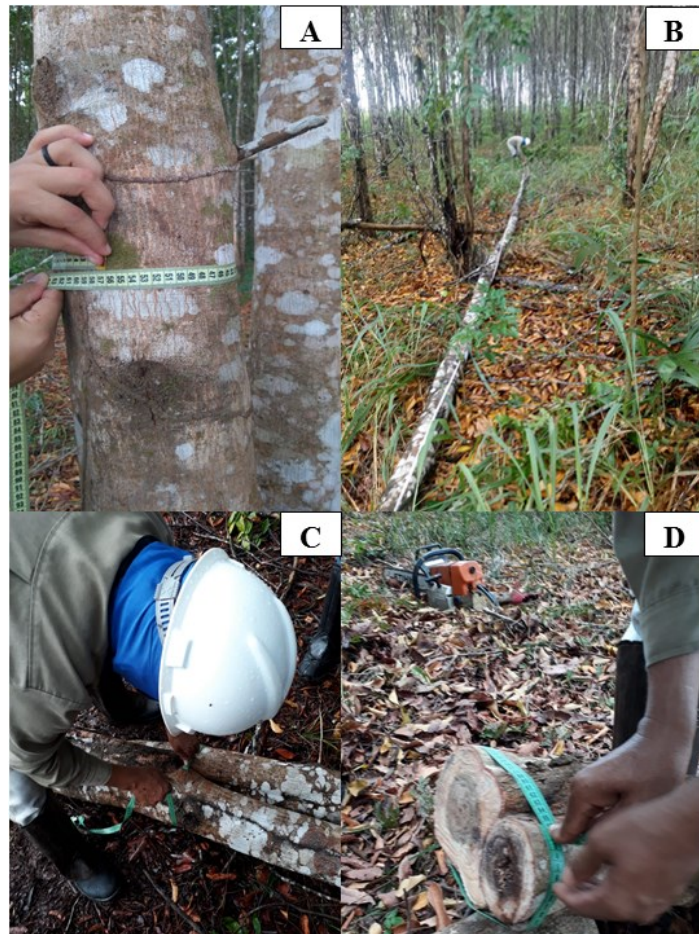


Figura 6. Sequência da cubagem rigorosa: mensuração do CAP (1,30 m) (A), da HT e HC (m) (B) e das circunferências nas posições da seção do fuste (C e D) de *T. vulgaris* em um plantio experimental aos 8 e 9 anos de idade. Fonte: O autor.

Uma vez cubadas, foi realizada a estimativa do volume comercial individual com casca (m³) de cada árvore, onde foram testados modelos volumétricos, sendo que para as árvores bifurcadas duas situações foram consideradas: 1) cada fuste como uma árvore e 2) o diâmetro equivalente (DAP_{eq}) para árvores bifurcadas, tendo os resultados indicado que a utilização do DAP_{eq} é mais adequada para o plantio de *T. vulgaris*. A partir daí, o modelo volumétrico de Schumacher e Hall foi ajustado para a estimativa do volume comercial com casca, por espaçamento e idade (Equação 2).

$$\text{VCC (m}^3 \text{ árv.)} = e[-9,143 + 1,91 \cdot \text{Ln}(\text{DAP}_{\text{eq}}) + 0,744 \cdot \text{Ln}(\text{HT})] \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: VCC é o volume comercial com casca estimado para a árvore da parcela, DAP_{eq} é o diâmetro à altura do peito equivalente, HT é a altura total da árvore e Ln é o logaritmo natural.

Após a estimativa do volume comercial individual, o volume total das árvores das parcelas foi obtido extrapolando-se por hectare considerando a área útil das parcelas nos diferentes blocos e espaçamentos de plantio.

5.4. Coleta e amostragem de material biológico

Após a cubagem das árvores, foram retiradas secções transversais (discos) de 5 cm de espessura em seis posições longitudinais do fuste (0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial) (Figura 7A e 8A e 8B) sendo amostrados dois discos por posição longitudinal, tanto nas árvores não bifurcadas quanto nas árvores bifurcadas (Figura 7B).

Os discos foram numerados e armazenados em sala aclimatada (25 °C). Dos dois discos amostrados por posição longitudinal de cada árvore, um foi seccionado em serra circular em quatro cunhas, em esquema de duas opostas (Figura 7D e 8C). Duas cunhas foram destinadas à análise de densidade básica da madeira e as outras duas destinadas às demais análises das propriedades da madeira. O outro disco foi seccionado no sentido transversal (ao meio) (Figura 8C e 8D) do qual apenas uma porção foi utilizada para as análises de densitometria de raios X.

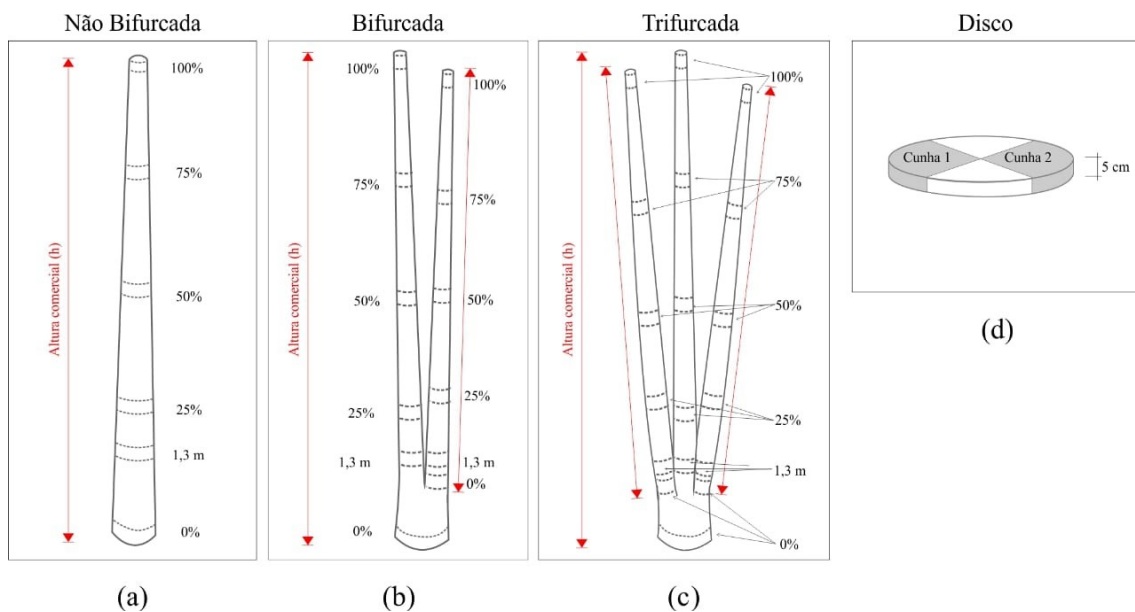


Figura 7. Esquema de amostragem de árvores não bifurcadas (a), bifurcadas (b) e trifurcadas (c) ao longo do fuste e seccionamento dos discos em cunhas (d). Fonte: O autor.



Figura 8. Retirada dos discos ao longo do fuste (A), discos das diferentes posições longitudinais (B), secionamento dos discos em cunhas opostas (C) e discos secionados no sentido transversal (D) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade. Fonte: O autor.

5.5. Avaliação do crescimento

O crescimento do plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade sob diferentes espaçamentos foi avaliado a partir dos dados de mortalidade (%) (Equação 3), área basal (AB) ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) (Equação 4), volume com casca (VCC) ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) (Equação 5), volume sem casca (VSC) ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) (Equação 6), massa seca de madeira (MSM) (t ha^{-1}) (Equação 7), massa seca de carbono (MSC) (t ha^{-1}) (Equação 8), massa de dióxido de carbono equivalente ($\text{MCO}_{2\text{eq}}$) (t ha^{-1}) (Equação 9), incremento médio anual em volume com casca (IMA_{vcc}) ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) (Equação 10), incremento médio anual em volume sem casca (IMA_{vsc}) ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) (Equação 11), incremento médio anual em massa seca de madeira (IMAMS) ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) (Equação 12), incremento médio anual em carbono (IMACarb) ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) (Equação 13), produtividade energética (PE) (GJ ha^{-1}) (Equação 14), produtividade energética em toneladas equivalente de petróleo (PE_{tep}) (tep ha^{-1}) (Equação 15), incremento médio anual energético ($\text{IMA}_{\text{Energ}}$) ($\text{GJ ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) (Equação 16) e incremento médio anual energético em toneladas equivalente de petróleo ($\text{IMA}_{\text{Energ}_{\text{tep}}}$) ($\text{tep ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) (Equação 17).

$$Mt (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n M}{n} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: Mt é a mortalidade total de árvores (%); M é o número de árvores mortas; n é o número total de árvores na parcela (49 árvores).

$$AB = \left(\frac{ABP * 10000}{AP} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: AB é área basal por hectare ($m^2 ha^{-1}$); ABP é a área basal por parcela (m^2 parcela) e AP é a área da parcela (m^2).

$$V_{cc} = \left(\frac{V_{ccP} * 10000}{AP} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: Vcc é o volume com casca por hectare ($m^3 ha^{-1}$); VccP é o volume com casca por parcela (m^3 parcela) e AP é a área da parcela (m^2).

$$V_{sc} = V_{cc} - \left(\frac{V_{cc} * \%casca}{100} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: Vsc é o volume sem casca por hectare ($m^3 ha^{-1}$); Vcc é o volume com casca por hectare ($m^3 ha^{-1}$) e %casca é o percentual de casca.

(Equação 7)

$$MSM = V_{sc} * DB$$

Em que: MSM é a massa seca de madeira por hectare ($t ha^{-1}$); Vsc é o volume sem casca por hectare ($m^3 ha^{-1}$) e DB é a densidade básica da madeira ($t m^3$).

$$MSC = MSM * \left(\frac{C}{100} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que: MSC é a massa seca de carbono por hectare ($t ha^{-1}$); MSM é a massa seca de madeira por hectare ($t ha^{-1}$) e C é o teor de carbono elementar (%).

$$MCO_{2eq} = MSC * \left(\frac{44}{12} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

Em que: MCO_{2eq} é a massa de dióxido de carbono equivalente ($t ha^{-1}$); MSC é a massa seca de carbono por hectare ($t ha^{-1}$); 44 é a massa molar da molécula de CO₂ e 12 é a massa molar da molécula de carbono.

$$IMA_{vcc} = \left(\frac{VCC}{Idade} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

$$\text{IMA}_{\text{VSC}} = \left(\frac{\text{VSC}}{\text{Idade}} \right) \quad (\text{Equação 11})$$

Em que: $\text{IMA}_{\text{VCC}} / \text{IMA}_{\text{VSC}}$ são os incrementos volumétricos médios anuais com e sem casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); VCC / VSC são os volumes com e sem casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) e idade do plantio (8 e 9 anos).

$$\text{IMAMS} = \left(\frac{\text{MSM}}{\text{Idade}} \right) \quad (\text{Equação 12})$$

Em que: IMAMS é o incremento médio anual em massa seca ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); MSM é a massa seca de madeira por hectare (t ha^{-1}) e idade do plantio (8 e 9 anos).

$$\text{IMACarb} = \left(\frac{\text{MSC}}{\text{Idade}} \right) \quad (\text{Equação 13})$$

Em que: IMACarb é o incremento médio anual em carbono ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); MSC é a massa seca de carbono por hectare (t ha^{-1}) e idade do plantio (8 e 9 anos).

$$\text{PE} = \text{MSM} * \text{PCI} \quad (\text{Equação 14})$$

Em que: PE é a produtividade energética da madeira por hectare (GJ ha^{-1}); MSM é a massa seca de madeira por hectare (t ha^{-1}) e PCI é o poder calorífico inferior da madeira (GJ t^{-1}).

$$\text{PE}_{\text{tep}} = \left(\frac{\text{PCI}}{41,84} \right) * \text{MSM} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que: PE_{tep} é a produtividade energética da madeira em toneladas equivalentes de petróleo por hectare (tep ha^{-1}); PCI é o poder calorífico inferior da madeira (MJ kg^{-1}); 41,84 é o poder calorífico inferior do petróleo (MJ/kg); MSM é a massa seca de madeira por hectare (t ha^{-1}).

$$\text{IMA}_{\text{Energ}} = \left(\frac{\text{PE}}{\text{Idade}} \right) \quad (\text{Equação 16})$$

Em que: $\text{IMA}_{\text{Energ}}$ é o incremento médio anual energético ($\text{GJ ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); PE é a produtividade energética da madeira por hectare (GJ ha^{-1}) e idade do plantio (8 e 9 anos).

$$\text{IMA}_{\text{Energ}_{\text{tep}}} = \left(\frac{\text{PE}_{\text{tep}}}{\text{Idade}} \right) \quad (\text{Equação 17})$$

Em que: $\text{IMA}_{\text{Energ}_{\text{tep}}}$ é o incremento médio anual energético em toneladas equivalentes em petróleo ($\text{tep ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); PE_{tep} é a produtividade energética da madeira em toneladas equivalentes de petróleo (tep ha^{-1}) e idade do plantio (8 e 9 anos).

5.6. Determinação da qualidade da madeira

A qualidade da madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade foi avaliada por meio da determinação de parâmetros físicos (densidade básica da madeira, variação radial da densidade relativa aparente da madeira, largura de anel de crescimento, proporção de lenho inicial/lenho tardio, densidade do anel de crescimento, densidade dos lenhos inicial e tardio e relação cerne/alburno), químicos (composição química imediata e elementar) e energéticos (poder calorífico superior e inferior).

5.6.1. Densidade básica da madeira

A determinação da densidade básica da madeira (g cm^{-3}) foi realizada pelo método de imersão em água, conforme descrito na norma NBR 11941-02 (ABNT, 2003). Foram utilizadas duas cunhas opostas provenientes dos discos de cada posição longitudinal do fuste, sendo a densidade básica média de cada árvore calculada a partir da média aritmética das duas cunhas de cada posição longitudinal (Equação 18).

$$D_b = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que: D_b é a densidade básica da madeira (g cm^{-3}); M_s é a massa seca da madeira (g); e V_s é o volume saturado em água (cm^3).

5.6.2. Variação radial da densidade por densitometria de raios X

Conforme exposto na Figura 8D, na seção transversal dos discos do DAP foram demarcadas e cortadas amostras diametraais com dimensão aproximada de 1 cm de largura \times 5 cm de espessura \times comprimento igual ao diâmetro do disco, sendo estas amostras coladas em suporte de madeira para facilitar o corte em serra. A colagem foi realizada de modo que houvesse o alinhamento perpendicular das fibras e vasos perpendiculares em relação à linha de corte. Em seguida, em equipamento de dupla serra circular paralela, as amostras foram cortadas na direção transversal gerando corpos de prova com dimensão final de aproximadamente 1,4 cm de espessura \times 1 cm de largura \times comprimento igual ao diâmetro do disco inicial (Figura 9A). O equipamento de dupla serra não possui precisão suficiente para garantir que a espessura seja homogênea na amostra e entre amostras. Entretanto, a espessura da amostra foi um quesito importante para a avaliação quantitativa das amostras radiografadas e determinação dos valores quantitativos de densidade. Por isso, as amostras passaram por um controle de qualidade e a espessura de cada uma das amostras foi aferida com paquímetro de precisão de duas casas decimais e tomando-se 5

medidas igualmente espaçadas por amostra (Figura 9B). Com esse procedimento foi possível verificar a homogeneidade intra e interamostral. Quando foi verificada variação na espessura, as amostras foram cortadas novamente e passaram pelo controle de qualidade até que atingissem a qualidade adequada.

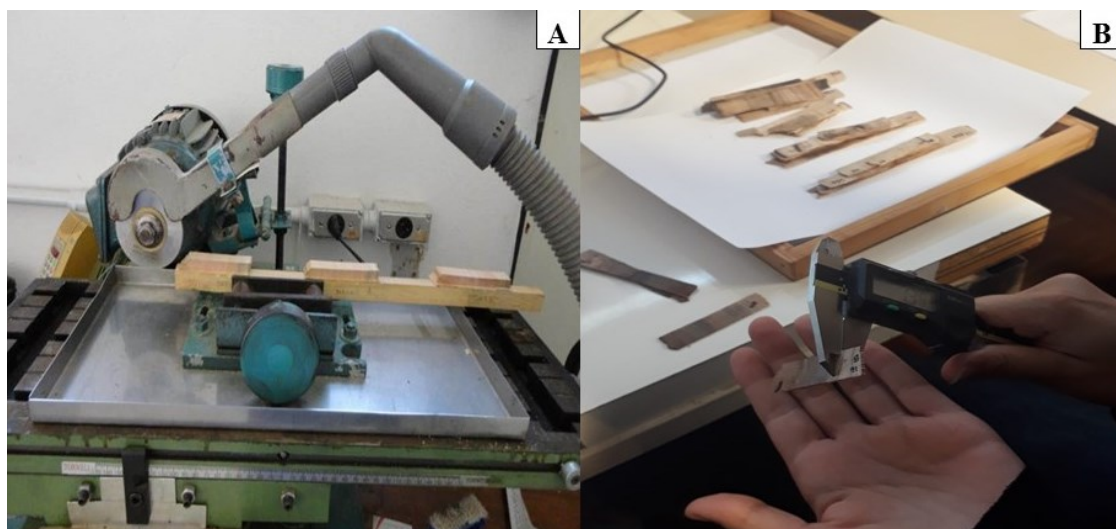


Figura 9. Equipamento de dupla serra circular paralela no Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeira (LAIM/ESALQ/USP) utilizado para a retirada de cortes na direção transversal (A) e mensuração da espessura das amostras com paquímetro de precisão (B) de discos do DAP do lenho.

As seções transversais do lenho foram acondicionadas em câmara de climatização com temperatura e umidade constantes de 20°C e 60%, respectivamente, até que atingissem 12% de umidade (Figura 10A) (TOMAZELLO FILHO, 2008). A necessidade de conhecer a umidade da amostra foi essencial, pois a água presente em cada um dos componentes químicos da madeira é considerada elemento fundamental na precisão da determinação da densidade (QUINTEK MEASUREMENT SYSTEMS - QMS, 1999).

Para obtenção de detalhes dos perfis, as amostras foram analisadas qualitativamente com auxílio do equipamento de raios X digital Faxitron X-ray, modelo LX 60 do LAIM – ESALQ/USP (Figura 10B). As amostras foram dispostas na câmara de irradiação do equipamento (Figura 10C) em tempo de exposição igual a 3 segundos com ajuste automático da potência. O ajuste automático foi escolhido para que mais de uma amostra pudesse ser radiografada ao mesmo tempo e que as micro-variações na espessura das amostras pudessem ser atenuadas. A capacidade de foco do tubo de raios X inferior a 0,02mm, o alto contraste disponível pela baixa potência e a cabine com prateleiras de distâncias precisas em relação à cobertura do feixe, permitem a obtenção de imagens com rapidez e alta precisão para determinação da densidade aparente do lenho (FAXITRON, 2009). Após esta etapa foi obtida uma imagem em escala de cinza. Pela

análise qualitativa, por comparação dos níveis de cinza, foi possível saber quais as regiões mais ou menos densas. Quanto mais próximo do branco, maior a densidade.

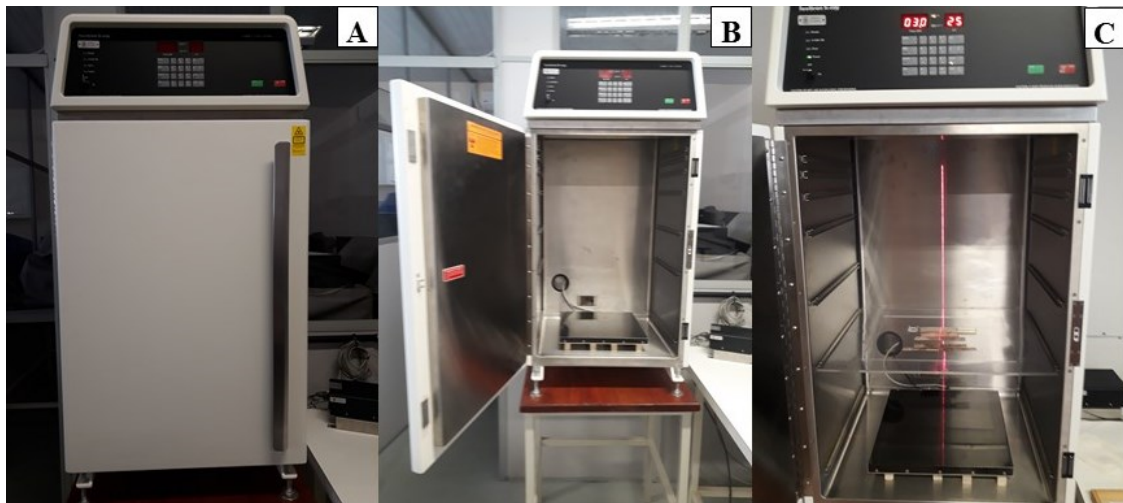


Figura 10. Aparelho de raios X digital Faxitron X-ray, modelo LX 60 no LAIM – ESALQ/USP. Vista geral do equipamento de raios X digital (A); câmara de irradiação com destaque para as prateleiras e o local de saída dos feixes de raios X (B) e amostras dispostas na câmara de irradiação (C).

Para que se pudessem obter informações quantitativas, as amostras foram radiografadas juntamente com dois tipos diferentes de escala (i) uma escala para medida de área (1 cm^2) e (ii) uma escala de acetato de celulose. Em seguida, as imagens radiografadas foram analisadas com auxílio do software WinDendroTM (Regent Instruments Inc.). Esse software permitiu uma análise automatizada para alguns parâmetros de análise de amostras de lenho, tais como (i) determinação do perfil de densidade, (ii) delimitação dos anéis de crescimento, (iii) delimitação da transição entre lenho tardio e lenho inicial, (iv) cálculo da largura dos anéis e (v) cálculo da proporção entre lenho inicial e lenho tardio. Essas análises foram realizadas em função do contraste de densidade calculado automaticamente pelo WinDendroTM que utilizou as escalas como base de cálculo. Entretanto, análises prévias mostraram que, para *T. vulgaris*, assim como para muitas espécies tropicais, essa automatização não é possível em sua totalidade (Figura 11A e B), tendo as delimitações sido realizadas manualmente com base em testes preliminares e, posteriormente, o WinDendroTM realizou os cálculos com base nessas delimitações. Para maximizar a precisão da delimitação dos anéis, utilizou-se como suporte a imagem radiografada e, também, observações paralelas e concomitantes das amostras sob lupa. E, uma vez obtido o perfil de densidade, ele foi utilizado para nova conferência da delimitação dos anéis.

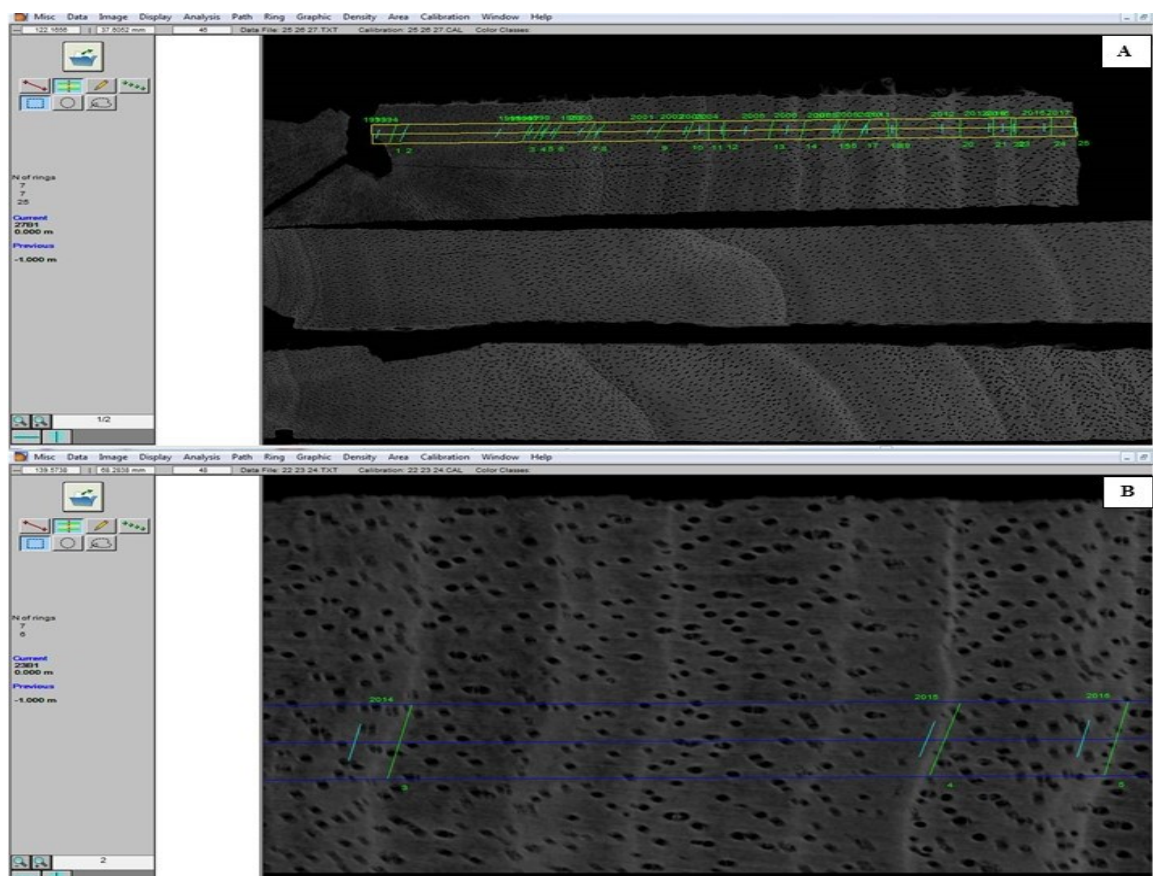


Figura 11. Testes preliminares das análises de amostras do lenho de *T. vulgaris* com auxílio do software WinDendro™ que mostram a delimitação automática dos anéis de crescimento e do lenho inicial (A) e a delimitação manual com elevado grau de precisão (B).

Após delimitação manual dos anéis de crescimento e do lenho inicial, foi possível obter, para cada amostra (i) o perfil de variação radial, (ii) a largura dos anéis de crescimento, (iii) o perfil de variação de densidade intra e interanual, (iv) a proporção entre lenho inicial e lenho tardio, (v) densidades máxima, mínima e média total, por anel de crescimento e por tipo de lenho (inicial e tardio).

5.6.3. Relação cerne/alburno

Para a mensuração da relação cerne/alburno foram utilizados os discos da base e do DAP, dos quais foram mensurados o diâmetro total do disco e diâmetro da região visivelmente conhecida como cerne, com o auxílio de uma régua de 10 mm de precisão, sendo a relação cerne/alburno calculada segundo metodologia de Pereira et al. (2013a) (Equação 19).

$$C/A = \frac{Dc^2}{D^2 - Dc^2} \quad \text{(Equação 19)}$$

Em que: Dc é o diâmetro do cerne (cm); D é o diâmetro do disco sem casca (cm).

Foram determinadas as proporções (%) de cerne e albarno. Para isso, calculou-se a área total do disco e a área do cerne, de acordo com as Equações 20 e 21.

$$AT = \frac{\pi \times (D)^2}{4} \quad (\text{Equação 20})$$

$$AC = \frac{\pi \times (D_c)^2}{4} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que: AT é área total do disco; AC é a área do cerne; D é o diâmetro do disco sem casca (cm); D_c é o diâmetro do cerne (cm).

Em seguida, foram calculadas as porcentagens de cerne considerando-se as áreas total e do cerne dos discos (Equação 22). A porcentagem de albarno foi obtida desconsiderando-se a área do cerne, conforme apresentado na Equação 23.

$$PC = \frac{AC \times 100}{AT} \quad (\text{Equação 22})$$

$$PA = 100 - AC \quad (\text{Equação 23})$$

Em que: PC é a porcentagem de cerne (%); AT é área total do disco; AC é a área do cerne; PA é a porcentagem de albarno (%).

5.6.4. Composição química

As duas cunhas opostas restantes foram utilizadas para a determinação da composição química imediata (teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e elementar [(nitrogênio, carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio e as relações hidrogênio/carbono (H/C) e nitrogênio/carbono (N/C)]. Para isso, foram retiradas amostras (cavacos) das cunhas, que foram moídas em moinho de facas do tipo *willey*, peneiradas e armazenadas em sala aclimatada visando às determinações laboratoriais. As amostras finais foram compostas por cavacos provenientes das cunhas de todas as posições longitudinais, sendo representativas por árvore.

Durante o peneiramento das amostras, a fração que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retida na peneira de 60 *mesh* foi seca em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas antes de ser utilizada para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, que foi realizada de acordo com a norma D1762-84 (ASTM, 2007). Para a

determinação do teor de materiais voláteis, o forno mufla foi aquecido a $950 \pm 5^\circ\text{C}$, sendo considerada a massa inicial da amostra seca em estufa e a massa final da amostra após o aquecimento no forno mufla, enquanto que o teor de cinzas foi determinado em mufla aquecida a $750 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período de seis horas até a completa calcinação.

Para a determinação da composição química elementar foi utilizada a fração que passou pela peneira de 60 *mesh* e ficou retida na peneira de 270 *mesh*, sendo tomadas amostras de 2 mg, previamente secas em estufa de circulação forçada de ar, que foram acondicionadas em cápsulas de estanho e incineradas a 1.200°C em analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube). Em seguida, foram quantificados os teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio e enxofre, todos na base massa seca da madeira. O teor de oxigênio foi obtido por diferença, como expresso na Equação 24.

$$O = 100 - C - H - N - S - Cz \quad (\text{Equação 24})$$

Em que: 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 (%); e Cz é o teor de cinzas (%).

A partir dos teores destes elementos, foram calculadas as relações H/C e N/C, considerando-se a massa atômica desses átomos, conforme apresentado nas Equações 25 e 26, respectivamente.

$$H/C = \frac{\text{Número de átomos de H}}{\text{Número de átomos de C}} = \frac{\%H/1}{\%C/12} \quad (\text{Equação 25})$$

$$N/C = \frac{\text{Número de átomos de N}}{\text{Número de átomos de C}} = \frac{\%N/14}{\%C/12} \quad (\text{Equação 26})$$

5.6.5. Poder calorífico da madeira

O poder calorífico superior (MJ/kg) da madeira foi estimado com base na composição química imediata, segundo a Equação 27 ($r^2=0,93$), proposta por Cordero et al. (2001). O poder calorífico inferior (kJ/kg) foi estimado a partir da Equação 28, segundo a norma EN 14918 (CEN, 2009), na qual é considerando o PCS e o teor de hidrogênio da madeira, sendo então transformado para MJ/kg dividindo o seu valor por 1000.

$$\text{PCS (MJ/kg)} = 0,3543 \cdot \text{CF} + 0,1708 \cdot \text{MV} \quad (\text{Equação 27})$$

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

$$\text{PCI (kJ/kg)} = \text{PCS (kJ/kg)} - 206 \cdot \text{H} \quad (\text{Equação 28})$$

Em que: PCI é o poder calorífico inferior da madeira (kJ/kg); PCS é o poder calorífico superior da madeira (kJ/kg); e H é o teor de hidrogênio da madeira (%).

5.7. Qualidade e produtividade do carvão vegetal

Visando determinar a qualidade do carvão vegetal, foram utilizadas amostras de carvão vegetal produzidas a partir da madeira de *T. vulgaris* coletada em agosto de 2017, com aproximadamente 7 anos de idade. Os parâmetros avaliados foram a densidade relativa aparente (DRA), o consumo específico de madeira (CE) (Equação 29), os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC) (Equação 30), em líquido pirolenhoso (RLP) (Equação 31), e em gases não condensáveis (RGNC) (Equação 32), a composição química imediata, o poder calorífico superior, a produtividade em massa de carvão vegetal (Equação 33) e o incremento médio anual em carvão vegetal (IMACV) (Equação 34).

5.7.1. Processo de carbonização

A carbonização das amostras de madeira de *T. vulgaris* foi realizado em forno elétrico do tipo mufla que possui acoplado à sua estrutura um reator metálico conectado a um condensador resfriado a água, que é acoplado a um frasco coletor de gases condensáveis. Utilizou-se uma quantidade de aproximadamente 600 g de madeira proveniente de 54 árvores amostradas, tendo sido essas amostras previamente secas em estufa a 103 ± 2 °C. A carbonização foi iniciada à temperatura de 100 °C e finalizada à temperatura de 450 °C, com taxa de aquecimento de 100 °C h⁻¹ e estabilização do forno mufla a 450 °C por 30 minutos.

5.7.2. Densidade relativa aparente (DRA)

A DRA do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em água, conforme adaptação da norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

5.7.3. Consumo específico de madeira

O CE (m³ de madeira/ 1 tonelada de carvão vegetal) foi calculado com base na densidade básica da madeira e no RGC.

$$CE = \frac{1}{DB \times \left[\frac{RGC(\%)}{100} \right]} \quad (\text{Equação 29})$$

Em que: CE é o consumo específico de madeira (m³ t⁻¹); DB é a densidade básica da madeira (t m³); e RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

5.7.4. Rendimentos da carbonização

Foram calculados o RGC, RLP e RGNC, sendo o RGC calculado considerando as massas secas de madeira e do carvão vegetal produzido, o RLP calculado a partir das quantidades de líquido condensado no frasco coletor e o RGNC calculado por diferença, conforme apresentado nas Equações 30, 31 e 32.

$$RGC = \left(\frac{M_c}{M_m} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 30})$$

Em que: RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); M_c é a massa seca de carvão vegetal (g); e M_m é a massa de madeira seca (g).

$$RLP = \left(\frac{M_l}{M_m} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 31})$$

Em que: RLP é o rendimento em líquido pirolenhoso (%); M_l é a massa do líquido condensado (g); e M_m é a massa de madeira seca (g).

$$RGNC = 100 - (RGC - RLP) \quad (\text{Equação 32})$$

Em que: RGNC é o rendimento em gases não condensáveis (%); RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); e RLP é o rendimento em líquido pirolenhoso.

5.7.5. Composição química imediata e poder calorífico

Visando à determinação da composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram moídas e peneiradas, classificadas em peneira de 60 *mesh* e, posteriormente, secas em estufa a 103 ± 2 °C, até massa constante, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981a). A determinação dos teores de MV, Cz e CF foi realizada de

acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986). O PCS do carvão vegetal foi estimado com base na Equação 27, de Cordero et al. (2001).

5.7.6. Produtividade em massa de carvão vegetal

A PMCV foi calculada a partir da massa seca de madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, conforme apresentado na Equação 33:

$$PMCV = MSM * \left(\frac{RGC}{100} \right) \quad (\text{Equação 33})$$

Em que: PMCV é a produtividade em massa de carvão vegetal ($t \text{ ha}^{-1}$); MSM é a massa de madeira ($t \text{ ha}^{-1}$); RGC é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%).

5.7.7. Incremento médio anual em carvão vegetal

O IMACV foi calculado por espaçamento de plantio e para cada bloco experimental considerando a massa de carvão vegetal, segundo a Equação 34:

$$IMACV = \left(\frac{MCV}{Idade} \right) \quad (\text{Equação 34})$$

Em que: IMACV é o incremento médio anual em carvão vegetal ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); MSV é a massa de carvão vegetal ($t \text{ ha}^{-1}$) e idade do plantio (7 anos).

5.8. Análises estatísticas

Análises de variância univariadas foram realizadas seguindo o delineamento em blocos casualizados (DBC), disposto em esquema de parcelas subdivididas, no qual os efeitos de parcela e subparcela dependeu das características avaliadas:

1) Crescimento

Efeito do espaçamento de plantio (4,5, 6,0, 7,5, 9,0, 10,5 e 12,0 m^2) em cada idade (8 e 9 anos), ao nível de 5% de significância estatística, com efeito apenas do espaçamento de plantio.

2) Densidade básica da madeira (7 e 8,5 anos de idade)

Os dados de densidade básica da madeira foram testados seguindo 3 arranjos estatísticos diferentes, ao nível de 10% de significância estatística: (i) Espaçamento e tipo de fuste, para as árvores bifurcadas e não bifurcadas, no qual o efeito da parcela foi constituído pelo espaçamento e o da subparcela pelo tipo de fuste; (ii) Espaçamento e idade, para as árvores bifurcadas e (iii) Espaçamento e idade, para as árvores não

bifurcadas, nos quais o efeito da parcela foi constituído pelo espaçamento e o da subparcela pela idade.

3) Densidade relativa aparente por densitometria de raios X

Efeito do espaçamento de plantio e idade/anel e crescimento, ao nível de 5% de significância estatística, no qual o efeito da parcela foi constituído pelo espaçamento e o da subparcela pela idade/anel de crescimento.

4) Relação C/A, composição química e poder calorífico (8,5 anos de idade)

Efeito do espaçamento e tipo de fuste, ao nível de 5% de significância estatística, no qual o efeito da parcela foi constituído pelo espaçamento e o da subparcela pelo tipo de fuste.

5) Qualidade e produtividade do carvão vegetal (7 anos de idade)

Efeito do espaçamento e tipo de fuste, ao nível de 5% de significância estatística, para as características de qualidade e rendimentos gravimétricos da carbonização, e efeito do espaçamento para a produtividade, também à 5% de significância estatística.

Os dados foram testados quanto às hipóteses básicas de independência, homogeneidade de variâncias e normalidade dos resíduos. Para isso foi considerado o nível de 5% de significância para os testes de homogeneidade de variâncias (testes de Bartlett, Levene e Brown-Forsyth), normalidade dos resíduos (teste Shapiro-Wilk) e de autocorrelação dos resíduos (teste de Durbin-Watson).

Em seguida, os dados foram submetidos a análise de variância (ANAVA) para a verificação de significância estatística. Quando verificado efeito estatístico significativo para os fatores quantitativos (espaçamento de plantio e idade/anel de crescimento identificados pela densitometria de raios X) procedeu-se ao ajuste de modelos de regressão linear simples. Todas as análises estatísticas foram efetuadas em Linguagem R versão 3.4.3, pacotes *stats* (R CORE TEAM, 2017), *ExpDes* (FERREIRA et al., 2012), *lmtest* (ZEILEIS e HOTHORN, 2002), *car* (FOX e WEISBERG, 2011) e *HH* (HEIBERGER e ROBBINS, 2014).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Mortalidade, crescimento e produtividade

O teste F ($p < 0,05$) revelou efeito significativo do espaçamento de plantio sobre a mortalidade de árvores, aos 8 e 9 anos de idade (Tabela 3). Verificou-se tendência de redução da mortalidade para os espaçamentos mais amplos, conforme verificado pela

equação do modelo quadrático ($R^2=0,99$, $F_c=14,74$ e $p=0,00024$, aos 8 anos, e $R^2=0,97$, $F_c=28,54$ e $p=0,00001$, aos 9 anos) (Figura 12A e 12B).

Tabela 3. Resumo da análise de variância para a mortalidade de árvores (%) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

Fonte de Variação	GL	8 anos			9 anos		
		QM	Fc	Pr (>Fc)	QM	Fc	Pr (>Fc)
Espaçamento	5	375,8	14,739	0,00024***	402,86	28,543	0,00001***
Bloco	2	168,29	6,6004	0,01488*	201,61	14,284	0,00117*
Resíduo	10	25,5			14,11		
Total	17						

Cve

	12,6	18,71
--	------	-------

GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; Fc: F calculado; Pr (>Fc): *p* valor; CVe: coeficiente de variação experimental; *significância estatística ao nível de 5% de probabilidade, ***significância estatística ao nível de 1% de probabilidade.

Para a idade de 8 anos, os valores de mortalidade variaram de 14 a 43%, com menor valor no espaçamento de 12,0 m² (14%) e os maiores nos espaçamentos de 4,5 m² e 6,0 m² (43 e 35%, respectivamente), o que corresponde a aumentos de 215% e 160%, respectivamente, quando comparado ao espaçamento de 12,0 m² (Figura 12A). Já para a idade de 9 anos, a variação na mortalidade de árvores foi de 16 a 44%, com menor valor no espaçamento de 12,0 m² (16%) e os maiores nos espaçamentos de 4,5 m² e 6,0 m² (44 e 38%, respectivamente), o que corresponde a aumentos de 183% e 143%, respectivamente, quando comparado ao espaçamento de 12,0 m² (Figura 12B). A densidade populacional (árv. ha⁻¹) real de cada espaçamento de plantio afetada pela mortalidade pode ser verificada na Tabela 4.

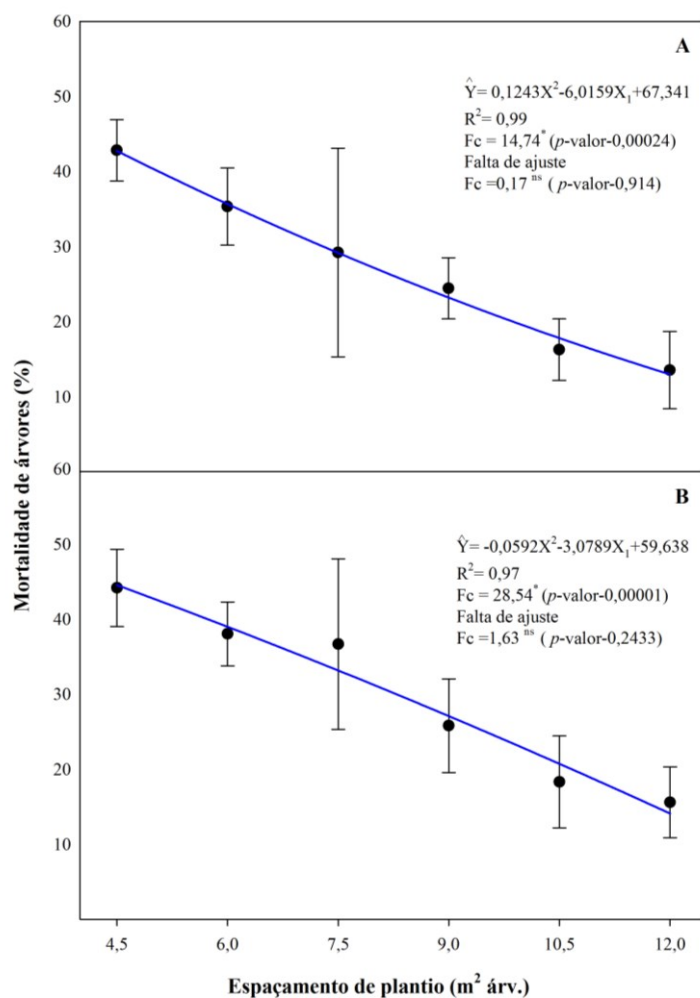


Figura 12. Mortalidade de árvores (%) em função do espaçamento de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 (A) e 9 anos de idade (B).

Tabela 4. Densidade populacional inicial e real após a mortalidade de árvores (%) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

Espaçamento de plantio (m ²)	Densidade populacional inicial (árv. ha ⁻¹)	Densidade populacional real (árv. ha ⁻¹)	
		8 anos	9 anos
4,5	2222	1270	1240
6,0	1667	1077	1032
7,5	1333	943	844
9,0	1111	839	824
10,5	952	797	777
12,0	833	720	703

A tendência de maior mortalidade de árvores de *T. vulgaris* nos espaçamentos mais reduzidos indica alta competição interespecífica por luminosidade, água e nutrientes (SCHWERZ et al., 2020). Em espaçamentos mais reduzidos, a alta densidade populacional reduz a captação e utilização de luminosidade, afetando a absorção de água e utilização de nutrientes, com conseqüente redução do crescimento e aumento da

mortalidade, levando ao autodesbaste nestes espaçamentos (SCHNEIDER et al., 2015). Narducci et al. (2016), estudando o crescimento e sobrevivência de *T. vulgaris* cultivado em três diferentes espaçamentos, reportaram taxas de sobrevivência de 78% no maior espaçamento (4,0 x 4,0 m) e de 52% no menor espaçamento (4,0 x 2,0 m), corroborando com a tendência de redução da mortalidade da espécie nos espaçamentos mais amplos.

O teste F ($p < 0,05$) revelou ausência de efeito significativo do espaçamento de plantio sobre a AB, VCC e VSC, para as idades de 8 e 9 anos (Tabela 5). Os valores médios da AB foram de 19 e 21%, aos 8 e 9 anos de idade, respectivamente (Figura 13A). Apesar de não haver efeito significativo do espaçamento de plantio, o maior valor de AB foi encontrado no espaçamento mais reduzido (4,5 m²). Este resultado é esperado devido à maior densidade de indivíduos por hectare encontrado nos espaçamentos mais reduzidos (PAUMGARTTEN et al., 2018). Resultado semelhante foi encontrado por Akers et al. (2013) em plantio de *Pinus taeda* estabelecido sob seis diferentes densidades de plantio (740 a 4480 árv ha⁻¹), sendo verificados valores de 31 e 46,8 m² ha⁻¹, respectivamente, na menor e maior densidade de plantio.

Tabela 5. Resumo da análise de variância para as variáveis de crescimento e produtividade de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

Variável	8 anos			9 anos		
	Espaçamento			Espaçamento		
	QM	Fc	Pr(>Fc)	QM	Fc	Pr(>Fc)
Área basal (m ² ha ⁻¹)	305,17	0,5248	0,75296 ^{ns}	5,1627	0,7394	0,61114 ^{ns}
Volume com casca (m ³ ha ⁻¹)	387,1	0,689	0,64304 ^{ns}	722,78	1,1856	0,38146 ^{ns}
Volume sem casca (m ³ ha ⁻¹)	357,74	0,8061	0,5706 ^{ns}	616,31	1,2888	0,34165 ^{ns}
Massa seca de madeira (t ha ⁻¹)	60,89	0,8506	0,54471 ^{ns}	157,54	1,4769	0,280004 ^{ns}
Massa seca de carbono (t ha ⁻¹)	15,141	0,8593	0,53976 ^{ns}	42,216	1,6753	0,227793 ^{ns}
Massa de CO ² equivalente (t ha ⁻¹)	203,67	0,86	0,53936 ^{ns}	567,6	1,6749	0,227885 ^{ns}
IMA com casca (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	664,9	0,689	0,64303 ^{ns}	9,743	1,1867	0,38101 ^{ns}
IMA sem casca (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	614,5	0,8061	0,57061 ^{ns}	8,303	1,2894	0,34146 ^{ns}
IMA em massa seca (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	104,58	0,8504	0,54481 ^{ns}	2,1257	1,4821	0,27845 ^{ns}
IMA em carbono (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	26,012	0,8595	0,53965 ^{ns}	0,5682	1,6752	0,227815 ^{ns}
Produtividade energética (GJ ha ⁻¹)	24374	1,1534	0,39483 ^{ns}	58970	1,4053	0,301929 ^{ns}
Produtividade energética (tep ha ⁻¹)	33,71	1,4031	0,30265 ^{ns}	33,71	1,4031	0,302650 ^{ns}
IMA em energia (GJ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	419	1,153	0,39483 ^{ns}	793,56	1,4053	0,30194 ^{ns}
IMA em energia (tep ha ⁻¹ ano ⁻¹)	0,45332	1,4053	0,301942 ^{ns}	0,45332	1,4053	0,301942 ^{ns}

QM: quadrado médio; Fc: F calculado; Pr (>Fc): p valor; ^{ns}não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Para o VCC, os valores médios, aos 8 e 9 anos de idade, foram de 168 e 195%, respectivamente (Figura 13B). Valores médios de 147 e 175%, aos 8 e 9 anos de idade, respectivamente, foram encontrados para o VSC (Figura 13C). A exemplo da AB, o

espaçamento de 4,5 m² produziu maior VCC e VSC, o que se explica pelo fato de o volume ser uma variável altamente relacionada à sobrevivência, crescimento em altura e diâmetro, resultando em maior produção volumétrica em decorrência do maior número de indivíduos nos espaçamentos mais adensados, onde, provavelmente, a eficiência de aproveitamento de luz, água e nutrientes é maior em resposta à maior competição interespecífica induzida pela alta densidade populacional (HARRINGTON et al., 2009; MOULIN et al., 2017a). Em um plantio de *Tectona grandis* aos 11 e 16 anos de idade estabelecido em quatro espaçamentos (3 x 2, 4 x 2, 5 x 2 e 6 x 2 m), em Cáceres-MT, os maiores valores de volume também foram encontrados no espaçamento mais adensado (93 e 118 m³ ha⁻¹, aos 11 e 16 anos de idade, respectivamente) (SILVA et al., 2016b).

É importante destacar que a ausência de significância estatística para as três variáveis mencionadas acima se apresenta como um resultado interessante do ponto de vista silvicultural/econômico, uma vez que, para fins de estabelecimento de plantios homogêneos de *T. vulgaris*, pode-se optar por espaçamentos mais amplos, visto que os mesmos produzirão valores semelhantes aos produzidos pelos espaçamentos mais adensados, além de exigirem um menor número de indivíduos por unidade de área devido à menor densidade populacional.

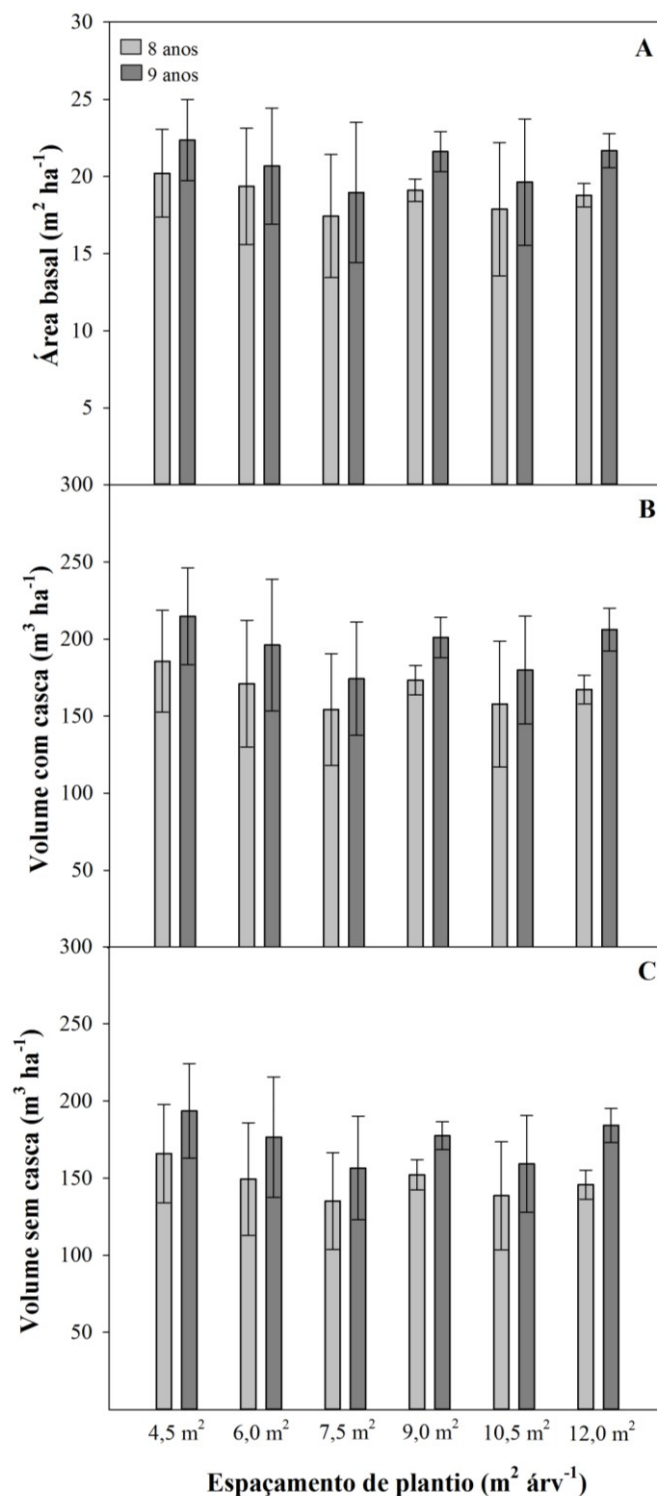


Figura 13. Área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) e volume com casca e volume sem casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

O teste F ($p < 0,05$) não encontrou efeito significativo do espaçamento de plantio sobre a MSM, MSC e $\text{MCO}_{2\text{eq}}$, para as idades de 8 e 9 anos (Tabela 5). Os valores médios de MSM, MSC e $\text{MCO}_{2\text{eq}}$, foram de 73 e 93 t ha^{-1} , 36 e 47 t ha^{-1} e 133 e 172 t ha^{-1} , aos 8 e 9 anos de idade, respectivamente (Figura 14A, B e C). MSM é uma variável de crescimento obtida pelo volume sem casca e densidade básica da madeira, refletindo a

capacidade da planta em converter o CO₂ atmosférico absorvido na forma de matéria sólida de madeira alocada no fuste (SILVA et al., 2019a). É considerada uma característica importantíssima para as estimativas de produtividade de madeira por material genético e área, sendo comumente utilizada na tomada de decisões pelas empresas do setor florestal para a seleção de materiais genéticos superiores (TRUGILHO, 2009). Além disso, quanto maior a produção de massa seca de madeira, maior a quantidade de energia fornecida pela madeira durante o processo de carbonização, com consequente aumento na produtividade de carvão vegetal (TRUGILHO et al., 2015).

Os valores de MSM verificados para o *T. vulgaris* estão próximos aos encontrados para a madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos de idade plantado com diferentes doses de nitrogênio para a produção de carvão vegetal, no qual foram registrados valores variando de 95 a 120 t ha⁻¹ (ASSIS et al., 2018), e aos encontrados para clones de *Eucalyptus* spp., aos 6,8 anos de idade, que apresentaram valores de 96, 107, 77, 75, 86, 80, 117 e 159 t ha⁻¹, respectivamente (PROTÁSIO et al., 2017).

Apesar de não haver diferenças significativas entre os espaçamentos para os valores de MSC, observa-se que os maiores valores foram encontrados nos espaçamentos que também apresentaram maiores valores de MSM, evidenciando a forte influência dos maiores incrementos de madeira sobre o estoque de carbono. Os valores de MSC encontrados na madeira de *T. vulgaris* são superiores aos encontrados para a madeira de três clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos de idade, que variaram de 7 a 11 t ha⁻¹, em duas regiões do estado de Minas Gerais (SANTOS et al., 2012).

Os maiores valores de MSC encontrados para a madeira de *T. vulgaris* em comparação à madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* podem estar relacionados à alta eficiência de uso do carbono desta espécie, como resultado da alta performance fotoquímica e capacidade fotossintética de conversão do carbono na forma de massa seca. Esse comportamento é positivamente correlacionado aos parâmetros de altura e diâmetro, tendo o *T. vulgaris* apresentado taxa de crescimento três vezes maior que outras setes espécies nativas (pioneiras e não pioneiras) plantadas em uma mesma área degradada na Amazônia Central (GUIMARÃES et al., 2018), revelando a importância da eficiência de uso de carbono para o incremento em MSC e consequente crescimento em altura e diâmetro, podendo esta variável ser utilizada como parâmetro de seleção de materiais genético visando ganhos em crescimento.

MCO_{2eq} é uma variável de equivalência energética que expressa a quantidade de toneladas de CO₂ que deixam de ser emitidas para a atmosfera através do uso energético

de 1 tonelada de madeira (IPCC, 2003). Em outras palavras, a utilização energética da madeira de *T. vulgaris* proporciona mitigações de 122 a 186 t ha⁻¹ de CO₂ que seriam emitidos na atmosfera, revelando a importância da utilização de produtos à base de biomassa para a redução das emissões de gases poluentes. Além disso, a utilização da madeira de reflorestamentos para fins energéticos proporciona diversas vantagens do ponto de vista ambiental por realizar a remoção e estoque de carbono na madeira, equilibrando o ciclo de CO₂ atmosférico (GENG et al., 2017). Por este motivo, o uso da madeira em sistemas energéticos é considerado neutro do ponto de vista das emissões atmosféricas de gases de efeito estufa e, portanto, incentivado (SEPPÄLÄ et al., 2019).

A ausência de efeito significativo do espaçamento de plantio sugere a possibilidade de utilização de espaçamentos mais amplos, que resultarão em valores de MSM, MSC e MCO_{2eq} igualmente satisfatórios, quando comparado a espaçamentos mais adensados, e com menor número de indivíduos a serem plantados por unidade de área, gerando redução de custos de implantação, manejo e colheita dos povoamentos de *T. vulgaris*.

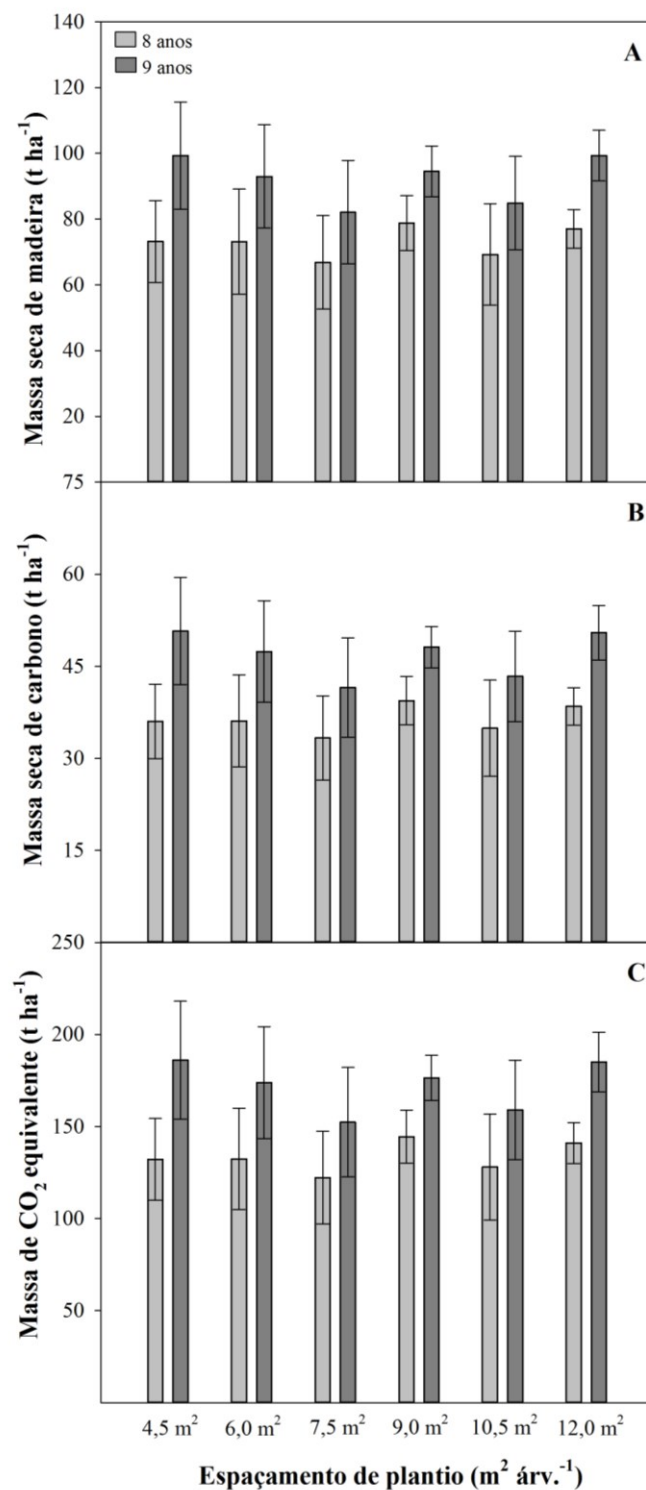


Figura 14. Massa seca de madeira ($t\ ha^{-1}$), massa seca de carbono ($t\ ha^{-1}$) e massa de dióxido de carbono equivalente ($t\ ha^{-1}$) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

O teste F ($p < 0,05$) não encontrou significância estatística para o espaçamento de plantio sobre o IMA_{vcc} , IMA_{vsc} , $IMAMS$ e $IMACarb$, para as idades de 8 e 9 anos (Tabela 5). Os valores médios de IMA_{vcc} , IMA_{vsc} , $IMAMS$ e $IMACarb$ foram de 22 e 23 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, 19 e 20 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, 10 e 11 $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ e 5 e 6 $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ (Figura 15A, B, C e D),

aos 8 e 9 anos de idade, respectivamente. Os valores de IMA_{vcc} e IMA_{vsc} não apresentaram diferenças significativas entre os espaçamentos de plantio, apesar de haver tendência de variações estatísticas significativas para espaçamentos menores. A ausência de significância estatística está relacionada ao comportamento similar do VCC e VSC entre os espaçamentos, ambas variáveis utilizadas nos cálculos dos incrementos volumétricos. Resultado similar foi reportado por Venturin et al. (2014) em plantio de *Acrocarpus fraxinifolius* aos 6 anos de idade estabelecido em 4 espaçamentos diferentes (1,5 x 3,0, 2,0 x 3,0, 2,5 x 3,0 e 3,0 x 3,0 m), em Lavras-MG.

Apesar da ausência de variações significativas entre os espaçamentos, é importante destacar que os IMA_{vcc} e IMA_{vsc} de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade variaram de 18 a 25 $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$, valores superiores aos encontrados para *Pinus taeda* (11 $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$, aos 7 anos de idade) (LIMA et al., 2013), *Acacia mangium* (23 $m^3 ha$ ano, aos 5,6 anos de idade) (TONINI et al., 2018b) e clones de *Eucalyptus urophylla* (18 $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$, aos 12 meses de idade) e *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* (10 $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$, aos 12 meses de idade) (LOPES et al., 2017), espécies amplamente utilizadas em reflorestamentos comerciais, revelando o potencial silvicultural de plantios de *T. vulgaris* para fins energéticos, uma vez que os incrementos volumétricos têm reflexos positivos sobre a produtividade de madeira e, conseqüentemente, do carvão vegetal (SEREGHETTI et al., 2015). Além disso, destaca-se a importância da condução de plantios experimentais que testem procedências com foco no estudo das características de crescimento para a seleção de materiais genéticos de alta produtividade volumétrica e, conseqüentemente, melhor desempenho silvicultural e energético da espécie.

Mesmo que não tenham sido verificadas diferenças significativas entre os espaçamentos de plantio para IMAMS e IMACarb, os valores encontrados para ambas as variáveis são superiores ao encontrados para a madeira do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* que registrou valores de 4 t $ha^{-1} ano^{-1}$, para o IMAMS, e de 2 t $ha^{-1} ano^{-1}$, para o IMACarb (TORRES et al., 2016). Esses resultados corroboram o potencial de plantios de *T. vulgaris* baseado no IMAMS e IMACarb como parâmetros de crescimento e qualidade da madeira para fins energéticos.

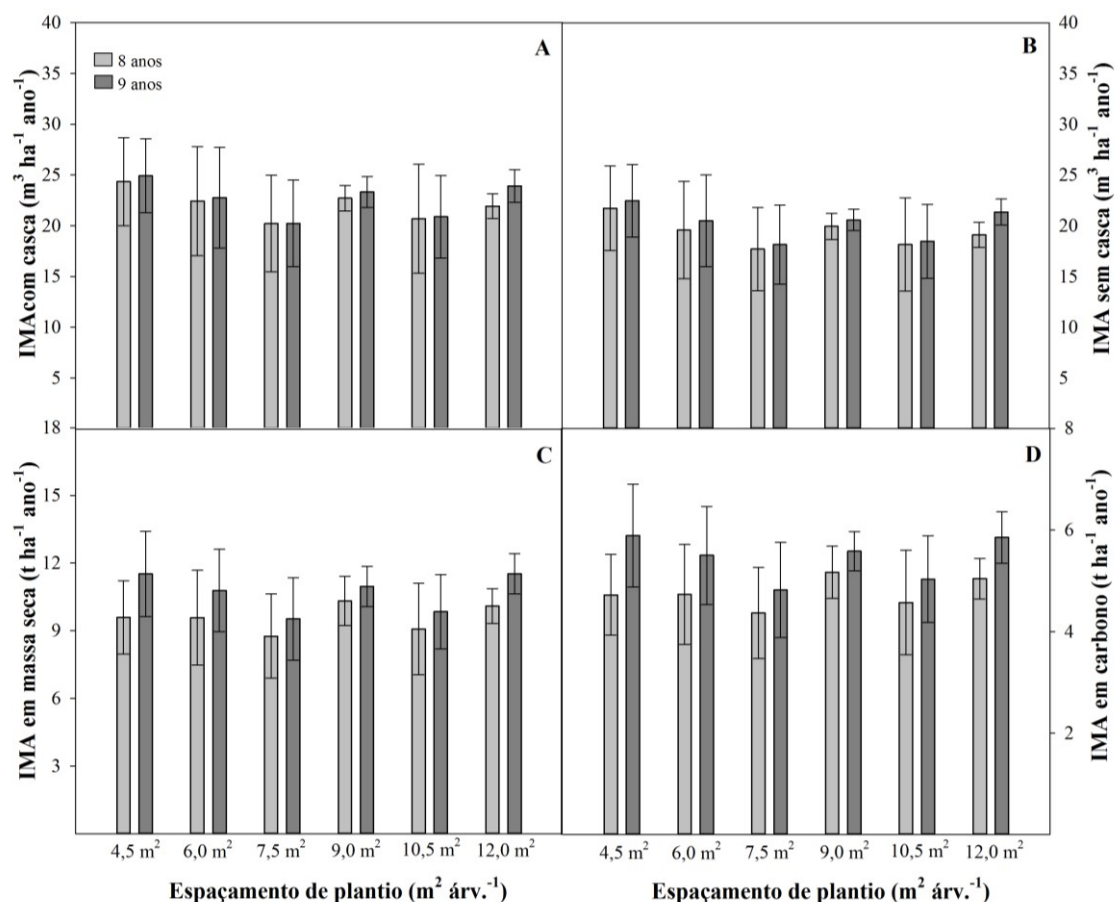


Figura 15. Incremento médio anual em volume com e sem casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), incremento médio anual em massa seca ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e incremento médio anual em carbono ($\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

O teste F ($p < 0,05$) não encontrou significância estatística para o espaçamento de plantio sobre a PE, PE_{tep} , IMAEnerg e $IMA\text{Energ}_{\text{tep}}$ para as idades de 8 e 9 anos (Tabela 5). Os valores médios de PE, PE_{tep} , IMAEnerg e $IMA\text{Energ}_{\text{tep}}$ foram de 1.346 e 1.774 GJ ha^{-1} , 32 e 42 tep ha^{-1} , 176 e 205 GJ $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ e 4 e 5 tep $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, aos 8 e 9 anos de idade, respectivamente (Figura 16A, B, C e D). A ausência de efeito significativo do espaçamento de plantio sobre as propriedades energéticas da madeira de *T. vulgaris* pode indicar que o espaçamento de plantio é uma característica de pouca influência nas idades de 8 e 9 anos, podendo estas propriedades serem mais influenciadas por fatores como herança genética, idade de colheita, fertilidade do solo, condições climáticas, textura e pH do solo, dentre outros (PÉREZ et al., 2014).

A produtividade energética representa a quantidade de energia armazenada em 1 t de madeira seca, enquanto que a produtividade energética em toneladas equivalente de petróleo é uma variável de conversão energética que expressa quantas toneladas de petróleo há em uma tonelada seca de madeira (PATUSCO, 1998), indicando que o uso energético de 1 t seca de madeira de *T. vulgaris* equivale ao uso de 29 a 46 tep. Mesmo com essa considerável variação na produtividade energética, os espaçamentos não

apresentaram efeito significativo, o que pode estar relacionado à ampla variabilidade genética do plantio de origem seminal.

A PE da madeira do *T. vulgaris* é muito menor quando comparada aos valores registrados na literatura para a madeira de outras espécies utilizadas em reflorestamentos para fins energéticos, como a madeira de *A. mangium* e *A. auriculiformis* aos 9 anos de idade plantadas sob o espaçamento de 3,0 x 2,0 m, no estado do Amazonas, onde foram verificados valores de PE de 5.514 e 2.863 GJ ha⁻¹, respectivamente, e de 611 e 360 GJ ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, para o IMAEnerg (COSTA et al., 2015). Valores de IMAEnerg de 481, 464 e 433 GJ ha⁻¹ ano⁻¹ foram encontrados para a madeira de três materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* (BRUN et al., 2018).

Comparativamente, os valores de PE_{tep} são quase três vezes superiores aos encontrados para a madeira de *Acacia mangium* aos 5,6 anos de idade nos quais foram encontrados valores variando de 12 a 18 t ha⁻¹ (TONINI et al., 2018b). A seleção genética do tachi-branco deve considerar a produtividade, pois a variabilidade genética é alta, além da mortalidade ter resultado na diminuição da densidade populacional de árvores entre os espaçamentos mais adensados, refletindo no volume, massa e produtividades por hectare.

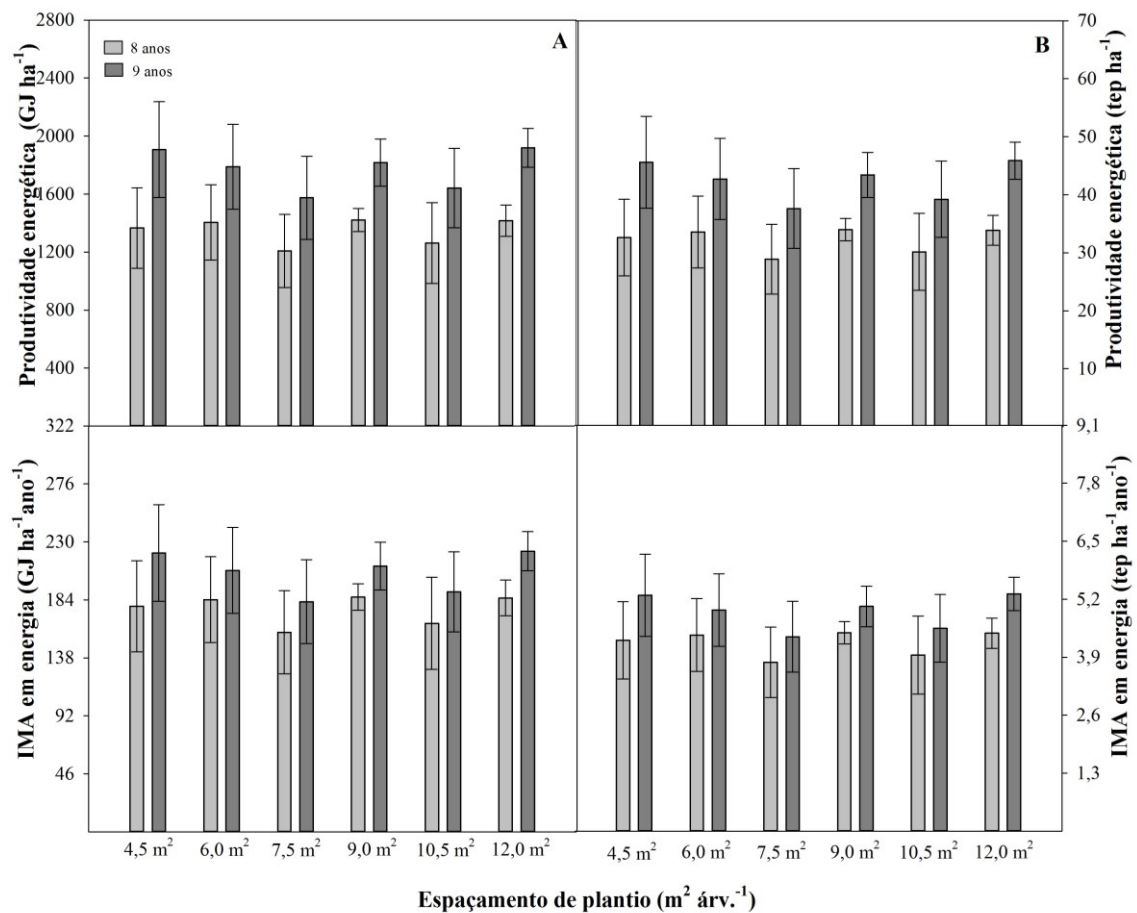


Figura 16. Produtividade energética (GJ ha^{-1}), produtividade energética em toneladas equivalentes de petróleo (tep ha^{-1}), incremento médio anual em energia ($\text{GJ ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e incremento médio anual em toneladas equivalentes de petróleo ($\text{tep ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8 e 9 anos de idade.

6.2. Variação da densidade básica da madeira

O teste F ($p < 0,10$) revelou efeito significativo do espaçamento de plantio e tipo de fuste sobre a densidade básica, ao nível de 10% de probabilidade, aos 7 anos de idade. A análise de variância revelou independência entre os fatores, sem efeito de interação. Verificou-se relação positiva do espaçamento de plantio com a densidade básica, com uma tendência de aumento nos espaçamentos mais amplos, exceto para o espaçamento de $10,5 \text{ m}^2$, verificada pela equação do modelo linear ($R^2=0,74$, $F_c=11,71$ e $p=0,0065$) (Figura 17).

Os valores variaram de $0,443 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,529 \text{ g cm}^{-3}$, com menor valor no espaçamento de $4,5 \text{ m}^2$ ($0,443 \text{ g cm}^{-3}$) e os maiores nos espaçamentos de $9,0 \text{ m}^2$ e $12,0 \text{ m}^2$ ($0,517 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,529 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente), o que corresponde a aumentos de 17% e 19%, respectivamente, quando comparado ao espaçamento de $4,5 \text{ m}^2$ (Figura 17).

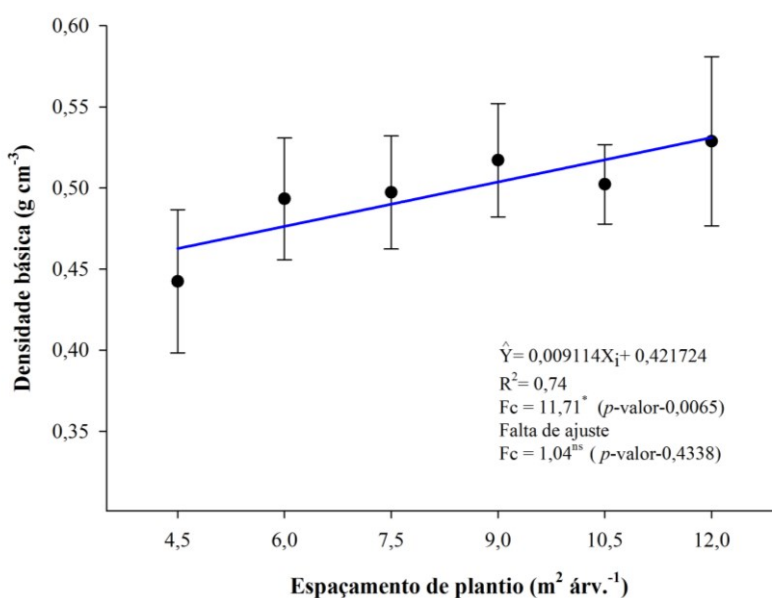


Figura 17. Densidade básica da madeira em função do espaçamento de plantio de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

Uma das explicações prováveis para o aumento da densidade básica da madeira nos espaçamentos mais amplos considera que a menor competição interespecífica nestes espaçamentos leva à formação precoce de lenho tardio, aumentando a proporção de lenho

juvenil/lenho tardio e, conseqüentemente, a densidade básica, quando comparado aos espaçamentos mais adensados (OLIVEIRA et al., 2017).

Adicionalmente, em espaçamentos mais amplos a menor competição por luminosidade melhora a interceptação, distribuição e captura de luminosidade em resposta aos aumentos na área, ângulo e orientação foliar causados pela maior área vital disponível para o desenvolvimento da copa das árvores (LIU et al., 2016). Como consequência, a eficiência fotossintética é melhorada pelo aumento na fixação de substâncias fotoassimiladas, assim como a absorção e utilização de água e nutrientes (LIU et al., 2011; REN et al., 2017). Durante a formação e desenvolvimento dos elementos anatômicos, o lenho requer uma quantidade considerável de fotoassimilados, tais como polissacarídeos (celulose, hemiceluloses e pectinas) e monossacarídeos (glucose, galactose, manose e xilose), com a finalidade de criar e expandir a parede celular, que é o principal componente regulador da densidade básica da madeira (GORSHKOVA et al., 2005; YAMAMOTO et al., 2012). Desse modo, a maior disponibilidade de recursos energéticos ao lenho aumenta a expansão da parede celular com conseqüente aumento da densidade básica.

Moulin et al. (2017b), avaliando o efeito combinado do espaçamento de plantio e irrigação sobre dois clones de *Eucalyptus* de diferentes idades, (*E. grandis* com 1 ano de idade x *E. urophylla* e *E. grandis* com 7 anos de idade e *E. grandis* x *E. camaldulensis*), encontraram valores de densidade básica de 0,556 g⁻³ cm e 0,535 g cm⁻³, para os espaçamentos de 9 m² e 1,5 m², respectivamente. Resultados semelhantes foram verificados por Rocha et al. (2016) para a densidade da casca e madeira de clones de *Eucalyptus* plantados em cinco espaçamentos (1,5, 3,0, 4,5, 6,0 e 9,0 m²), que apresentaram densidade básica média de 0,550 g cm⁻³ nos três últimos (cerca de 8% maior aos valores encontrados nas árvores cultivadas no espaçamento de 1,5 m² (0,510 g cm⁻³), confirmando a tendência de aumento da densidade básica da madeira em espaçamentos mais amplos.

Considerando os espaçamentos de maior densidade básica (9,0 m² e 12,0 m²), destaca-se o espaçamento de 12,0 m² por produzir madeira mais densa e exigir menor número de árvores plantadas (0,529 g cm⁻³ e 833 árvores ha⁻¹, respectivamente), quando comparado ao espaçamento de 9,0 m² (0,517 g cm⁻³ e 1.111 árv. ha⁻¹, respectivamente). Igualmente, o espaçamento de 9,0 m² se mostrou o mais adequado na pesquisa de Tonini et al. (2018a), que avaliaram a influência do espaçamento na produção de biomassa em um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 70 meses de idade. Os autores indicaram a escolha do espaçamento de 9,0 m² para plantios comerciais de *T. vulgaris* para fins

energéticos, porque nessa densidade populacional há maior alocação de biomassa por tronco, característica da madeira desejável, e menor número de árvores plantadas, reduzindo os custos de implantação, manejo e colheita.

Para a idade de 8,5 anos, o teste F ($p < 0,10$) revelou não haver efeito significativo do espaçamento de plantio e tipo de fuste sobre a densidade básica, ao nível de 10% de probabilidade. A análise de variância revelou independência entre os fatores estudados. Os valores médios para os espaçamentos variaram de 0,513 a 0,539 g cm^{-3} (Figura 18).

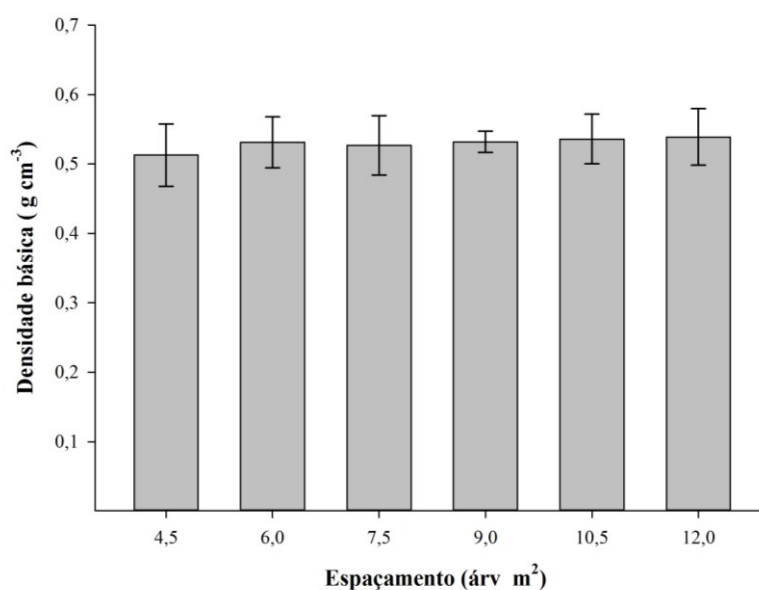


Figura 18. Densidade básica da madeira nos diferentes espaçamentos de plantio de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade.

Comparativamente, a densidade básica da madeira aos 8,5 anos apresenta aumentos de 16, 8, 6, 3, 7 e 2%, respectivamente, para os espaçamentos de 4,5, 6,0, 7,5, 9,0, 10,5 e 12,0 m^2 , em relação à idade de 7 anos. Esse comportamento já é esperado, visto que há uma tendência de aumento da densidade básica da madeira em função do aumento da idade do plantio, o que está relacionado às alterações do meristema cambial e das exigências mecânicas e fisiológicas durante o desenvolvimento do lenho, representado pelo aumento da espessura da parede celular e redução da frequência e número de vasos (SETTE JUNIOR et al., 2012; HÉBERT et al., 2016). Morais et al. (2017), avaliando a influência da idade de colheita (1 a 8 anos) de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* sobre a densidade básica, reportaram aumento da densidade na maior idade de colheita (0,460 a 0,480 g cm^{-3}).

A ausência de significância estatística do espaçamento na densidade da madeira para as árvores aos 8,5 anos de idade pode estar relacionada à redução das variações

físicas e anatômicas do lenho, especialmente devido ao aumento da proporção de madeira adulta. Outra provável explicação está relacionada à menor competição interespecífica nesta idade, com conseqüente menor efeito do espaçamento (PALERMO et al., 2015; DOBNER JUNIOR et al., 2018). Resultado similar foi verificado por Benin et al. (2017) para a madeira de *Eucalyptus benthamii* aos seis anos de idade sob os espaçamentos de 3,0 x 2,0, 3,0 x 3,0, 3,0 x 4,0 e 4,0 x 4,0 m.

Do ponto de vista operacional/econômico, o aumento da densidade e ausência de efeito dos espaçamentos de plantio sobre a densidade básica aos 8,5 anos de idade indicam que é mais viável a colheita do plantio de *T. vulgaris* nesta idade, em comparação à idade de 7 anos, proporcionando ao silvicultor a colheita de madeira mais densa e a possibilidade de escolher espaçamentos mais amplos (reduzindo os custos de implantação, manejo e colheita devido ao menor número de plantas) visando à colheita nesta idade.

Apesar de não haver efeito de interação entre espaçamento de plantio e tipo de fuste, a bifurcação produziu madeira de menor densidade em todos os espaçamentos, aos 7 anos, e exceto para os espaçamentos de 9,0 m² e 12,0 m², aos 8,5 anos de idade. Aos 7 anos de idade, a densidade média para os fustes não bifurcados foi de 0,515 g cm⁻³, variando de 0,449 g cm⁻³ a 0,606 g cm⁻³, enquanto que fustes bifurcados apresentaram valores médios de 0,478 g cm⁻³ e variação de 0,386 g cm⁻³ a 0,584 g cm⁻³, representando um decréscimo médio de 7,18% em relação ao fustes não bifurcados (Figura 19). Para a idade de 8,5 anos de idade, a densidade média para os fustes bifurcados foi de 0,523 g cm⁻³ variando de 0,439 g cm⁻³ a 0,624 g cm⁻³, enquanto que fustes não bifurcados apresentaram valores médios de 0,537 g cm⁻³ e variação de 0,483 g cm⁻³ a 0,602 g cm⁻³, representado um decréscimo médio de 3% em relação ao fustes não bifurcados (Figura 19).

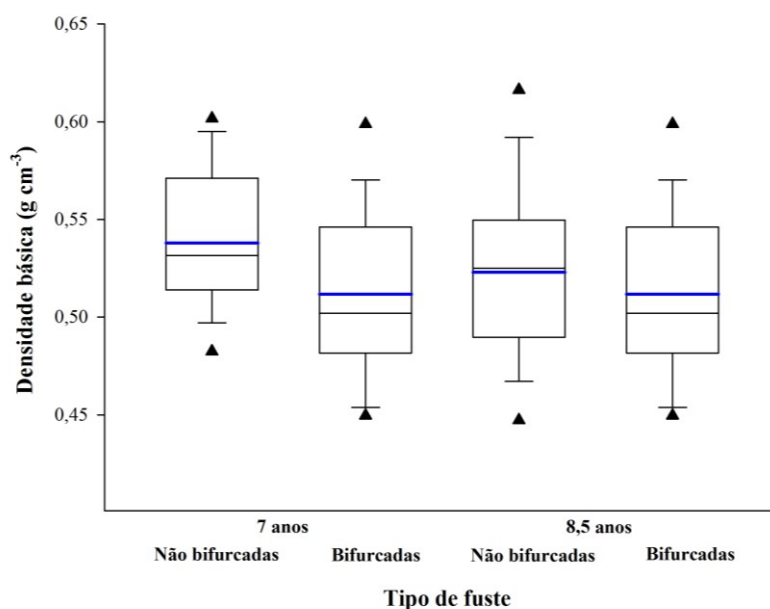


Figura 19. Distribuição dos dados de densidade básica em fustes não bifurcados e bifurcados em um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 e 8,5 anos de idade.

Os fustes bifurcados produziram madeira de menor densidade quando comparados aos fustes não bifurcados, confirmando os efeitos negativos da bifurcação considerados na segunda hipótese. Essa resposta indica que em árvores com mais de um fuste, o desenvolvimento do lenho apresenta comportamento diferenciado, provavelmente associado ao menor investimento de recursos fotoassimilados para a criação e expansão da parede celular, resultando em madeira de menor densidade.

Considerando que árvores bifurcadas são mais suscetíveis a agentes ambientais externos, tais como ventos fortes, por exemplo, acredita-se que o lenho invista mais recursos fotoassimilados no desenvolvimento do caule principal do que no caule secundário como possível estratégia de suporte mecânico da árvore (SLATER; ENNOS, 2013). No geral, as árvores de *T. vulgaris* bifurcam entre 0,5 e 0,7 m de altura, posições muito próximas à base do fuste, onde os valores de densidade básica são mais altos, apontando para uma possível estratégia biomecânica adotada por estas árvores a partir da base do fuste.

Os fustes secundários apresentam uma estratégia adaptativa que permite a formação de camada secundária de tecidos na região de junção entre o caule principal e o caule secundário, garantindo maior suporte mecânico ao caule principal e, conseqüentemente, reduzindo os riscos de queda da árvore (DAHLE; GRABOSKY, 2010). As propriedades de fratura do lenho obtidas em diferentes partes dos caules principal e secundário de *Corylus avellana* apresentaram valores de densidade básica da madeira de $0,660 \text{ g cm}^{-3}$ na base da bifurcação, o que representa um aumento de 25% em

relação à densidade do caule secundário ($0,53 \text{ g cm}^{-3}$). A maior densidade básica na região de junção dos caules explica a redução da densidade básica no caule secundário, o que está muito provavelmente relacionado ao maior investimento em recursos fotoassimilados na base da bifurcação para possibilitar o suporte das árvores (ÖZDEN et al., 2017).

Resultados semelhantes foram encontrados por Goulart et al. (2012), que avaliando a densidade básica de raiz, caule principal e secundário de *Stryphnodendron adstringens*, encontraram valores de $0,468 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,452 \text{ g cm}^{-3}$ para caule principal e secundário, respectivamente. A redução da densidade do caule secundário está relacionada à maior proporção de madeira juvenil em comparação ao caule principal, uma vez que o caule principal tem maior idade cambial por se desenvolver antes do caule secundário, explicando a menor densidade básica nesta região.

Avaliando-se o efeito do espaçamento de plantio e idade sobre as árvores bifurcadas, observou-se que há efeito significativo de ambos sobre a densidade básica da madeira ($p < 0,10$), sem efeito de interação entre os fatores. A densidade básica média das duas idades variou de $0,447$ a $0,526 \text{ g cm}^{-3}$ entre os espaçamentos (Figura 20), enquanto que para o efeito da idade a variação foi de $0,386$ a $0,584 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 21).

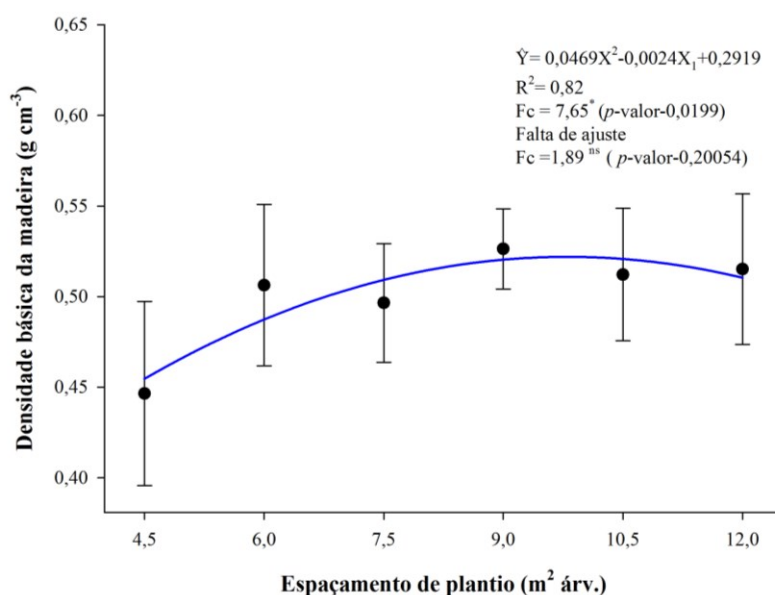


Figura 20. Densidade básica média das duas idades de árvores bifurcadas em função do espaçamento de plantio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

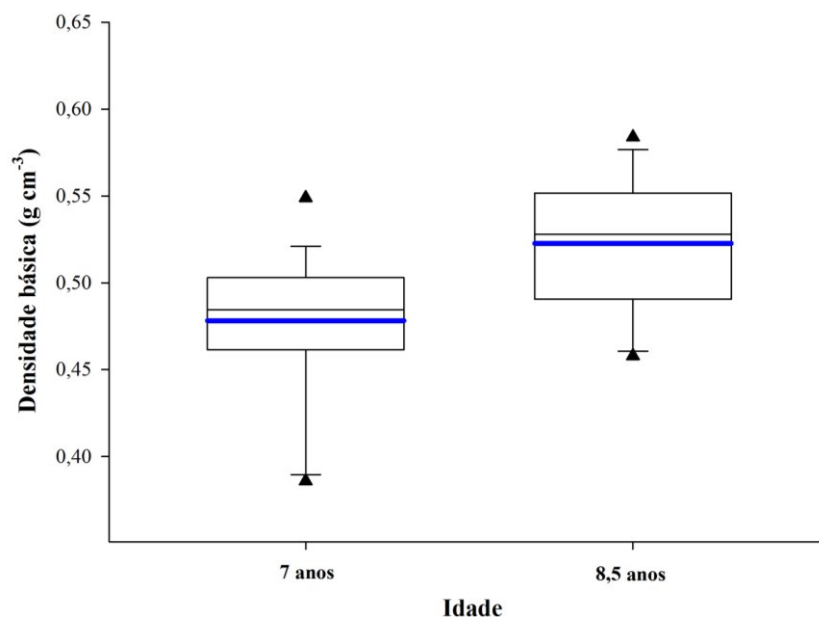


Figura 21. Distribuição dos dados de densidade básica de árvores bifurcadas de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 e 8,5anos de idade.

Para as árvores não bifurcadas, foi observado efeito significativo apenas da idade ($p < 0,10$) sobre a densidade básica da madeira, sem efeito de interação entre os fatores. A densidade básica média das duas idades variou de 0,509 a 0,553 g cm^{-3} entre os espaçamentos (Figura 22), enquanto que para o efeito da idade a variação foi de 0,455 a 0,602 g cm^{-3} (Figura 23).

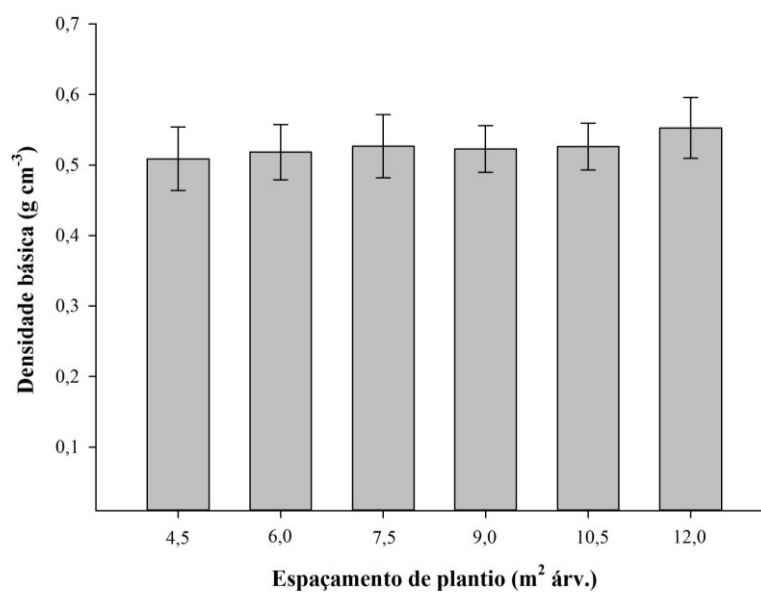


Figura 22. Densidade básica média das duas idades de árvores não bifurcadas nos diferentes espaçamentos de plantio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

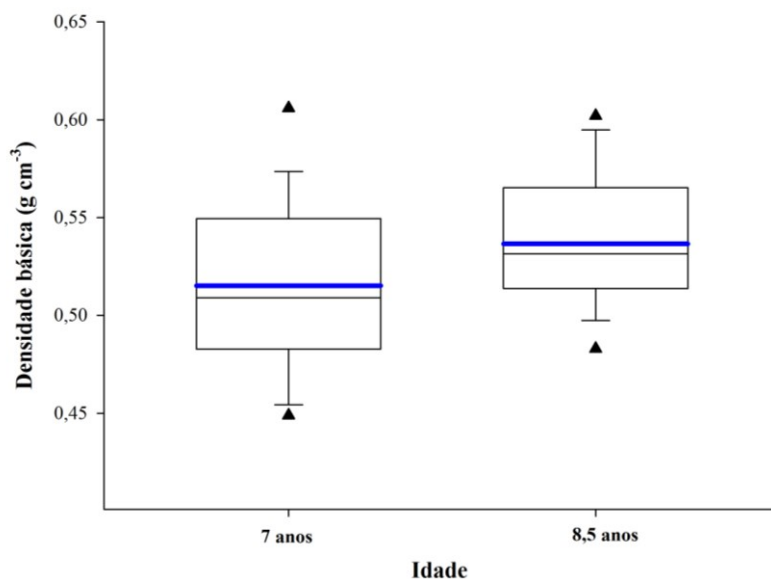


Figura 23. Distribuição dos dados de densidade básica de árvores não bifurcadas de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 e 8,5 anos de idade.

6.3. Variação radial da densidade por densitometria de raios X

O perfil de variação radial da densidade aparente do lenho de árvores de *T. vulgaris* representativas de cada espaçamento de plantio (Figura 24) indicam (i) aumento da densidade do lenho no sentido medula-casca; (ii) diferenciação dos lenhos inicial e tardio à medida que se distancia da medula, com característica de forte variação no lenho inicial e picos dos valores de densidade no lenho tardio; (iii) maior variação da densidade no primeiro anel de crescimento, seguida da estabilização ao longo do perfil densitométrico, sugerindo a formação de anéis mais estreitos à medida que o lenho amadurece.

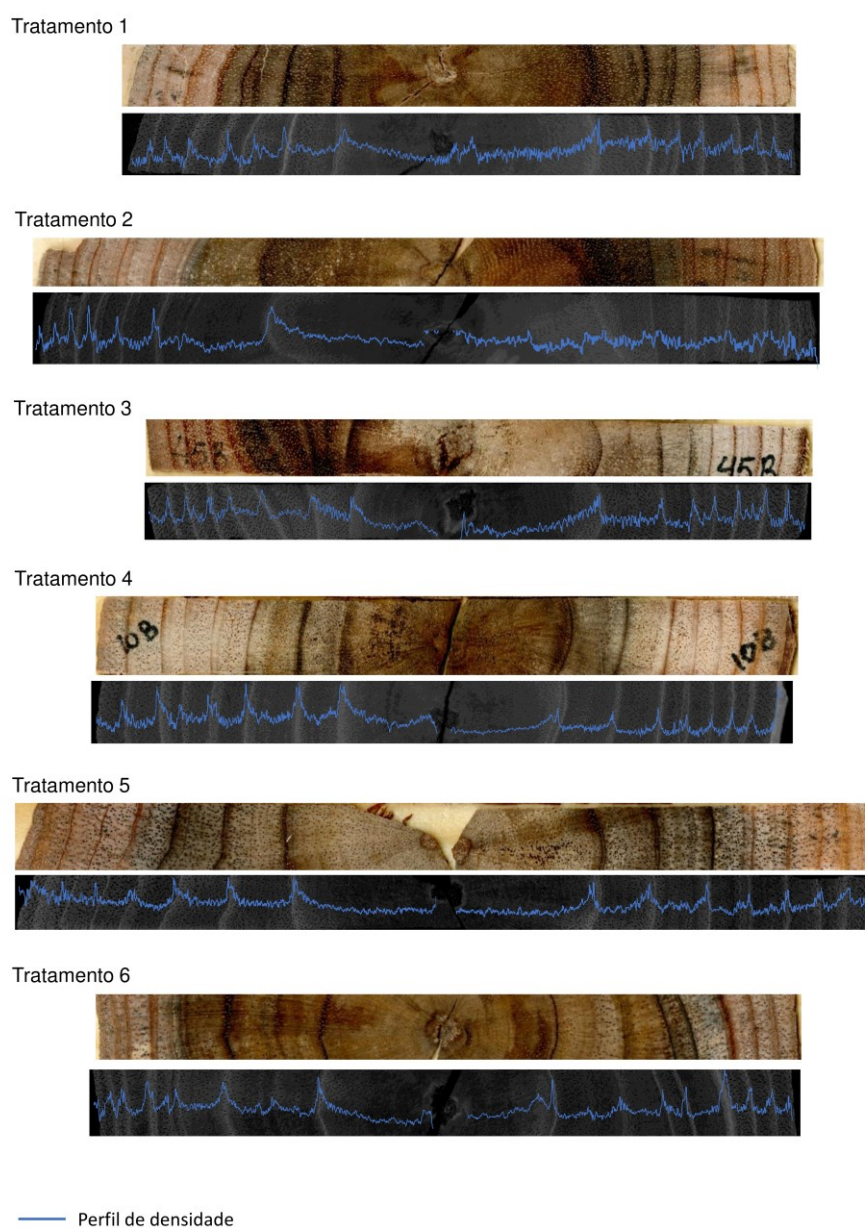


Figura 24. Perfil de variação radial da densidade aparente do lenho do DAP do tronco de árvores de *T. vulgaris*, nos diferentes espaçamentos de plantio.

O teste F ($p < 0,05$) revelou efeito não-significativo e significativo do espaçamento de plantio e idade, respectivamente, para os valores de densidade relativa aparente média, máxima e mínima (Tabela 6). Os valores médios foram de 0,699, 1,038 e 0,519 g cm⁻³ para as densidades média, máxima e mínima por anel de crescimento, respectivamente (Tabela 7). Esses valores são superiores aos encontrados para *E. grandis*, cuja variação foi de 0,37 a 0,55 g cm⁻³, 0,60 a 0,82 g cm⁻³ e 0,19 a 0,39 g cm⁻³, para as densidades média, máxima e mínima, respectivamente (CASTRO et al., 2017) e *E. grandis* aos 23 anos de idade, cuja variação da densidade média foi de 0,550 a 0,620 g cm⁻³ (OLIVEIRA et al., 2012b).

Tabela 6. Resumo da análise de variância das densidades relativas aparentes média, máxima e mínima de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

Fonte de variação	GL	Média			Máxima			Mínima		
		QM	Fc	Pr(>Fc)	QM	Fc	Pr(>Fc)	QM	Fc	Pr(>Fc)
Espaçamento	5	0,003	0,14	0,9787	0,013	0,361	0,8641	0,007	0,257	0,9268
Bloco	2	0,038	1,834	0,2096	0,031	0,852	0,4553	0,010	0,37	0,6999
Erro a	10	0,020	36,8		0,036			0,027		
Ano	6	0,039	1,71	<2e ⁻¹⁶ ***	0,007	3,471	0,0046**	0,162	113,72	<2e ⁻¹⁶ ***
Espaçamento*Ano	30	0,002		0,0338*	0,002	0,938	0,5647	0,002	1,293	0,1873
Erro b	72	0,001			0,002			0,001		
Total	125									
CV ₁			20,43			18,35			31,78	
CV ₂			4,63			4,20			7,26	

GL: grau de liberdade; QM: quadrado médio; Fc: F calculado; Pr (>Fc): *p* valor; CVe: coeficiente de variação experimental; *significância estatística ao nível de 5% de probabilidade, ***significância estatística ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 7. Valores médios das densidades relativas aparentes média, máxima e mínima nos diferentes espaçamentos de plantio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

Espaçamento (m ²)	Densidade relativa aparente (g cm ⁻³) à 12% de umidade		
	Média	Máxima	Mínima
4,5	0,690±0,064	1,006±0,042	0,511±0,127
6,0	0,699±0,065	1,011±0,068	0,530±0,091
7,5	0,701±0,072	1,067±0,106	0,544±0,120
9,0	0,685±0,070	1,035±0,048	0,490±0,093
10,5	0,717±0,094	1,051±0,105	0,516±0,117
12,0	0,707±0,069	1,056±0,041	0,523±0,099

Verificou-se relação positiva da idade/anel de crescimento com os valores de densidade, cuja curva dos modelos quadráticos ajustados revelou haver tendência de aumento em função do aumento da idade cambial (Figura 25). Os valores de densidade média aumentaram de 2011 (0,613 g cm⁻³) até 2016 (0,742 g cm⁻³) e diminuíram em 2017 (0,739 g cm⁻³) (Figura 25A). O comportamento da densidade mínima foi semelhante, tendo aumentado até 2015 (0,306 a 0,570 g cm⁻³) e diminuído em 2016 (0,567 g cm⁻³) (Figura 25B). Este resultado pode estar relacionado à precipitação pluviométrica da época, uma vez que foi registrado evento climático El-Niño caracterizado por seca severa. Já os valores de densidade máxima apresentaram reduções seguidas de aumentos entre os anos de crescimento: 1,060 a 1,011 g cm⁻³ (de 2011 a 2012); 1,011 a 1,049 g cm⁻³ (de 2012 a 2013) e 1,060 a 1,024 g cm⁻³ (de 2016 a 2017) (Figura 25C).

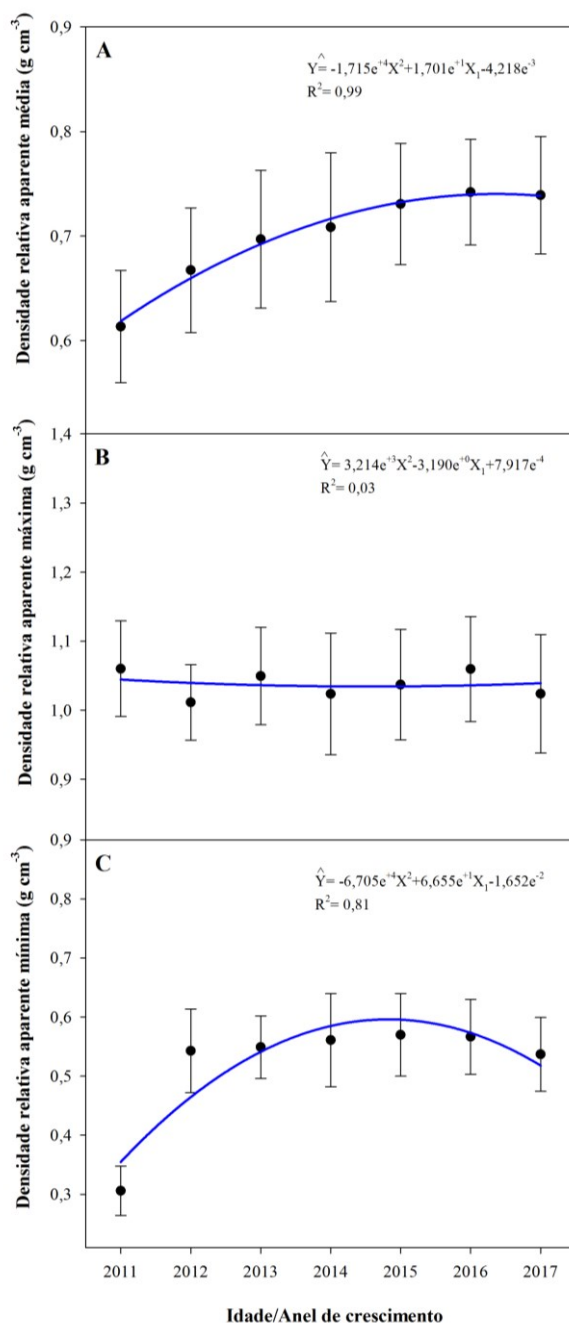


Figura 25. Densidades relativas aparentes média (A), máxima (B) e mínima (C) em função da idade/anel de crescimento de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

Essa tendência de aumento dos valores de densidade em função da idade cambial corrobora o aumento da densidade básica aos 8,5 anos em relação aos 7 anos de idade, discutido na tópico 6.2, e revela que as análises de densidade por densitometria de raios X podem ser ferramentas importantes e complementares ao detalhamento com maior precisão da densidade da madeira de *T. vulgaris*.

A ANAVA revelou efeito de interação dos fatores espaçamento de plantio x idade/anel de crescimento para a densidade média (Tabela 6). O detalhamento da interação revelou, para o efeito do espaçamento de plantio dentro da idade/anel de

crescimento, aumentos em 2012, seguido de reduções até 2014, aumentos até 2016 e redução em 2017, no espaçamento de 4,5 m²; aumentos até 2016, seguido de redução em 2017, nos espaçamentos de 6,0, 7,5 e 9,0 m², redução em 2012 seguida de aumentos até 2017, no espaçamento de 10,5 m²; e aumentos até 2013, seguidos de redução até 2016 e aumento em 2017, no espaçamento de 12,0 m² (Figura 26).

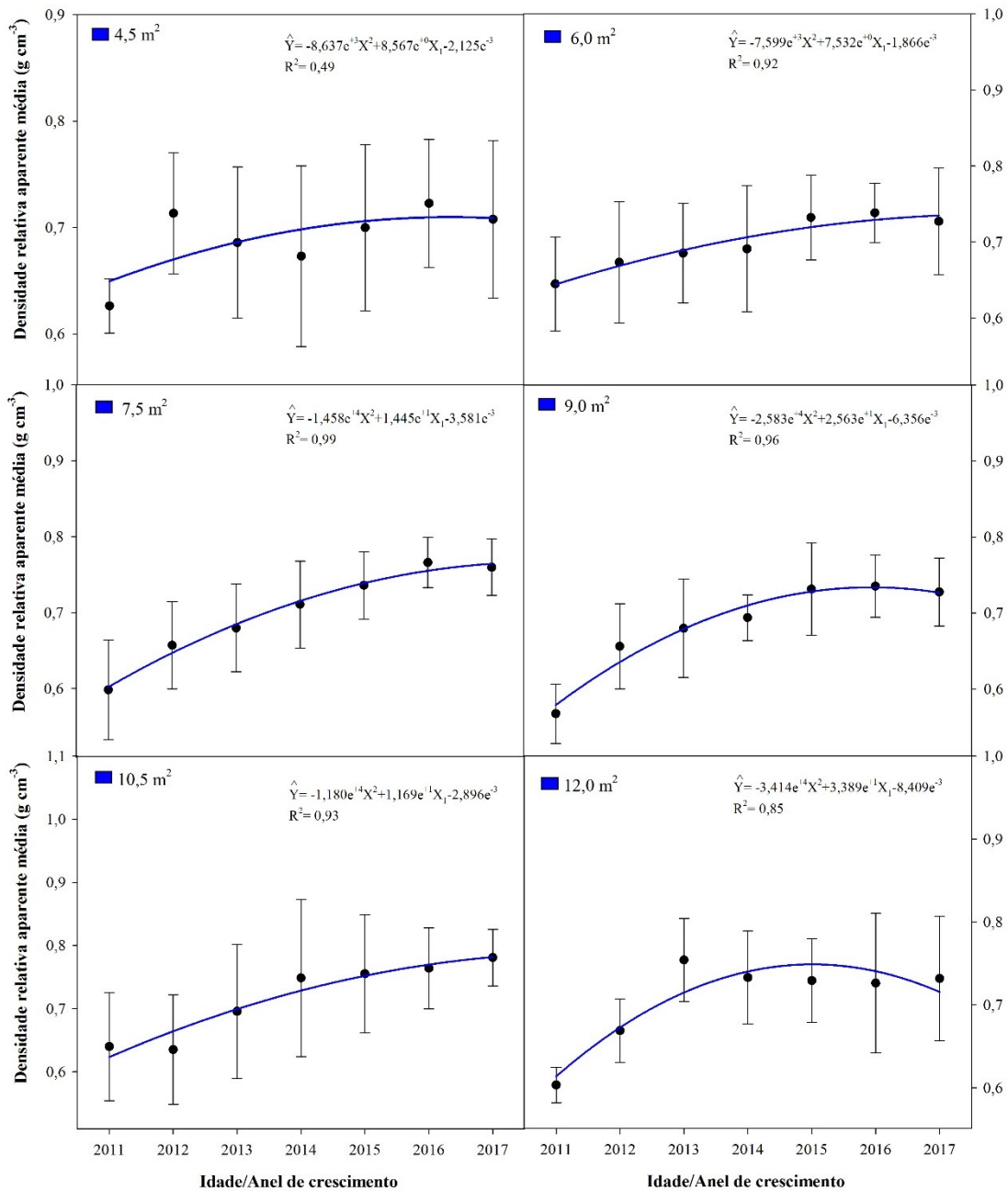


Figura 26. Efeito do espaçamento de plantio dentro de cada idade/anel de crescimento para a densidade relativa aparente média de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

Quanto ao efeito da idade/anel de crescimento dentro de cada espaçamento de plantio, verificou-se: aumento no espaçamento de 6,0 m², seguido de reduções até o

espaçamento de 9,0 m², aumento no espaçamento de 10,5 m² e redução no espaçamento de 12,0 m², no ano de 2011; reduções até o espaçamento de 10,5 m² e aumento no espaçamento de 12,0 m², no ano de 2012; redução no espaçamento de 7,5 m², seguido de aumentos até o espaçamento de 12,0 m², no ano de 2013; e aumentos até o espaçamento de 7,5 m², seguidos de redução no espaçamento de 9,0m², aumento no espaçamento de 10,5 m² e redução no espaçamento de 12,0 m², nos anos de 2014 a 2017 (Tabela 8).

Os aumentos da densidade relativa aparente do lenho a 12% de umidade em função do espaçamento de plantio confirmam a tendência de maior densidade básica da madeira em espaçamentos mais amplos para a idade de 7 anos, discutida no tópico 6.2.

Tabela 8. Efeito da idade/anel de crescimento dentro de cada espaçamento de plantio para a densidade relativa aparente média de plantio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

Espaçamento (m ²)	Densidade relativa aparente média (g cm ⁻³) à 12% de umidade						
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
4,5	0,626±0,03	0,713±0,06	0,686±0,07	0,673±0,09	0,700±0,08	0,722±0,06	0,707±0,07
6,0	0,645±0,06	0,673±0,08	0,686±0,07	0,691±0,08	0,732±0,06	0,738±0,04	0,727±0,07
7,5	0,598±0,07	0,657±0,06	0,680±0,06	0,711±0,06	0,736±0,05	0,766±0,03	0,760±0,04
9,0	0,567±0,04	0,656±0,06	0,680±0,07	0,694±0,03	0,731±0,06	0,735±0,04	0,728±0,05
10,5	0,640±0,09	0,635±0,09	0,700±0,11	0,749±0,12	0,755±0,09	0,764±0,06	0,781±0,05
12,0	0,603±0,02	0,669±0,04	0,754±0,05	0,733±0,06	0,729±0,05	0,726±0,08	0,732±0,08

O teste F ($p < 0,05$) revelou efeito significativo do espaçamento de plantio e idade cambial para a largura do anel de crescimento, sem efeito de interação. Verificou-se aumento do espaçamento 4,5 m² (7 mm) até o espaçamento 7,5 m² (8 mm), seguido de redução no espaçamento de 9,0 m² (7 mm) e aumento até o espaçamento de 12,0 m² (8 mm) (Figura 27). Quanto ao ano de crescimento, observou-se tendência de redução em função da idade, exceto para o ano de 2015, sendo o maior valor encontrado no ano de 2011 (18 mm) e os menores valores nos anos de 2016 e 2017 (4 e 4 mm, respectivamente) (Figura 28).

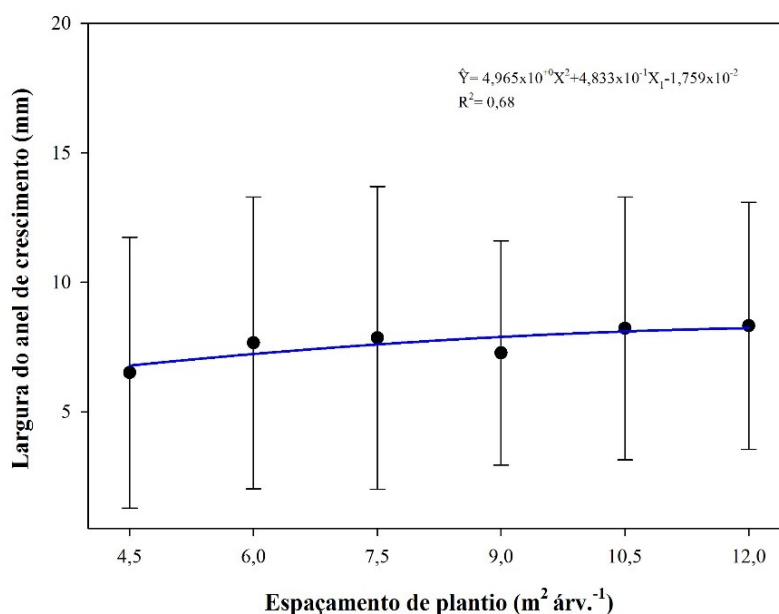


Figura 27. Efeito do espaçamento de plantio sobre a largura do anel de crescimento de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

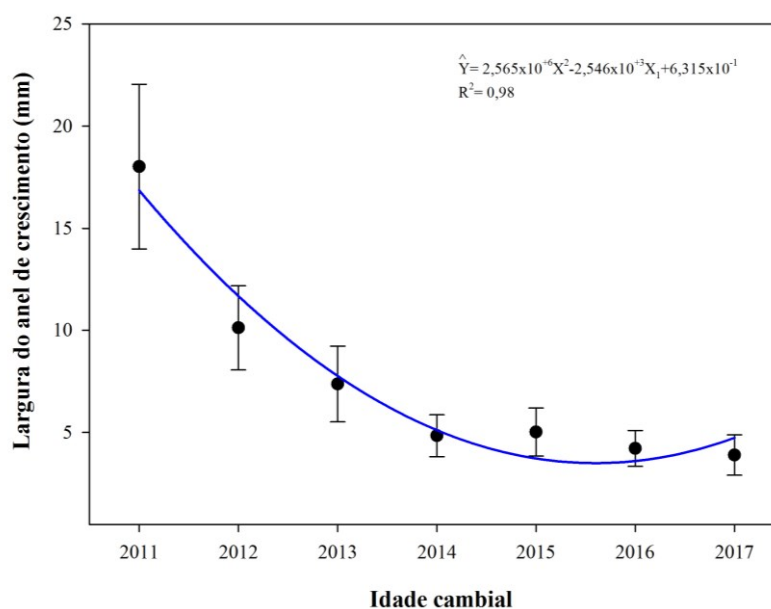


Figura 28. Efeito da idade cambial sobre a largura do anel de crescimento de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

A largura do anel de crescimento geralmente está associada ao crescimento das árvores e é usada como parâmetro de qualidade da madeira para fins estruturais, sendo preferidas madeiras com valores entre 4 e 6 mm (ORTEGA-RODRIGUEZ et al., 2019). Apesar da largura dos anéis de crescimento não ser o único parâmetro de qualidade para a aplicação da madeira no mercado, os valores registrados para a madeira de *T. vulgaris* podem ser considerados adequados para tais finalidades. O comportamento de redução da largura dos anéis em função da idade cambial pode estar relacionado às características

de crescimento biológico da espécie, com tendência de anéis mais largos nos primeiros anos de crescimento. Comportamento distinto foi verificado para a espécie *Larix kaempferi* em plantio homogêneo aos 22 anos de idade (FUJIMOTO; KOGA, 2010).

Efeitos significativos do espaçamento de plantio e idade cambial também foram observados para a proporção lenho inicial/lenho tardio, porém sem efeito de interação. O comportamento em função do espaçamento revelou aumento do espaçamento 4,5 m² (7%) até o espaçamento 7,5 m² (15%), seguido de redução até o espaçamento 12,0 m² (9%) (Figura 29). Para o efeito da idade/anel de crescimento, a proporção lenho inicial/lenho tardio apresentou tendência de redução em função da idade, cujo maior valor foi encontrado no ano de 2011 (17%) e os menores valores nos anos de 2016 (7%) e 2017 (5%) (Figura 30).

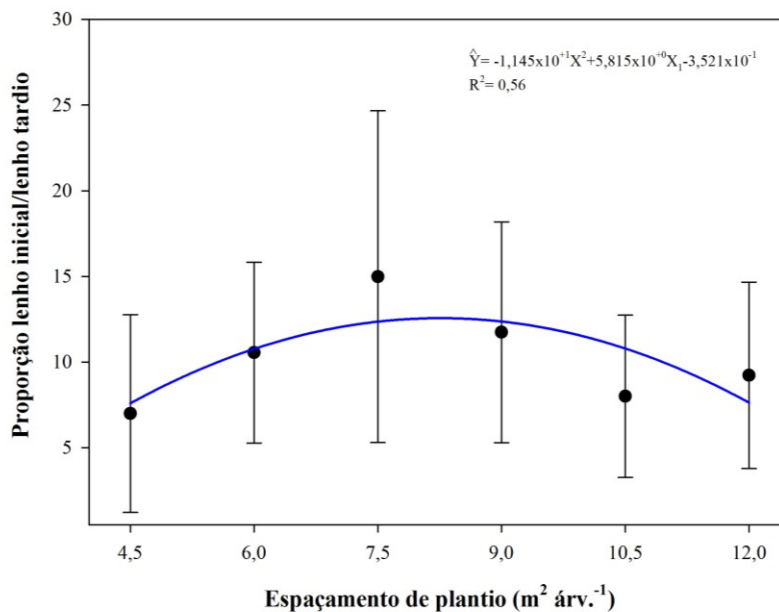


Figura 29. Efeito do espaçamento de plantio sobre a proporção de lenho inicial/lenho tardio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

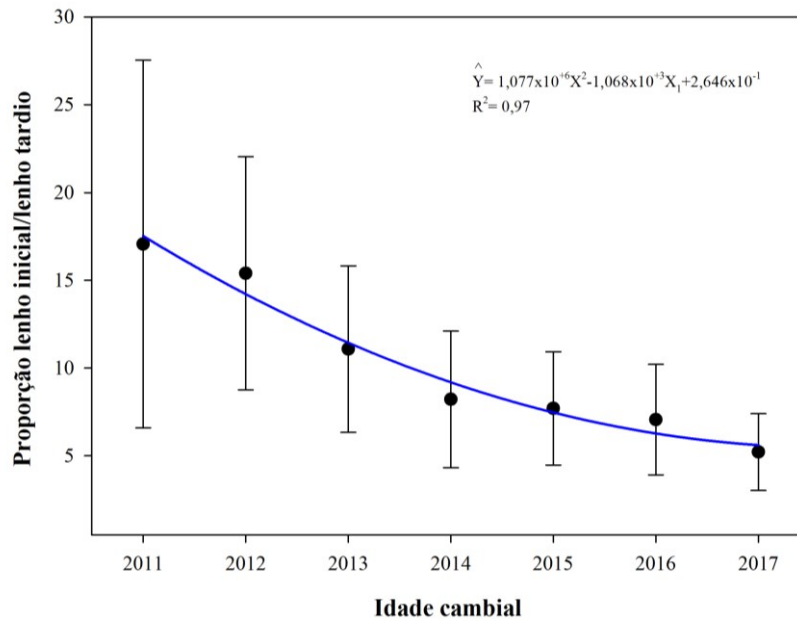


Figura 30. Efeito da idade cambial sobre a proporção de lenho inicial/lenho tardio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

A redução da proporção de lenho inicial/lenho tardio nos espaçamentos mais amplos pode ser explicada pela mortalidade de árvores nestes espaçamentos. Conforme discutido no tópico 6.2, a maior competição entre árvores nos espaçamentos mais reduzidos pode levar à formação precoce de lenho inicial, reduzindo a densidade básica aos 7 anos de idade, esperando-se que, nos espaçamentos mais amplos, a porcentagem de lenho tardio seja maior como resposta ao aumento da densidade básica. O comportamento da proporção de lenho inicial/lenho tardio foi semelhante ao verificado para a densidade básica, revelando que há relação entre estas duas variáveis. Esta relação parece ser melhor explicada pelo espaçamento de 4,5 m² onde há maior densidade (0,707 g cm⁻³) e menor proporção LI/LT (7%), e os espaçamentos mais amplos onde a densidade chega a 0,781 g cm⁻³ e a proporção LI/LT à 15%. Muito provavelmente a maior mortalidade de árvores no espaçamento de 4,5 m² levou à redução da proporção LI/LT e, conseqüentemente, da densidade da madeira.

Quanto à idade cambial, esperava-se redução da proporção de lenho inicial/lenho tardio em função da idade, conforme observado pelos modelos de regressão ajustados. Esse comportamento corrobora a ideia de aumento da densidade básica aos 8,5 anos em relação aos 7 anos provocada pela maior proporção de lenho tardio e largura do anel de crescimento, discutida no tópico 6.2, e revela que o lenho de *T. vulgaris* apresenta características juvenis caracterizadas pela presença de lenho tardio ainda imaturo, típico de plantios jovens.

Para a variável densidade do anel, o teste F ($p < 0,05$) revelou efeito não-significativo e significativo do espaçamento de plantio e idade cambial, respectivamente, sem efeito de interação (Figura 31). Verificou-se tendência de aumento da densidade do anel em função da idade cambial, exceto para o ano de 2017, cuja variação foi de $0,642 \text{ g cm}^{-3}$ (2011) a $0,744 \text{ g cm}^{-3}$ (2016), seguido de redução em 2017 ($0,733 \text{ g cm}^{-3}$) (Figura 32).

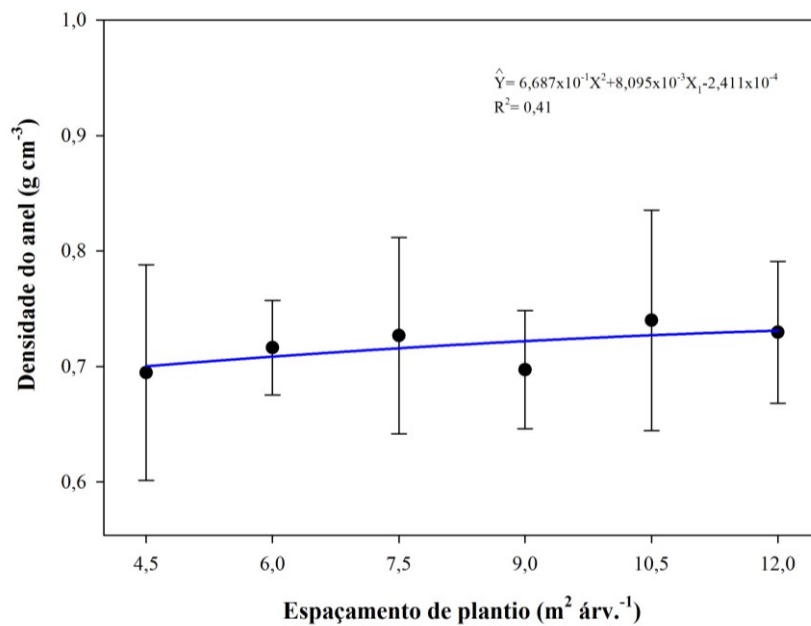


Figura 31. Efeito do espaçamento de plantio sobre a densidade do anel de crescimento de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

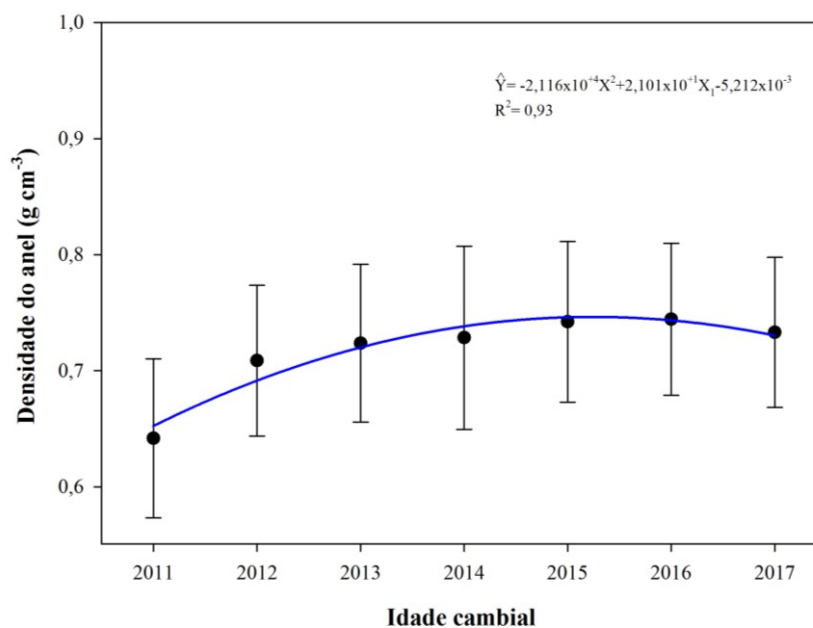


Figura 32. Efeito da idade cambial sobre a densidade do anel de crescimento de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

Os anéis de crescimento formados em idades cambiais mais maduras tendem a possuir maiores densidades, apesar de serem mais heterogêneos, do que os anéis formados nas fases juvenis de crescimento, que são mais homogêneos e menos densos, tendo sido reportados valores médios de $0,530 \text{ g cm}^{-3}$ (DOBNER JR. et al. 2018). Essa resposta dos anéis de crescimento pode estar relacionada aos valores de densidade relativa aparente, que também aumentaram em função da idade cambial, revelando que árvores de anéis mais densos produzirão lenho mais denso.

Assim como para a densidade do anel, o teste F ($p < 0,05$) revelou efeito não-significativo e significativo do espaçamento de plantio e idade cambial, respectivamente, sem interação, para a densidade do lenho inicial. Verificou-se tendência de aumento da densidade do lenho inicial em função da idade cambial, exceto para os anos de 2016 e 2017, tendo a variação sido de $0,609 \text{ g cm}^{-3}$ (2011) a $0,717 \text{ g cm}^{-3}$ (2015), seguido de reduções em 2016 ($0,715 \text{ g cm}^{-3}$) e 2017 ($0,699 \text{ g cm}^{-3}$) (Figuras 33 e 34).

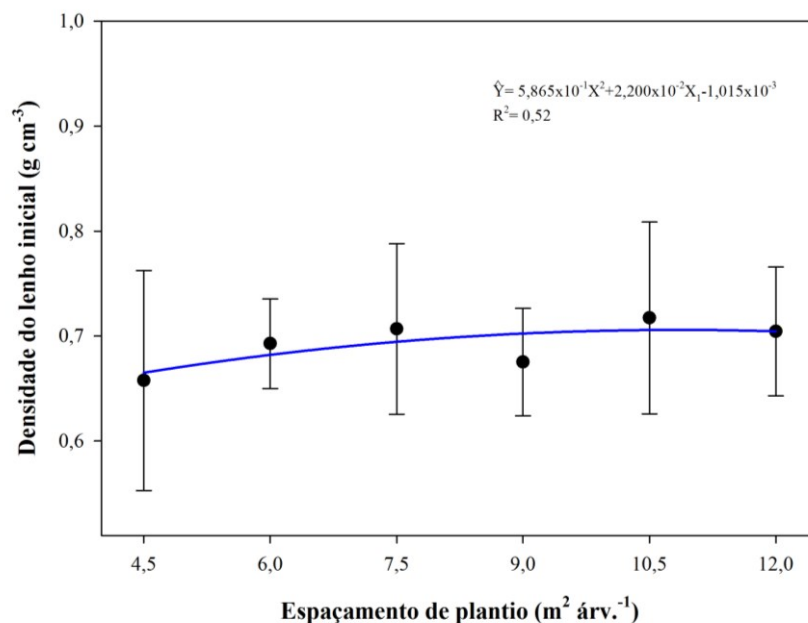


Figura 33. Efeito do espaçamento de plantio sobre a densidade do lenho inicial de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

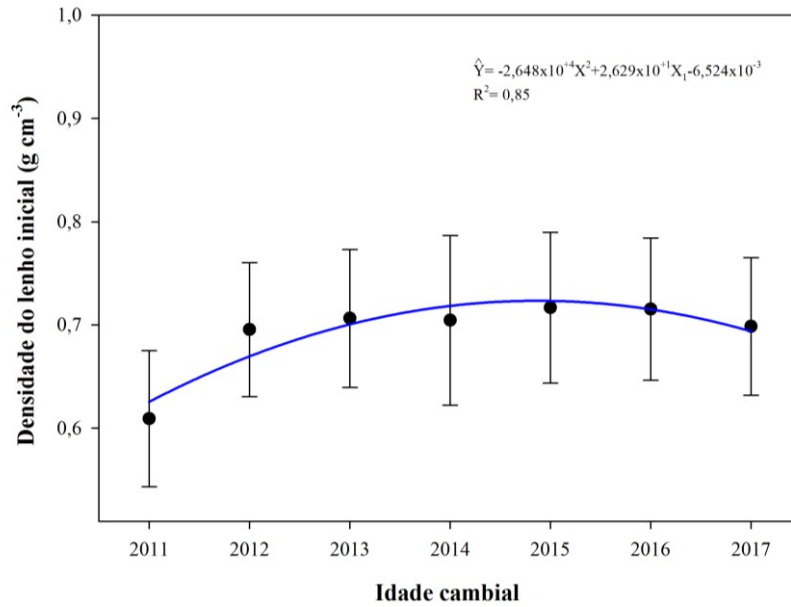


Figura 34. Efeito da idade cambial sobre a densidade do lenho inicial de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

O mesmo comportamento foi verificado para a densidade do lenho tardio, segundo revelou o teste F ($p < 0,05$), também sem efeito de interação entre o espaçamento de plantio e a idade/anel de crescimento. A tendência de comportamento da densidade do lenho tardio demonstrou aumento até 2013 (0,920 a 0,927 g cm⁻³), seguido de reduções até 2015 (0,919 g cm⁻³), aumento em 2016 (0,942 g cm⁻³) e redução em 2017 (0,905 g cm⁻³) (Figuras 35 e 36).

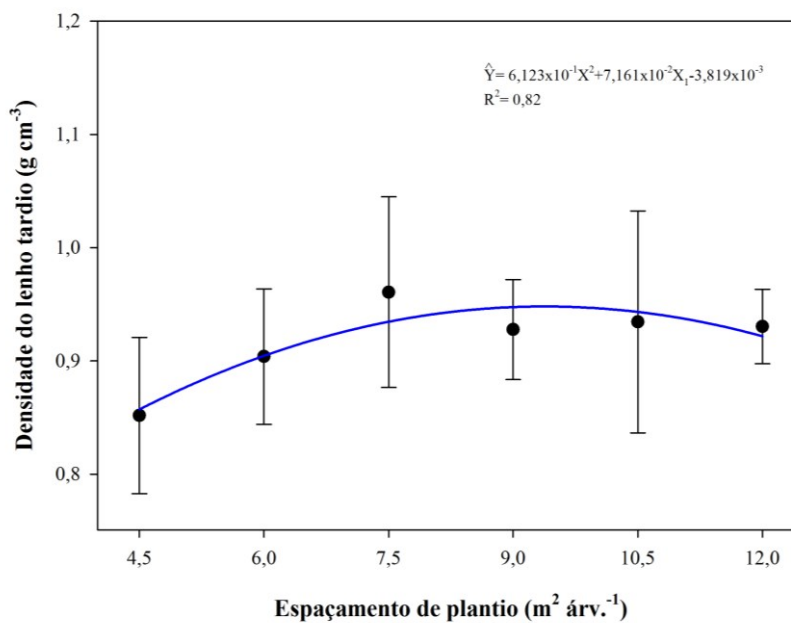


Figura 35. Efeito do espaçamento de plantio sobre a densidade do lenho tardio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

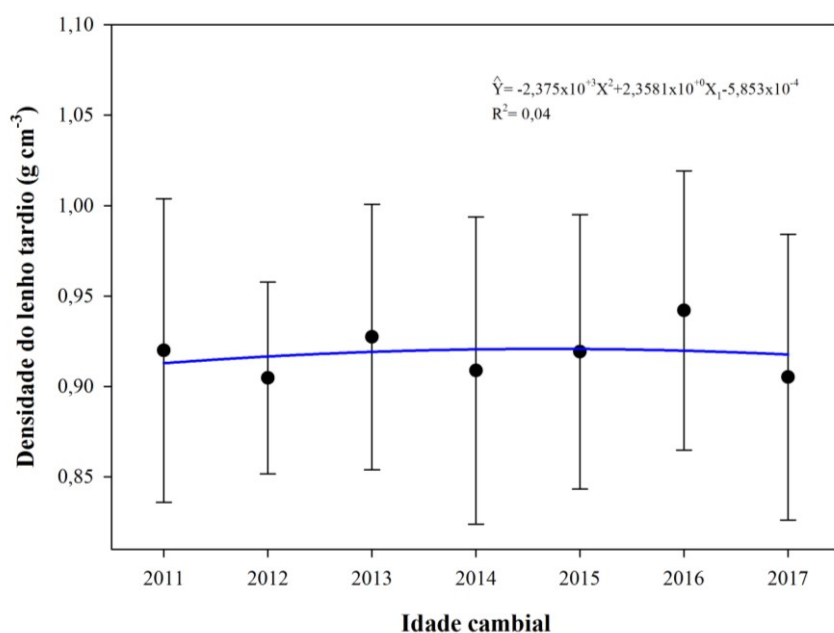


Figura 36. Efeito da idade cambial sobre a densidade do lenho tardio de um plantio experimental de *T. vulgaris*.

A maior densidade do lenho tardio em relação ao lenho inicial deve-se a características químicas e anatômicas, uma vez que o lenho tardio tem fibras mais espessas e de menor largura, quando comparado ao lenho inicial que apresenta caracteres anatômicos de maior variação e, portanto, menos densos (CASTAÑO-SANTAMARÍA e BRAVO, 2012). Os valores de densidade do lenho inicial e lenho tardio estão dentro do encontrado para o lenho de *E. grandis*, cuja variação foi de 0,480 a 0,790 g cm⁻³ e média de 0,620 g cm⁻³, para o lenho inicial, e de 0,590 a 0,850 g cm⁻³ e média de 0,720 g cm⁻³, para o lenho tardio (KNAPIC et al., 2014).

6.4. Relação cerne/alburno

O teste F ($p < 0,05$) não encontrou significância estatística para o espaçamento de plantio e tipo de fuste sobre a relação C/A e porcentagens de cerne e alburno, dos discos da base, aos 8,5 anos. Os valores médios foram de 1,38, 55% e 45%, para a relação C/A e porcentagens de cerne e alburno, respectivamente (Figura 37A, B e C). Para os discos do DAP, foi encontrado efeito significativo ($p < 0,05$) para o espaçamento de plantio sobre a relação C/A e porcentagens de cerne e alburno. O modelo polinomial cúbico foi o que melhor explicou os dados, para as três características, tendo os valores variado de 1 a 2, de 48 a 61% e de 39 a 52%, para a relação C/A e porcentagem de cerne e alburno, respectivamente (Figura 38A, B e C).

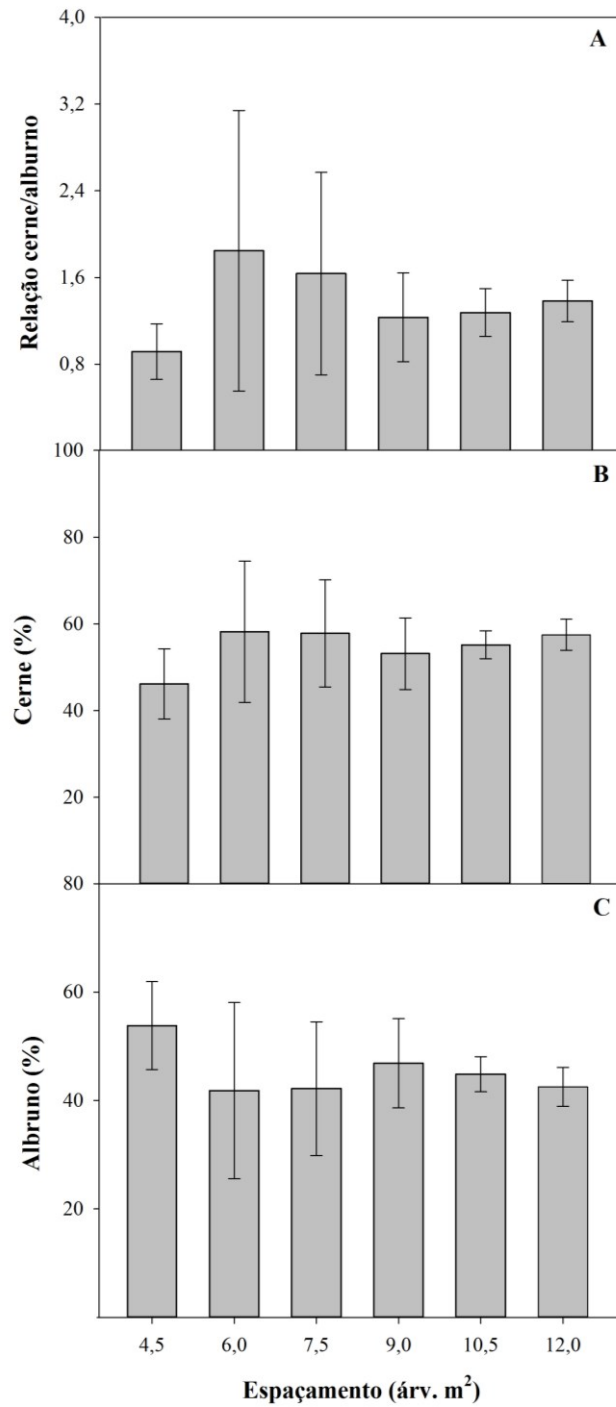


Figura 37. Relação cerne alburno e porcentagens (%) de cerne e alburno de discos da base de árvores de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade.

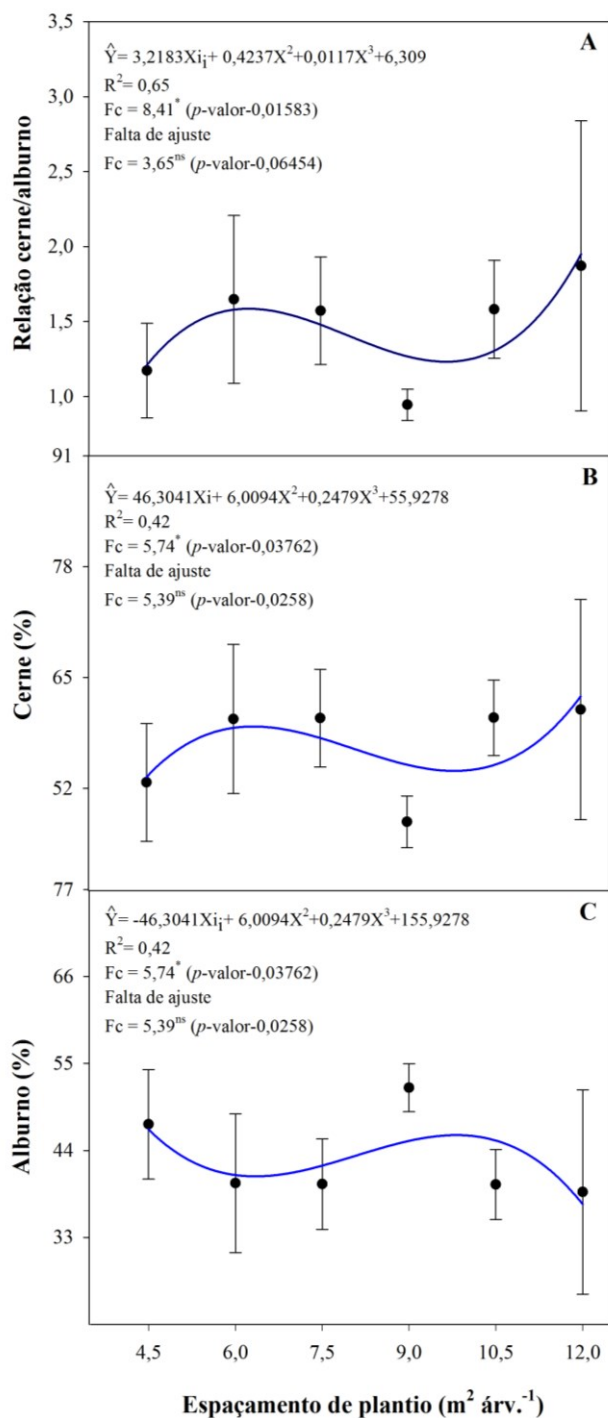


Figura 38. Relação cerne alburno e porcentagens (%) de cerne e alburno de discos do DAP (1,30 m) de árvores de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade.

Quanto ao tipo de fuste, para ambos os discos, não foi verificado efeito significativo. Para os discos da base, os valores dos fustes bifurcados foram maiores para a relação C/A e porcentagem de cerne, em comparação aos fustes não bifurcados, enquanto que a porcentagem de alburno foi maior nos fustes não bifurcados. Os valores para os fustes bifurcados, para os discos do DAP, foram maiores apenas para a

porcentagem de cerne, enquanto que para a relação C/A e porcentagem de alburno foi maior para os fustes não bifurcados (Tabela 9).

Tabela 9. Relação cerne/alburno (C/A), porcentagens de cerne (C%) e alburno (A%) em fustes bifurcados (BF) e não bifurcados (NB) de discos da base (0%) e DAP (1,30 m) do fuste de *T. vulgaris* de um plantio experimental aos 8,5 anos de idade.

Propriedade	Base (0%)		DAP (1,30 m)	
	BF	NB	BF	NB
C/A	1,49±0,71	1,27±0,72	1,46±0,58	1,48±0,56
C(%)	56,18±10,06	53,14±10,14	57,13±8,8	57,11±8,79
A(%)	43,83±10,06	46,86±10,14	42,87±8,8	42,89±8,79

A ausência de significância estatística para o espaçamento de plantio, nos discos da base, e o comportamento cúbico da equação para os dados nos discos do DAP, está muito provavelmente associado à alta heterogeneidade do material genético estudado, verificada pelas variadas formas do fuste dentro dos diferentes espaçamentos, interferindo nas dimensões (diâmetro do cerne e diâmetro total) dos discos medidos (Figura 39) e, conseqüentemente, na variação dos dados analisados.

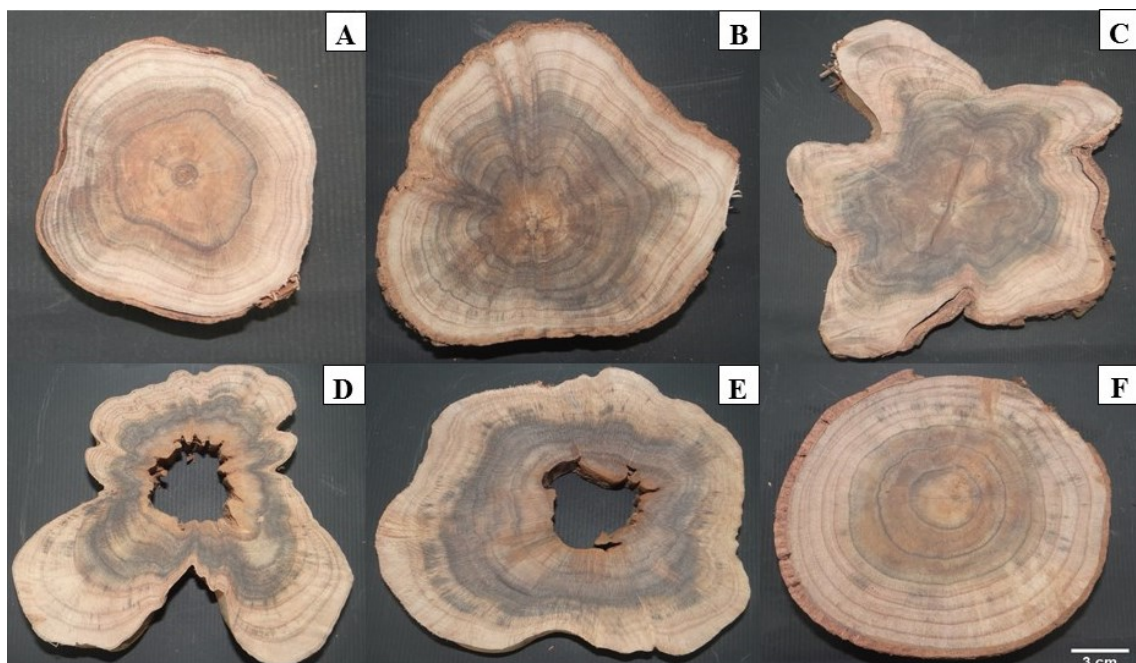


Figura 39. Discos na posição do DAP (1,30 m) do fuste de árvores nos espaçamentos de 4,5 m² (A), 6,0 m² (B), 7,5 m² (C), 9,0 m² (D), 10,5 m² (E) e 12,0 m² (F) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade.

A bifurcação causou maior impacto sobre as três características nos discos da base, nos quais foram verificados maiores porcentagens de cerne e relação C/A na

madeira, quando comparado aos discos do DAP, onde as variações provocadas pelo tipo de fuste foram menores, o que pode ser para manter a sustentação da árvore, conforme já discutido para a densidade básica de árvores bifurcadas. A posição do DAP, portanto, parece ser mais adequada para fins de amostragem da madeira de *T. vulgaris* visando ao estudo da relação C/A, no entanto, vale destacar a necessidade de estudos futuros que avaliem o comportamento destas características em discos de todas as posições do perfil longitudinal do fuste da espécie. De modo geral, a bifurcação interfere negativamente na qualidade da madeira de *T. vulgaris* para a finalidade energética por produzir lenho com maiores porcentagens de cerne e conseqüente maior relação C/A.

Visando à utilização da madeira para a produção energética, são preferidos materiais genéticos de menor relação C/A, uma vez que as características dos elementos anatômicos do alburno de maior espessura facilitam o transporte de água e gases, reduzindo o tempo de secagem do lenho durante a primeira fase da carbonização, com conseqüente otimização do tempo de carbonização da madeira (DEBELL & LACHENBRUCH, 2009; EL-JUHANY, 2011). Adicionalmente, altas porcentagens de cerne na madeira retardam a carbonização pela menor perda de água pelos poros de menor diâmetro devido à presença de extrativos e tiloses em células fisiologicamente inativas (SANTOS et al., 2013; MIRANDA et al., 2015).

Comparativamente, valores superiores de relação C/A (0,80 a 2,00) foram registrados para a madeira de dois clones de *E. grandis* e um clone híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 4 anos de idade plantados sob os espaçamentos de 3,0 x 1,0, 3,0 x 2,0, 3,0 x 3,0 e 3,0 x 3,4 m (BRITO et al., 2019), e para a madeira de discos da base do fuste de *Pseudotsuga menziesii* com valores variando de 1,41 a 1,44 (CARDOSO; PEREIRA, 2017), confirmando a qualidade desejável da madeira de *T. vulgaris* para a finalidade energética baseado nas porcentagens de cerne e alburno no lenho desta espécie.

A madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade apresentou valores de porcentagens de cerne (inferiores) e alburno (superiores) quando comparado aos verificados para o lenho de 7 clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6,5 anos de idade, plantados sob o espaçamento de 3,0 x 3,0 m, em duas localidades, nas quais foram registrados valores médios de 51,9 a 60,9%, para a porcentagem de cerne, e de 39,1 a 48,1%, para a porcentagem de alburno (FREITAS et al., 2019) e valores inferiores de porcentagem de cerne (67%) para um clone de *E. urophylla* aos 6 anos de idade plantado em 12 localidades distintas (ALMEIDA et al., 2020).

6.5. Composição química e poder calorífico da madeira

De acordo com o teste F ($p < 0,05$) não houve efeito significativo do espaçamento de plantio e tipo de fuste sobre os teores de MV, Cz, CF, PCS e PCI da madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade. Não foi verificado efeito da interação espaçamento de plantio x tipo de fuste. Os valores médios foram de 81, 0,33 e 19%, respectivamente, para os teores de MV, Cz, CF, e de 21 e 19 MJ/kg, respectivamente, para o PCS e PCI (Tabela 10). Quanto ao tipo de fuste, as concentrações médias de MV, Cz e CF foram de 81, 0,33 e 19%, respectivamente, e de 21 e 19 MJ/kg, respectivamente, para o PCS e PCI, para os fustes não bifurcados, e de 81, 0,33 e 19%, respectivamente, para MV, Cz e CF, e de 21 e 19 MJ/kg, respectivamente, para o PCS e PCI, para os fustes bifurcados.

Tabela 10. Teores de materiais voláteis (MV), cinzas (Cz), carbono fixo (CF) e poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) da madeira do fuste de *T. vulgaris* de um plantio experimental aos 8,5 anos de idade.

Espaçamento de plantio (m ²)	MV (%)	Cz (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
4,5	80,98±1,16	0,30±0,09	18,64±1,13	20,43±0,20	19,18±0,20
6,0	80,45±0,86	0,35±0,07	19,11±0,79	20,51±0,14	19,25±0,14
7,5	80,98±1,57	0,27±0,07	18,69±1,43	20,45±0,24	19,20±0,25
9,0	80,47±0,45	0,36±0,12	19,01±0,57	20,48±0,15	19,23±0,15
10,5	80,00±0,58	0,37±0,06	19,54±0,58	20,59±0,11	19,34±0,12
12,0	80,20±0,57	0,32±0,14	19,44±0,65	20,59±0,15	19,33±0,15
CV ₁	1,22	25,09	5,15	0,91	0,99
CV ₂	1,17	30,99	4,06	0,57	0,64

CV₁: coeficiente de variação do fator espaçamento de plantio; CV₂: coeficiente de variação do fator tipo de fuste; MV(%): teor de materiais voláteis; Cz(%): teor de cinzas; CF(%): teor de carbono fixo; PCS(MJ/kg): poder calorífico superior; PCI(MJ/kg): poder calorífico inferior.

De modo geral, a composição química imediata tem impactos significativos para a qualidade da biomassa para a geração de energia (PROTÁSIO et al., 2011a; BRUNEROVÁ et al., 2017), uma vez que altas concentrações de MV são desejáveis, pois, esses compostos têm a capacidade de reduzir o tempo de ignição da biomassa (SOARES et al., 2014; SILVA et al., 2015b; JARDIM et al., 2016).

O CF é o resultado da liberação dos MV, excluindo-se as Cz e a umidade da biomassa, e é considerado o parâmetro mais importante em termos de potencial energético, haja visto que altas concentrações de CF estão fortemente associadas ao poder calorífico da biomassa e à queima mais lenta, implicando em maior tempo de resistência térmica da madeira e maior fixação de C durante a pirólise (CARNEIRO et al., 2016; FERREIRA et al., 2017). Já os teores de Cz impactam negativamente a qualidade da biomassa, reduzindo o seu valor energético, visto que os óxidos minerais estão

relacionados à formação de escórias e incrustação dos equipamentos de queima (PEREIRA et al., 2013b; SIMETTI et al., 2018a).

Comparativamente ao reportado na literatura para outras espécies arbóreas, a concentração média de MV presente na madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade é inferior ao valor médio de 81% registrado para a madeira do fuste de *Mimosa scabrella*, aos 8 anos de idade (FRIEDERICHS et al., 2015), aos 84% encontrados para a madeira do fuste de *E. benthamii*, aos 5 anos de idade (SILVA et al., 2015c) e aos valores registrados de 87% de 4 espécies do gênero *Quercus* (NÚNEZ-RETANA et al., 2019). Por outro lado, tem concentração média superior ao registrado para a madeira de um plantio de *Khaya ivorensis* aos 7 anos de idade, cujo valor médio é de 11%, cerca de 71% menor (MORAES et al., 2019). A madeira de *Mimosa scabrella*, aos 3 anos de idade, apresentou média de 17% de MV, o que corresponde a 15% a menos que o que contem na madeira de *T. vulgaris* (ELOY et al., 2015).

O valor de Cz da madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos é inferior ao reportado para a madeira de dois plantios experimentais da espécie aos 20 e 15 anos de idade, respectivamente, estabelecidos em área de cerrado e terra firme, no estado do Amapá, nos quais a variação foi de 0,56 e 0,63%, respectivamente (ORELLANA et al., 2018) e aos 0,84% registrados para a madeira de *Miconia cinnamomifolia* de idade aproximada de 10 anos (BRAND et al., 2013). Comparativamente, a madeira de dois clones de *E. grandis* x *E. urophylla* plantado sob os espaçamentos de 1,5, 3,0, 6,0 e 9,0 m² apresentou valor médio de 1,32%, valor 300% superior ao registrado para a madeira de *T. vulgaris* (MOULIN et al., 2015). Comparando aos valores de *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* (angico-vermelho), *Mimosa tenuiflora* (jurema-preta) e *Mimosa arenosa* (jurema-vermelha), três espécies nativas do Semiárido Brasileiro, utilizadas para a geração de energia, que foram de 2,1, 0,62 e 1,37%, respectivamente, (PAES et al., 2013), a madeira de *T. vulgaris* tem concentrações de cinzas de 536, 89 e 315% menores, evidenciando a qualidade de sua madeira para a finalidade energética.

O teor médio de CF na madeira do fuste de *T. vulgaris* é superior ao verificado para a madeira de *E. saligna* (17%), *E. viminalis* (16%), *E. robusta* (19%), *E. dunii* (16%), *E. pellita* (19%), *E. globulus* (16%), *E. deanei* (18%), *E. phatotrica* (16%) e *E. grandis* (14%), com idades variando de 18 a 22 anos, avaliados para a produção de carvão vegetal (JUIZO et al., 2017). Eloy et al. (2016), avaliando o efeito da idade de plantio e espaçamento sobre as propriedades energéticas da madeira de *E. grandis*, aos 5 anos de idade, reportaram concentração de CF variando de 19 a 20%, valores superiores aos da madeira de *T. vulgaris*. A madeira de *T. vulgaris* se destacou quando comparada às

concentrações de CF na madeira de *E. grandis*, aos 9 anos de idade, que variaram de 16 a 17% (SILVA et al., 2019b).

O poder calorífico da madeira é uma das características mais importantes para a sua utilização na produção de carvão vegetal, uma vez que representa a quantidade de calor liberadas durante a combustão completa de uma unidade de massa de combustível e, de modo geral, quanto maior o seu valor, maior o potencial energético da madeira para esta finalidade (VALE et al., 2001; NOGUEIRA & LEMOS, 2003). Os valores registrados para a madeira de *T. vulgaris* podem ser considerados adequados para a finalidade energética, haja visto que são superiores aos encontrados para a madeira de 5 materiais genéticos de *Eucalyptus*, aos 3 anos de idade, cultivados em diferentes localidades, cujos valores variaram de 19,7 a 19,9 MJ/kg (CARNEIRO et al., 2017).

De acordo com o teste F ($p < 0,05$) não houve efeito significativo do espaçamento de plantio e tipo de fuste sobre os teores de N, C, H, O e as relações H/C e N/C da madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade. Não foi verificado efeito da interação espaçamento de plantio x tipo de fuste. Os valores médios dos teores de N, C, H, O e as relações H/C e N/C foram de 2,2, 51, 6,1 e 40% e 1,44 e 0,37, respectivamente (Tabela 11). Quanto ao tipo de fuste, as concentrações médias de N, C, H, O e as relações H/C e N/C foram de 2,13, 51 e 6,1% e 1,43 e 0,035, respectivamente, para os fustes não bifurcados, e de 2,28, 51 e 6,1 e 1,44 e 0,038, respectivamente, para os fustes bifurcados. Não foram encontrados teores de S.

Tabela 11. Teores elementares de nitrogênio (N), carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e as relações H/C e N/C da madeira do fuste de *T. vulgaris* de um plantio experimental aos 8,5 anos de idade.

Espaçamento de plantio (m ²)	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	H/C	N/C
4,5 m ²	2,36±0,19	51,06±0,68	6,09±0,06	40,2±0,88	1,43±0,03	0,040±0,000
6,0 m ²	2,21±0,42	50,97±0,77	6,13±0,04	40,35±0,67	1,44±0,03	0,037±0,005
7,5 m ²	2,38±0,50	50,58±0,92	6,11±0,04	40,67±0,86	1,45±0,03	0,040±0,009
9,0 m ²	2,33±0,60	50,94±0,68	6,10±0,03	40,28±0,65	1,44±0,02	0,038±0,012
10,5 m ²	1,79±0,57	51,07±0,38	6,06±0,07	40,72±0,42	1,42±0,02	0,030±0,009
12,0 m ²	2,15±0,40	50,79±0,80	6,10±0,04	40,65±0,59	1,44±0,03	0,035±0,005
CV ₁	18,55	1,17	0,664	1,69	1,69	17,25
CV ₂	16,67	1,05	0,99	1,43	1,17	18,18

CV₁: coeficiente de variação do fator espaçamento de plantio; CV₂: coeficiente de variação do fator tipo de fuste; N(%): teor elementar de nitrogênio; C(%): teor elementar de carbono; H(%): teor elementar de hidrogênio; O(%): teor elementar de oxigênio; H/C: relação dos teores elementares de hidrogênio e carbono; N/C: relação dos teores elementares de nitrogênio e carbono.

De modo geral, a composição química da madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* é de, aproximadamente, 47% de carbono, 6% de hidrogênio, 46% de oxigênio, 0,12% de nitrogênio, e 0,001% de enxofre (PROTÁSIO et al., 2013; CARNEIRO et al.,

2014), sendo o carbono e o hidrogênio os principais elementos químicos que influenciam a combustibilidade da madeira, especialmente por interferirem positivamente nos valores de poder calorífico e, portanto, sobre a quantidade de energia liberada pela combustão do lenho, enquanto que altas concentrações de O presente na biomassa comprometem sua qualidade por reduzir o poder calorífico (TRUGILHO et al., 2012; LEITE et al., 2015).

A concentração de C% da madeira de *T. vulgaris* é superior à concentração deste elemento na madeira de 4 clones híbridos de *Eucalyptus*, aos 7 anos de idade, que variou de 47 a 49% e inferior à concentração de H que variou de 6,3 a 6,5%, na madeira do mesmo material genético (SANTOS et al., 2016). Comparando à madeira do fuste de 3 clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* e 4 clones de *C. torelliana* x *C. citriodora*, aos 4 anos de idade, tem concentrações de C e H de 45 e 5,6%, respectivamente, (LOUREIRO et al., 2019), o que corresponde a reduções de 12 e 9% a menos que o encontrado para a madeira de *T. vulgaris*.

O teor de O é inferior ao que contem a madeira do fuste de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 3, 5 e 7 anos de idade, nos quais foram registrados valores médios de 49, 49 e 48%, respectivamente (SOARES et al., 2015). A concentração média de O de 12 árvores do gênero *Eucalyptus*, aos 6 anos de idade, plantadas sob o espaçamento de 3,5 x 2,5 m, foi de 43% (ARAÚJO et al., 2016), o que corresponde a 7% a mais que o registrado para a madeira de *T. vulgaris*, aos 8,5 anos de idade.

As concentrações de N da madeira do fuste de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 2 anos de idade variou de 0,02 a 0,08% (ZANUNCIO et al., 2019), valores muito inferiores à média de 2,2% registrados para a madeira de *T. vulgaris* aos 8,5 anos de idade. Esse resultado está certamente associado à capacidade de associação simbiótica da espécie com bactérias fixadoras de nitrogênio com consequente aumento nas concentrações deste elemento no fuste, conforme já verificado para a madeira de árvores da mesma área experimental analisada neste estudo, aos 7 anos de idade (SILVA et al., 2019a). Altos teores de N combinados ao alto teor de S são indesejáveis para a finalidade energética, uma vez que estes elementos são convertidos em óxidos tóxicos (NOx) e (SOx) capazes de formar chuva ácida e corroer os equipamentos de queima, além de comprometer a qualidade do carvão vegetal (DEMIRBAS, 2004; DIAS JÚNIOR et al., 2018).

A relação H/C indica o grau de transformação da biomassa, sendo que biomassas de menor H/C terão mais facilidade em formar carvão vegetal através da perda de H pela eliminação da água, enquanto que maior N/C implicará em menor quantidade de N liberado durante a combustão da madeira (DIAS JÚNIOR et al., 2018).

Comparativamente à madeira de sete clones de *E. urophylla* x *E. grandis*, aos 4,5 anos de idade, que apresentou valores médios de relações H/C e N/C de 0,47 e 0,02, respectivamente, (PROTÁSIO et al., 2015), as mesmas variáveis para a madeira de *T. vulgaris* são 206 e 100% superiores, o que deve estar associado às altas concentrações de H e N.

6.6. Qualidade e produtividade do carvão vegetal

O teste F ($p < 0,05$) revelou efeito significativo do espaçamento de plantio sobre a DRA, ao nível de 5% de probabilidade, aos 7 anos de idade. A análise de variância revelou independência entre os fatores. Verificou-se relação positiva do espaçamento de plantio com a DRA, com tendência de aumento nos espaçamentos mais amplos, exceto para o espaçamento de 4,5 m², verificada pela equação do modelo linear ($R^2=0,58$, $F_c=7,4$ e $p=0,02155$) (Figura 40).

Os valores variaram de 0,294 g cm⁻³ a 0,338 g cm⁻³, com menor valor no espaçamento de 4,5 m² (0,294 g cm⁻³) e os maiores nos espaçamentos de 10,5 m² e 12,0 m² (0,3383 g cm⁻³ e 0,3362 g cm⁻³, respectivamente), o que corresponde a aumentos de 15% e 14%, respectivamente, quando comparado ao espaçamento de 4,5 m² (Figura 40).

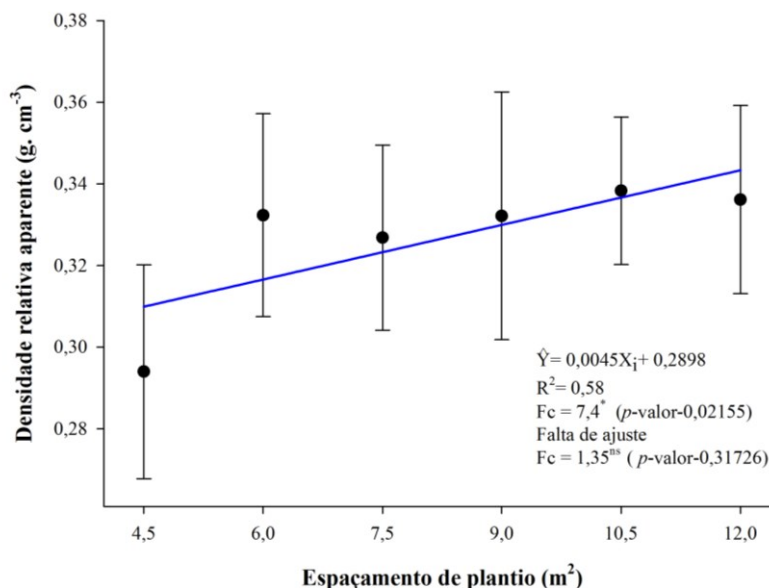


Figura 40. Densidade relativa aparente do carvão vegetal em função do espaçamento de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

Comparando à densidade básica da madeira aos 7 anos de idade, as reduções na densidade relativa aparente do carvão vegetal nesta mesma idade variaram de 33 a 34%, o que já é esperado devido à perda de massa da madeira e contração volumétrica durante

a pirólise, que pode atingir até 60% da massa inicial da madeira (VIDAURRE et al., 2012). A densidade básica da madeira tem forte correlação com a densidade relativa aparente do carvão vegetal, conforme verificado pela equação do modelo linear, cujo R^2 foi de 0,70 (Figura 41), e por este motivo, quanto maior a densidade da madeira, maior a massa de carvão para um determinado volume, maior o conteúdo de CF e maior a densidade energética (SANTOS et al., 2011; VIEIRA et al., 2019), sendo produzido biorredutor de maior resistência mecânica e rendimento gravimétrico e melhor qualidade para o uso siderúrgico e residencial (PROTÁSIO et al., 2015; SIMETTI et al., 2018b; ABREU NETO et al., 2020).

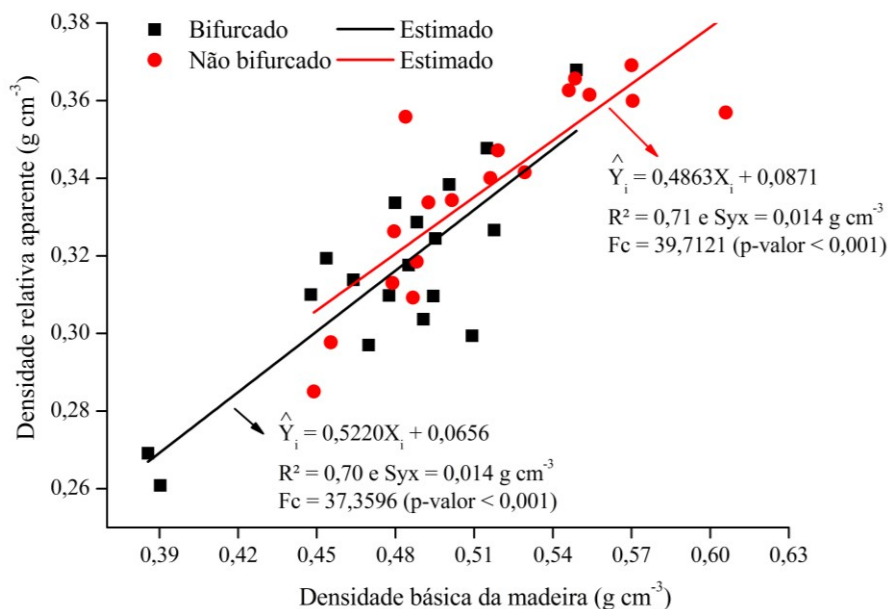


Figura 41. Correlação da densidade relativa aparente do carvão vegetal e densidade básica da madeira (g cm^{-3}) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

A variação da DRA do carvão vegetal de *T. vulgaris* pode ser considerada satisfatória para a finalidade energética, visto que os valores estão de acordo com o registrado para a madeira de *E. grandis* e *E. saligna*, aos 6 anos de idade, ambos testados como fonte de bioenergia, no estado do Rio de Janeiro, nos quais foram reportados valores médios de $0,340$ e $0,320 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente (DIAS JÚNIOR et al., 2016) e de *E. urograndis*, também aos 6 anos de idade, plantado na região Sul do Tocantins, no qual foi produzido carvão vegetal de $0,350 \text{ g cm}^{-3}$ de DRA (MARCHESAN et al., 2019), revelando o potencial do carvão vegetal de *T. vulgaris* para a finalidade energética.

O teste F ($p < 0,05$) revelou efeito significativo do tipo de fuste sobre a DRA. As árvores de fustes não bifurcados apresentaram maior DRA ($0,338 \text{ g cm}^{-3}$ a), enquanto que os fustes bifurcados proporcionaram carvões menos densos ($0,316 \text{ g cm}^{-3}$ b) (Figura 42).

A bifurcação produziu carvão vegetal de menor densidade aparente em todos os espaçamentos de plantio, o que representa um decréscimo médio de 7%, quando comparado aos valores dos fustes não bifurcados (Figura 42).

O efeito negativo da bifurcação sobre a DRA do carvão vegetal está intimamente associado ao mesmo efeito verificado para a madeira, uma vez que estas duas propriedades estão fortemente correlacionadas, conforme já mencionado acima. Este resultado indica que devem ser evitadas árvores bifurcadas no momento da colheita de *T. vulgaris* quando a finalidade for a energética.

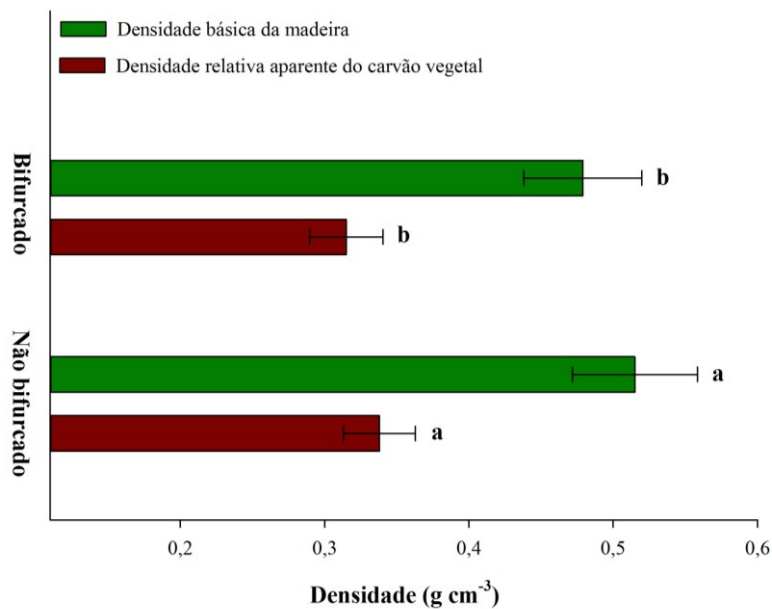


Figura 42. Densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão vegetal (g cm⁻³) em fustes bifurcados e não bifurcados de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

O teste F ($p < 0,05$) revelou efeito significativo do espaçamento de plantio sobre o consumo específico de madeira. Verificou-se relação positiva do espaçamento de plantio com o consumo específico de madeira, sendo os dados melhor explicados por um modelo quadrático, com tendência de diminuição nos espaçamentos mais amplos, exceto para o espaçamento de 10,5 m², conforme verificado na equação do modelo ($R^2=0,94$, $F_c=6,05$ e $p=0,0337$) (Figuras 43).

Os valores variaram de 5,5 a 6,7 m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal, com menor valor no espaçamento de 12,0 m² (5,5 m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal) e os maiores nos espaçamentos de 4,5 m² e 6,0 m² (6,6 e 5,9 m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal, respectivamente), o que corresponde a reduções de 17 e 7%, respectivamente, quando comparado ao espaçamento de 12,0 m² (Figura 43).

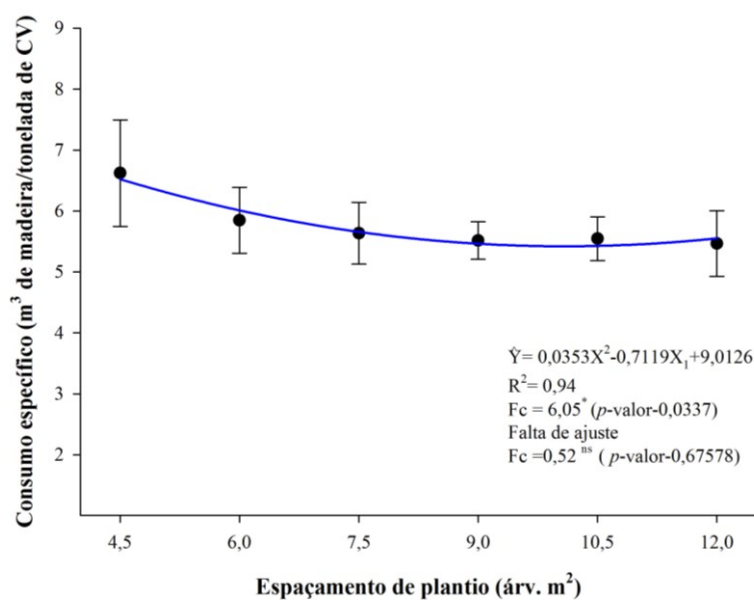


Figura 43. Consumo específico (m³ de madeira por tonelada de carvão vegetal) de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

O consumo específico indica a quantidade de madeira (m³) necessária para a produção de 1 t de carvão vegetal. Portanto, madeiras com menor consumo específico são biomassas preferíveis, pois reduzem demandam menos volume de matéria-prima para a produção de uma tonelada de carvão vegetal. O menor consumo específico indica menor volume de madeira a ser transportada e armazenada nos pátios das unidades de produção de carvão vegetal e melhor uso do volume dos fornos de carbonização, reduzindo custos operacionais. O comportamento de redução do consumo específico em função do espaçamento de plantio indica que mesmo em espaçamentos mais reduzidos, o consumo específico tende a ser maior, muito provavelmente devido à menor densidade básica da madeira nestes espaçamentos, já que a densidade básica afeta positivamente a densidade do carvão vegetal e seu rendimento gravimétrico e que madeiras mais densas são consumidas de forma mais lenta durante a pirólise (PEREIRA et al., 2012; RAMOS et al., 2019).

Além disso, o teste F ($p < 0,05$) revelou efeito significativo do tipo de fuste sobre o CE. Os fustes bifurcados apresentaram consumo específico de 6,0 m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal e para os fustes não bifurcados foi encontrado o valor de 5,5 m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal (Figura 44). A bifurcação resultou em maior consumo específico em todos os espaçamentos de plantio, o que representou um aumento médio de 9%, quando comparado aos valores dos fustes não bifurcados (Figura 39).

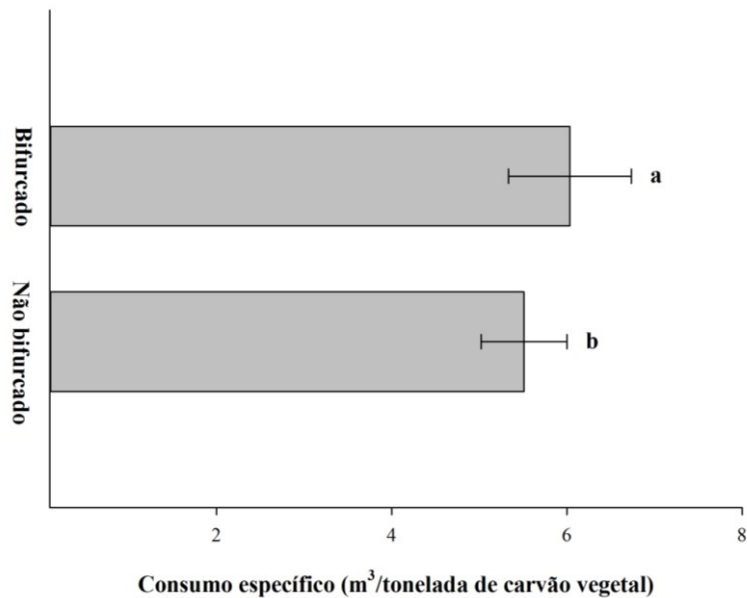


Figura 44. Consumo específico (m³ de madeira/tonelada de carvão vegetal) em fustes bifurcados e não bifurcados de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

O aumento no consumo específico de madeira, aliado à redução da DRA do carvão vegetal, ambos provocados pela bifurcação, reforça os impactos negativos de fustes bifurcados sobre a quantidade e qualidade de madeira de *T. vulgaris* para a geração de bioenergia, revelando que a bifurcação é um aspecto importante a ser evitado no momento da colheita da madeira a fim de garantir carvão vegetal de melhor qualidade.

O teste F ($p < 0,05$) não encontrou significância estatística para o espaçamento de plantio e tipo de fuste para a os RGC, RLP e RGNC (Tabela 12 e Figura 45). Os valores médios entre os espaçamentos de plantio variaram de 35 a 36%, para o RGC, de 45 a 48%, para o RLP, e de 17 a 19%, para o RGNC (Figura 45).

Tabela 12. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC%), em líquido pirolenhoso (RLP%), em gases não condensáveis (RGNC%), materiais voláteis (MV%), cinzas (Cz%), carbono fixo (CF%) e poder calorífico superior (PCSMJ/kg) em fustes bifurcados (BF) e não bifurcados (NB) do fuste de *T. vulgaris* de um plantio experimental aos 7 anos de idade.

Tipo de fuste	RGC	RLP	RGNC	MV	Cz	CF	PCS
BF	35,04±1,2	46,85±1,7	18,11±1,5	26,12±0,7	1,22±0,3	72,66±0,6	30,2±0,1
NB	35,5±1,3	46,25±1,9	18,25±1,4	26,33±0,8	1,21±0,2	72,45±0,8	30,17±0,2

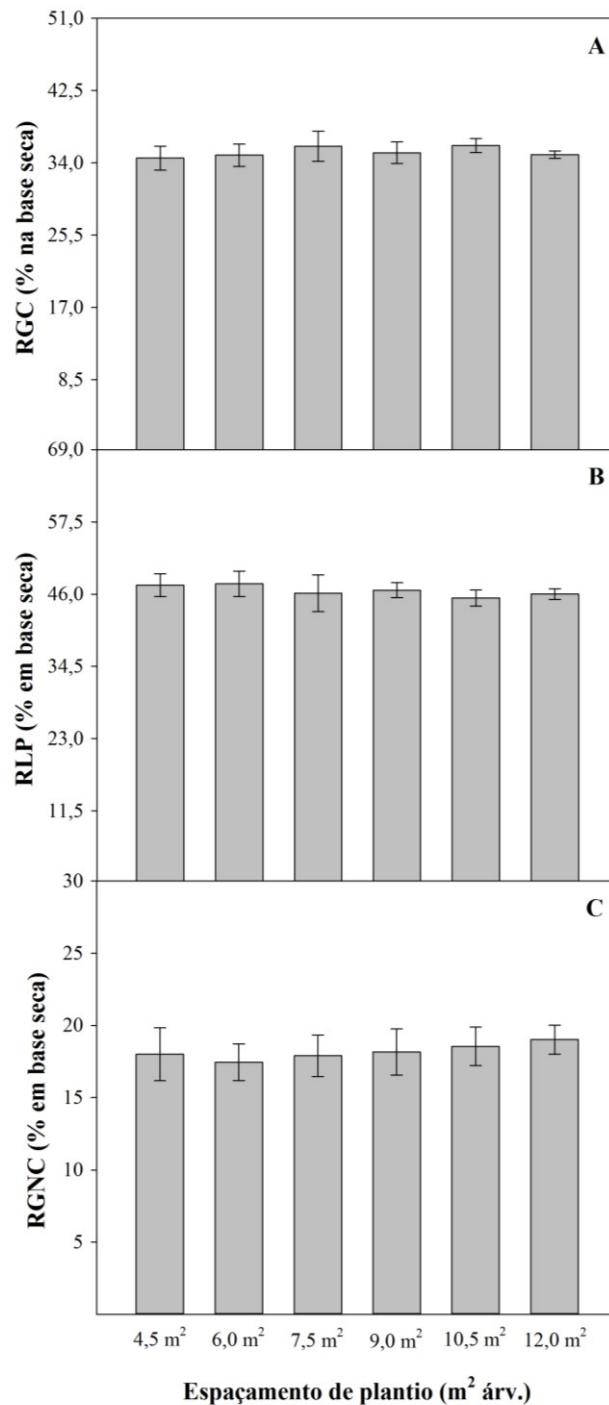


Figura 45. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (RGC%), em líquido pirolenhoso (RLP%) e em gases não condensáveis (RGNC%), calculados na base seca, da madeira de um plantio experimental de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade.

O RGC é diretamente afetado pela temperatura de carbonização e, de modo geral, quanto maior a temperatura de carbonização, menor o RGC e maior o teor de carbono fixo, já que há relação inversamente proporcional entre a temperatura de carbonização e o RGC (VIEIRA et al., 2013; MACHADO et al., 2014; FIGUEIREDO et al., 2018). Maiores rendimentos em carvão são preferidos devido ao maior aproveitamento da

madeira nos fornos de carbonização e, conseqüentemente, maior produção de energia e menores os RLP e RGNC, subprodutos do processo de degradação térmica da madeira (ASSIS et al., 2012; REIS et al., 2012).

O RGC de *T. vulgaris* pode ser considerado satisfatório se comparado aos rendimentos de espécies do gênero *Eucalyptus*, por exemplo, de um híbrido espontâneo de *E. urophylla* e um híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*, aos 7 anos de idade, que apresentaram RGC variando de 35 a 37% (MAGALHÃES et al., 2017), e para a carbonização de *A. mangium*, aos 15 anos de idade, que apresentou valor médio variando de 27 a 31% (ARRUDA et al., 2017). O rendimento gravimétrico em carvão vegetal de *T. vulgaris* é superior ao encontrado para as espécies *Sclerolobium paniculatum* (antiga nomenclatura do *T. vulgaris*) e *Qualea grandiflora*, aos 7 anos de idade, que apresentaram valores médios de RGC de 30 e 26%, respectivamente (TERRA, 2017) e inferior aos 37% do carvão vegetal de *Piptadenia gonoacantha*, espécie arbórea nativa utilizada para a produção de carvão vegetal e queima direta (DAMÁSIO et al., 2013).

O líquido pirolenhoso e os gases não condensáveis são subprodutos do processo de pirólise lenta, na qual o primeiro é o produto condensável da carbonização e o segundo a parte volátil, sendo as concentrações de ambos fortemente associadas à composição química da madeira. Em geral, biomassas com altos teores de celulose e hemiceluloses apresentam maiores teores de líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, devido à baixa resistência à degradação térmica destes constituintes (OLIVEIRA, et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2014). De modo geral, o carvão vegetal de *T. vulgaris* aos 7 anos de idade tem valores de RLP e RGNC dentro do observado na literatura, cuja variação é de 39 a 45%, para o RLP, e de 20 a 22%, para o RGNC (TRUGILHO et al., 2001; DIAS JÚNIOR et al., 2015).

O carvão vegetal de *T. vulgaris* apresenta maiores e menores valores de RLP e RGNC, respectivamente, quando comparado ao carvão vegetal da espécie *Anadenanthera peregrina*, aos 5 anos de idade, cuja madeira apresenta boa qualidade para a produção de lenha e carvão vegetal, especialmente pela alta densidade básica e teor de lignina, cujos valores médios de RLP e RGNC foram de 42 e 22%, respectivamente (SOUZA et al., 2019) e menor e maior valores, respectivamente, em comparação ao carvão vegetal de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade, cujos valores variaram de 47 a 48%, para o RLP, e de 17 a 18%, para o RGNC (ARANTES et al., 2013).

O teste F ($p < 0,10$) não encontrou significância estatística do espaçamento de plantio e tipo de fuste para os teores de MV, Cz, CF e PCS e do espaçamento para o PMCV e IMACV. Os valores médios foram de 26, 1,22 e 73%, para MV, Cz e CF,

respectivamente, de 30 MJ/kg, para o PCS, de 26 t ha⁻¹, para a PMCV, e de 3,4 t ha⁻¹ ano⁻¹, para o IMACV (Tabela 13).

Tabela 13. Composição imediata (%), poder calorífico superior (MJ/kg) e incremento médio anual em carvão vegetal (t ha⁻¹ ano⁻¹) do carvão vegetal de *T. vulgaris* em um plantio experimental aos 7 anos de idade.

Espaçamento de plantio (m ²)	MV (%)	Cz (%)	CF (%)	PCS (MJ/Kg)	PMCV (t ha ⁻¹)	IMACV (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)
4,5 m ²	26,04±0,61	1,14±0,16	72,82±0,51	30,25±0,08	25,26±3,99	3,31±0,52
6,0 m ²	26,29±0,92	1,14±0,32	72,57±0,75	30,20±0,13	25,38±4,67	3,33±0,61
7,5 m ²	26,57±0,93	1,34±0,25	72,1±0,95	30,08±0,19	23,96±4,67	3,14±0,61
9,0 m ²	26,48±0,55	1,18±0,09	72,34±0,53	30,15±0,10	27,70±2,69	3,63±0,35
10,5 m ²	25,97±0,79	1,20±0,38	72,83±0,90	30,24±0,20	24,90±5,31	3,26± 0,70
12,0 m ²	26,03±0,51	1,31±0,25	72,66±0,51	30,19±0,11	26,95±2,13	3,53±0,28
CV ₁	3,89	20,25	1,34	0,6	10,88	11,9
CV ₂	1,73	20,94	0,72	0,41		

O teor de MV, que consiste na quantidade de matéria volátil residual do carvão vegetal, e o teor de CF, correspondente ao carbono que forma a massa amorfa, devem estar em concentrações baixas e altas, respectivamente, de modo a resultar em uma queima mais lenta e, conseqüentemente, aumentar o tempo de residência na fornalha para a queima total (CAMPOS, 2008; BRAND et al., 2010). Quanto ao teor de Cz, assim como para a madeira, quanto menor a concentração no carvão vegetal maior será o poder calorífico e menores serão os desgastes do refratário, incrustação das paredes do alto forno, aumento no consumo de carvão e melhor a qualidade energética do carvão vegetal (VALE et al., 1996; TRUGILHO et al., 1997). Os valores destas três propriedades podem ser considerados satisfatórios para a produção de carvão vegetal, se comparado ao verificado para dois clones híbridos de *E. urophylla* e *C. citriodora*, aos 7 anos de idade, que apresentaram valores variando de 15 a 40% de MV, 0,51 a 1,39% de Cz, e 59 a 73% de CF (COUTO et al., 2015).

Assim como para a madeira, quanto maior o poder calorífico do carvão vegetal, melhor será sua qualidade para a queima total nos altos fornos siderúrgicos, sendo os valores verificados para o carvão vegetal de *T. vulgaris* satisfatórios quando comparados ao valores verificados para 18 materiais genéticos de *Eucalyptus*, com idade entre 3 e 7 anos, nos quais foram encontrados variação foi de 30 a 32 MJ/kg (CASTRO et al., 2013). O IMACV do *T. vulgaris* é inferior ao verificado para o carvão vegetal de híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, aos 7 anos de idade, cuja variação foi de 5,1 a 6,2 t ha⁻¹ ano⁻¹ (ROCHA et al., 2017).

7. CONCLUSÕES

A ausência de efeito significativo do espaçamento de plantio para o crescimento e produtividade, aos 8 e 9 anos de idade, é uma característica importante para a seleção de materiais genéticos de *T. vulgaris* visando ao estabelecimento de plantios homogêneos por possibilitar a escolha de espaçamentos de plantio mais amplos, sem que haja prejuízos a estes parâmetros, e reduzir custos operacionais relacionados à implantação, colheita e transporte, sendo o espaçamento de 3 x 3 m o mais recomendado para plantios homogêneos da espécie.

A alta variabilidade genética do plantio de *T. vulgaris*, o qual é de origem seminal, foi fundamental para a ausência de significância estatística de vários parâmetros avaliados, especialmente os de crescimento, a relação cerne/alburno e a composição química da madeira.

A densidade básica da madeira é um bom parâmetro a ser considerado na seleção de materiais genéticos de *T. vulgaris* por ter apresentado comportamento diferenciado nos espaçamentos de plantio, o que permite a escolha de espaçamentos mais amplos e, principalmente, por ter influenciado diretamente na densidade relativa aparente do carvão vegetal.

As análises de densitometria de raios X são importantes para o detalhamento mais preciso da qualidade da madeira de *T. vulgaris*, sendo, de modo geral, a densidade relativa a 12% de umidade o parâmetro mais preciso para a explicação das variações da densidade básica da madeira em comparação aos demais parâmetros obtidos por esta técnica.

O plantio homogêneo de *T. vulgaris* aos 7 e 8,5 anos de idade apresenta parâmetros satisfatórios de qualidade da madeira (densidade básica, relação cerne/alburno, teores de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico) e carvão vegetal (densidade relativa aparente, consumo específico de madeira, rendimentos da carbonização, composição química e produtividade).

A bifurcação provocou efeitos negativos ao reduzir a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão vegetal e aumentar o consumo específico de madeira, sendo, portanto, um aspecto que deve ser evitado/controlado nos plantios homogêneos de *T. vulgaris* com vistas a reduzir os custos operacionais de manutenção, colheita e transporte, bem como a diminuição da qualidade da madeira e do carvão vegetal.

8. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Este estudo apresenta resultados científicos importantes para o crescimento e qualidade da madeira e carvão vegetal de *T. vulgaris* que contribuem para a silvicultura da espécie e o seu estabelecimento em plantios homogêneos em escala comercial para fins energéticos. No entanto, algumas recomendações devem ser consideradas para estudos e experimentos futuros:

Avaliar o estabelecimento, bem como o crescimento e a produtividade dos plantios da espécie em espaçamentos mais amplos, de preferência nos espaçamentos de 9,0 m² e 12,0 m², que possibilitarão maior crescimento e produtividade, maior densidade básica da madeira, maior densidade relativa aparente do carvão vegetal, além de não comprometer significativamente os demais parâmetros de qualidade e reduzir custos operacionais.

Adotar a prática silvicultural da desrama em árvores bifurcadas nos primeiros anos de estabelecimento dos plantios, de modo a garantir a produção de madeira e, conseqüentemente, de carvão vegetal de melhor qualidade, e avaliar se a desrama tem impactos sobre a qualidade da madeira e desenvolvimento dos fustes.

Aprofundar os estudos de densitometria de raios X visando ao detalhamento com maior precisão da qualidade do lenho da espécie, bem como estabelecer correlações dos parâmetros desta técnica com os demais parâmetros da madeira e carvão vegetal.

Compreender a origem e o efeito da bifurcação das árvores de *T. vulgaris* no desempenho do plantio e nos indicadores de qualidade do lenho para a finalidade energética.

Analisar detalhadamente as variações na composição química da madeira e sua influência na qualidade e produção de carvão vegetal de *T. vulgaris* em idades mais avançadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: Madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6922**: carvão vegetal: ensaios físicos de determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981b. 2p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6923**: Carvão vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro, 1981a. 15p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112**: Carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 8 p.
- ABREU NETO, R.; ASSIS, A. A.; BALLARIN, A. W.; HEIN, P. R. G. Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. **SN Applied Science**, v. 2, p. 1020, 2020.
- AGUIRRE, I.; GRIESSACHER, T.; RÖSLER, G.; ANTREKOWITSCH, J. Production of charcoal as an alternative reducing agent from agricultural residues using a semi-continuous semi-pilot scale pyrolysis screw reactor. **Fuel Processing Technology**, v. 106, p. 114-121, 2013.
- AHMED, A. K. M.; FU, Z.; DING, C.; JIANG, L.; HAN, X.; YANG, A.; MA, Y.; ZHAO, X. Growth and wood properties of a 38-year-old *Populus simonii* x *P. nigra* plantation established with different densities in semi-arid areas of northeastern China. **Journal of Forestry Research**, doi.org/10.1007/s11676-019-00887-z, 2019.
- AKERS, M. K.; KANE, M.; ZHAO, D.; TESKEY, R. O.; DANIELS, R. F.; Effects of planting density and cultural intensity on stand and crown attributes of mid-rotation loblolly pine plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 468-475, 2013.
- ALMEIDA, M. N. F.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; LOUSADA, J. L. P. C.; SILVA, M. E. C. M.; CÂMARA, A. P.; ROCHA, S. M. G.; OLIVEIRA, J. C. L.; CAMPOE, O. C.; CARNEIRO, R. L. C.; ALVARES, C. A.; TOMAZZELO-FILHO, M.; FIGUEIREDO, F. M. F.; OLIVEIRA, R. F. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117743, 2020.
- AMARAL, A. C. B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 6, n. 11, p. 17- 23, 1998.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; GUIMARÃES NETO, R. M.; ROCHA, M. F. V.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-9, 2018.

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

ARRUDA, E. L.; ANDRADE, A. M.; DIAS JÚNIOR, A. F. Produção e ativação do carvão vegetal de três espécies florestais. **Floresta**, v. 47, n. 3, p. 323-332, 2017.

ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, M. R.; BIANCHI, M. L. Efeito da aplicação de nitrogênio na produção e qualidade da madeira e carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. e00117914, 2018.

ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 3, p. 519-536, 2016.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASTM - American Society for Testing Materials. **D 1762 - 84**: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2007. 2p.

BAR-NESS, Y. D.; KIRKPATRICK, J. B.; McQUILLAN, P. B. Crown structure differences and dynamics in 100-year-old and old-growth *Eucalyptus obliqua* trees. **Australian Journal**, v. 75, n. 2, p. 120-129, 2012.

BAROTTO, A. J.; MONTEOLIVA, S.; GYENGE, J.; MARTÍNEZ-MEIER, A.; FERNÁNDEZ, M. E. Functional relationships between wood structure and vulnerability to xylem cavitation in races of *Eucalyptus globulus* differing in wood density. **Tree Physiology**, v. 38, p. 243-251, 2018.

BENIN, C. C.; WATZLAWICK, L. F.; HILLING, E. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1375-1384, 2017.

BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V.B.; CREMONEZ, P.A.; FRIGO, E.P.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365-2378, 2018.

BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; BREHMER, D. R.; KUSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 88, p. 619-628, 2010.

BRAND, M. A.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, M. S.; ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015.

BRIENZA JÚNIOR, S.; OLIVEIRA, R. P.; DENICH, M.; VLEK, P. L. G. Plantio de árvores de crescimento rápido para recuperação de áreas agrícolas na Amazônia Oriental brasileira: avaliações de sobrevivência e produções de milho e mandioca. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 347-353, 2011.

BRITO, A. S.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. G. M.; RODRIGUES, B. P.; CARNEIRO, A. C. O. Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, p. e20180378, 2019.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. IPEF, Piracicaba,.6p. (Circular técnica nº 181). 1993.

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

BUCKLEY, G.; SLATER, D.; ENNOS, A. R. Angle of inclination affects the morphology and strength of bifurcations in hazel (*Corylus avellana* L.). **Arboricultural Journal**, v. 37, n. 2, p. 99-112, 2015.

CAMARA, A. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BOBADILHA, G. S.; VIDAURRE, G. B.; TOMMASIELLO FILHO, M.; SOLIMAN, E. P. Physiological disorders affecting dendrometric parameters and eucalyptus wood quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, p. 27-34, 2018.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus*: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2008.

CANÁDAS, A.; RADE, D.; ZAMBRANO, C.; MOLINA, C.; ARCE, L. Evaluación y manejo de fuentes semilares de Teca (*Tectona grandis* Linn. f.) em la Estación Experimental Tropical Pichilnue, Ecuador. **Avances en Ciencias e Ingenierías**, v. 5, n. 1, p. 64-75, 2013.

CARDOSO, D. J.; LACERDA, A. E. B.; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZÚ, M. C.; LIMA, R. T. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 761-769, 2013.

CARDOSO, S.; PEREIRA, H. Characterization of Douglas-fir grown in Portugal: heartwood, sapwood, bark, ring width and taper. **European Journal of Forest Research**, v. 136, p. 597-607, 2017.

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

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRO, C. G.; SILVA, C. M. S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 473-480, 2016.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; SILVA, C. M. S. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 3, p. 127-135, 2017.

CARPANEZZI, A. A.; MARQUES, L. C. T.; KANASHIRO, M. **Aspectos ecológicos e silviculturais de taxi-branco da-terra-firme (*Sclerobium paniculatum* Vogel)**. Curitiba: EMBRAPA–URPFCS, 1983. 8p. (EMBRAPA URPFCS. Circular Técnica, 8).

CARVALHO, P. E. R. **Taxi-branco**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 11 p. (Embrapa Florestas. Circular técnica, 111).

CASSIDY, M.; PALMER, G.; SMITH, R. G. B. The effects of wide initial spacing on wood properties in plantation grown *Eucalyptus pilularis*. **New Forests**, v. 44, p. 919-936, 2013.

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J.; BRAVO, F. Variation in carbon concentration and basic density along stems of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in the Cantabrian range (NW Spain). **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 6, p. 663-672, 2012.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e no carvão**. 2011. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

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

CASTRO, A. W. V.; FARIAS NETO, J.T.; CAVALCANTE, E. S. Efeito do espaçamento na produtividade de biomassa de taxi-branco (*Sclerobium paniculatum* Vogel). **Acta Amazônica**, v. 28, p. 141-146, 1998.

CASTRO, C. E. C.; SILVA, P. H. M.; ARAÚJO, M. J.; MIRANDA, A. C.; MORAES, M. L. T.; PAULA, R. C. Adaptabilidade, estabilidade e produtividade de progênies de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 118, p. 157-166, 2018.

CASTRO, V. R.; CHAMBI-LEGOAS, R.; TOMMASIELLO FILHO, M.; SURDI, P.; G.; ZANUNCIO, J. C.; ZANUNCIO, A. J. V. The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-9, 2020.

CASTRO, V. R.; SURDI, P. G.; SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAIX, G.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1017-1027, 2017.

CEN - European Committee for Standardization. **EN 14918**: Solid biofuels – Determination of calorific value. Brussels, 2009, 60p.

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

CORDERO, T.; MARQUEZ, F.; RODRIGUEZ-MIRASOL, J.; RODRIGUEZ, J. J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. **Fuel**, v. 80, n. 11, p. 1567-1571, 2001.

CORNELIUS, J. P.; The effectiveness of pruning in mitigating *Hypsipyla grandella* attack on young mahogany (*Swietenia macrophylla* King) trees. **Forest Ecology and Management**, v. 148, p. 287-289, 2001.

COSTA, K.C.P.; LIMA, R. M. B.; FERREIRA, M.J. Biomass and energy yield of leguminous trees cultivated in Amazonas. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 705-712, 2015.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Wood quality of five species from cerrado for production of charcoal. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.

COUTO, A. M.; PROTÁSIO, T. P.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Longitudinal alternative sampling for determination of the basic density in *Eucalyptus* sp. clones. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 184-193, 2012.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; TSUKAMOTO, A. A.; BARCELLOS, D. C.; FONSECA, E. M. B.; CORRÊA, M. R. Avaliação de reflorestamento para produção de biomassa. **Revista da Madeira**. Edição nº88, Março, 2005.

DAHLE, G. A.; GRABOSKY, J. C. Allometric patterns in *Acer platanoides* (Aceraceae) branches. **Trees Structure and Function**, v. 24, p. 321–326, 2010.

DAMÁSIO, R. A. P.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOSO, M. T.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L. M. 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.

DEBELL, J. D.; LACHENBRUCH, B. Heartwood/sapwood variation of western redcedar as influenced by cultural treatments and position in tree. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2026-2032, 2009.

DEMIRBAS, A. Determination of calorific values of bio-chars and pyro-oils from pyrolysis of beech trunkbarks. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 72, p. 215-219, 2004.

DEMIRBAS, A. 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.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; BRITO, J. O.; MILAN, M. Desdobramento da função de qualidade (QFD) na avaliação da qualidade do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 262-270, 2015.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F. Pyrolysis and wood by-products of species from the Brazilian semi-arid region. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, p. 65-75, 2018.

DIAS JÚNIOR, A. F.; COSTA JÚNIOR, D. S.; ANDRADE, A. M.; OLIVIERA, E.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O. Quality of *Eucalyptus* wood grown in Rio de Janeiro State for bioenergy. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 435-442, 2016.

DOBNER Jr. M.; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 465-485, 2018.

DOMEC, J. C.; GARTNER B. L. Cavitation and water storage capacity in bole xylem segments of mature and young Douglas-fir trees. **Trees**, v. 15, p. 204–214, 2001.

DUFOURNY, A.; DE STEENE, L. V.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 137, p. 1-13, 2019.

DVORAK, W. S. E.; KIETZKA, G. R.; HODGE, A.; NEL, G. A. D.; SANTOS, A. N. D. C.; GANTZ. Assessing the potential of *Pinus herrerae* as a plantation species for the subtropics. **Forest Ecology and Management**, v. 242, n. 2, p. 598 – 605, 2007.

EL-JUHANY, L. I. Evaluation of some wood quality measures of eight-year-old *Melia azedarach* trees. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 35, p. 165-171, 2011.

ELOY, E.; SILVA, D. A.; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q.; BEHLING, A.; ELLI, E. F.; MONTEIRO, G. C. Caracterização da biomassa da madeira e da casca de *Mimosa scabrella* Benth cultivada em dois diferentes espaçamentos. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 1, p. 38-46, 2015.

ELOY, E.; SILVA, D. A.; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; CARON, B. O.; ELLI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 749-758, 2016.

ENNOS, A. R.; VAN CASTEREN, A. Transverse stresses and modes of failure in tree branches and other beams. **Proceeding of the Royal Society B**, v. 277, p. 1253–1258, 2010.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2017. **Balço Energético Nacional 2017: Ano Base 2016**. Rio de Janeiro: EPE; 2017. 296 p.

ERASMUS, J.; KUNNEKE, A.; DREW, D. M.; WESSELS, B. The effect of planting spacing on *Pinus patula* stem straightness, microfibril angle and wood density. **Forestry**, v. 91, n. 3, p. 247-258, 2018.

EUFRADE-JUNIOR, H.; GUERRA, S. P. S.; SANSÍGOLO, C. A.; BALLARIN, A. W. Management of *Eucalyptus* short-rotation coppice and its outcome on fuel quality. **Renewable Energy**, v. 121, p. 309-314, 2018.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forestry production and trade**. 2017. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 02 Abr 2019.

FARIAS, J.; MARIMON, B.; SILVA, L.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MORANDI, P.; MARIMON JUNIOR, B. H. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* x *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 scrabella*, Benth) e aspectos gerais de combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. 14p. (Série Técnica).

FAXITRON X-RAY. **Model LX-60 technical manual**. Lincolnshire, 2009. 82 p.

FERREIRA, G. W. Qualidade da celulose Kraft-antraquinona de *Eucalyptus dunnii* plantado em cinco espaçamentos em relação ao *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Ciência Florestal**, v. 7, n. 1, p. 41-63, 1997.

FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, G. G. C.; CASTRO, A. F. N. M.; COSTA, S. E. L.; PIMENTA, A. S. Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations developed in Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, e410504, 2017.

FIGUEIREDO, M. E. O.; LONGUE JÚNIOR, D.; PEREIRA, A. K. S.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S. Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (madeira-nova) para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 420-431, 2018.

FREITAS, T. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; VIDAURRE, G. B.; LIMA, J. L. Environmental effect on growth and characteristics of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. e20160302, 2019.

FRIEDERICHS, G.; BRAND, M. A.; CARVALHO, A. F.; KUSTER, L. C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de bracatinga (*Mimosa scabrella*). **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 79-87, 2015.

FUJIMOTO, T.; KOGA, S. An application of mixed-effects model to evaluate the effects of initial spacing on radial variation in wood density in Japanese larch (*Larix kaempferi*). **Journal of Wood Science**, v. 56, p. 7-14, 2010.

GENG, A.; YANG, H.; CHEN, J.; HONG, Y. Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 192-200, 2017.

GONÇALVES, D. A.; BRIENZA JÚNIOR, S.; MOURÃO JÚNIOR, M.; GALEÃO, R. R.; TONINI H.; FERREIRA, L. M. M.; LIMA, R. M. B.; SOUZA, C. R.; GUEDES, M. C.; SOUSA, V.; BALIEIRO, E. M. Taxi Branco (*Sclerolobium paniculatum* Vogel): Uma espécie leguminosa nativa com uso potencial em florestas. IN: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS. **Anais...** Belo Horizonte: Embrapa, 2009.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J-P.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 45-61, 2004.

GORSKOVA, T. A.; NIKOLOVSKI, N.; FINAEV, D. N. Plant cell wall is a stumbling stone for molecular biologists. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 52, n. 3, p. 392-409, 2005.

GOULART, S. L.; MORI, F. A.; RIBEIRO, A. O.; COUTO, A. M.; ARANTE, M. D. C.; MENDES, L. M. Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de barbatimão [*Stryphnodendron adstringens* Coville] de bioma cerrado. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 59-66, 2012.

GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; COLODETTE, J. L.; BIANCHI, M. L.; SORAGI, L. C.; OLIVEIRA, A. C. Relationship among wood characteristics and *Eucalyptus* cellulose pulp with the non-destructive methods in the living tree. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011.

GRIESSACHER, T.; ANTREKOWITSCH, J.; STEINLECHNER, S. Charcoal from agricultural residues as alternative reducing agent in metal recycling. **Biomass and Bioenergy**, v. 39, p. 139-146, 2012.

GUIMARÃES, Z. T. M.; SANTOS, V. A. H. F.; NOGUEIRA, W. L. P.; MARTINS, N. O. A.; FERREIRA, M. J. Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed area. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 618-628, 2018.

HARRINGTON, T. B.; HARRINGTON, C. A.; DEBELL, D. S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationship of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 18-25, 2009.

HÉBERT, F.; KRAUSE, C.; PLOURDE, P-Y.; ACHIM, A.; PRÉSENT, G.; MÉNÉTRIER, J. Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old *Pinus banksiana* plantation in the boreal forest of Quebec. **Forests**, v. 7, 12, p. 276, 2016.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, v. 29, n. 6, p. 1793- 1797, 2009.

HUGHES, J. F.; SARDINHA, R. M. A. The application of optical densitometry in the study of wood structure and properties. **Journal of Microscopy**, Oxford, v. 104, n. 1, p. 91-103, 1975.

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 2.ed. New York: Ronald Press, 1972. 417p.

IBA – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2018. Brasília, 2019.

IMAM, T.; CAPAREDA, S. Characterization of bio-oil, syn-gas and bio-char from switchgrass pyrolysis at various temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 170-177, 2012.

IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change. **Good practices guidance for land use, land-use change and forestry**. 2003.

JARDIM, J. M.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, E. V. S.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S. Equações para estimar a composição química e o poder calorífico de biomassas tratadas termicamente a partir da análise colorimétrica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 1628-1636, 2016.

JOHNSON, I. G. Growth and form of *Eucalyptus nitens* progenies in New South Wales, and selection strategies for a seedling seed orchard. **Australian Journal**, v. 59, n. 4, p. 162-170, 1996.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Agrária**, v. 12, n. 3, p. 386-390, 2017.

JUNGNIKL, K.; GOEBBELS, J.; BURGERT, I.; FRATZL, P. The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions. **Trees**, v. 23, n. 3, p. 605-610, 2009.

KANE, B.; FARRELL, R.; ZEDAKER, S. M.; LOFERSKI, J. R.; SMITH, D. W. Failure mode and prediction of the strength of branch attachments. **Arboriculture and Urban Forestry**, v. 34, n. 5, p. 308-3016, 2008.

KNAPIC, S.; PIRRALHO, M.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. **Wood Science and Technology**, v. 48, p. 37-49, 2014.

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 251-261, 2015.

LEITE, H. L.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Relações hídricas e crescimento de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado. **Revista Árvore**, v. 22, n. 1, p. 41-50, 1998.

LIMA, R. M. B. **Crescimento do *Sclerolobium paniculatum* Vogel na Amazônia, em função de fatores de clima e solo**. 2004. 194 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LIMA, R.; INOUE, M. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARAUJO, A. J.; MACHADO, S. A. Efeito do espaçamento no desenvolvimento volumétrico de *Pinus taeda* L. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 223-230, 2013.

LIU, T.; SONG, F.; LIU, S.; ZHU, X. Canopy structure, light interception, and photosynthetic characteristics under different narrow-wide planting patterns in maize at silking stage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 4, p. 1249-1261, 2011.

LIU, T.; WANG, Z.; CAI, T. Canopy apparent photosynthetic characteristics and yield of two spike-type wheat cultivars in response to row spacing under high plant density. **PLoS One**, v. 11, n. 2, e0148582, 2016.

LOPES, E. D.; LAIA, M. L.; SANTOS, A. S.; SOARES, G. M.; LEITE, R. W. P.; MARTINS, N. S. Influência do espaçamento de plantio na produção energética de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 95-104, 2017.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 2. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002. v. 2. 384 p.

LOUREIRO, B. A.; VIEIRA, T. A. S.; COSTA, L. J.; SILVA, A. B.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas, Ciencia y Tecnologia**, v. 21, n. 4, p. 619-630, 2019.

MACHADO, G. O.; VOGEL, F.; SILVA, M. M. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal de cinamomo (*Melia azedarah* L.). **Ambiência**, v. 10, n. 1, p. 83-96, 2014.

MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SILVA, C. M. S.; SOUZA, M. M.; FIALHO, L. F. Estimates of mass and energy of different genetic material *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, v. 41, n. 3, e410302, 2017.

MARCHESAN, R.; MENDONÇA, D.; DIAS, A. C. C.; SILVA, R. C.; PEREIRA, J. F.; ALMEIDA, V. C. Quality of *Eucalyptus urograndis* charcoal produced in the southern region of Tocantins. **Floresta**, v. 49, n. 4, p. 691-700, 2019.

MARTORANO, L. G.; TOURNE, D. C. M.; LISBOA, L. S.; SOUSA, V. G.; SANTOS, L. S.; BRIENZA JÚNIOR, S. **Zoneamento Topoclimático do Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L.F.) na Amazônia Legal: Estratégias de Planejamento com Metas de Desenvolvimento Sustentável**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2018. 70 p.

MATOS, J. C. de S.; NEVES, E. J. M.; CANTO, A. do C. Avaliação de nodulação em espécies florestais num latossolo amarelo da Amazônia Ocidental. In: **CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO**, 1.; **CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO**,

7., 1993, Curitiba. Floresta para o desenvolvimento: política, ambiente, tecnologia e mercado: anais. São Paulo: SBS; [S.l.]: SBEF, 1993. v. 2. p.407-410.

McEWAN, A.; MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. The effects of number of stems per stool on cutting productivity in coppiced *Eucalyptus* plantations. **Silva Fennica**, v. 50, n. 2, p. 14, 2016.

MELISSARI, B. Ash related with high alkali and its mitigation – experimental evaluation. **Memoria Investigaciones en Ingeniería**, n. 12, p. 31-44, 2014.

MELO, L. E. L.; SILVA, C. J.; PROTÁSIO, T. P.; MOTA, G. S.; SANTOS, I. S.; URBINATI, C. V.; TRUGILHO, P. F.; MORI, F. A. Planting density effect on some properties of *Schizolobium parahyba* wood. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 3, p. 1-25, 2018.

MIRANDA, I.; GOMINHO, J. PEREIRA, H. Heartwood, sapwood and bark variation in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in 2nd rotation and comparison with the single-stem 1st rotation. **Silva Fennica**, v. 49, p. 1141, 2015.

MMOLOTSI, R. M.; TEKLEHAIMANOT, Z. The effects of initial-planting density on timber and wood-fuel properties of red alder and sycamore. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, p. 1475-1483, 2006.

MOCHIUTTI, S.; MELÉM JUNIOR, N. J. M.; FARIAS NETO, J. T.; CASTRO, A. W. V. Utilização do taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) para recuperação de solos degradados pela agricultura migratória. In: **CONGRESSO BRASILEIRO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS: NO CONTEXTO DA QUALIDADE AMBIENTAL E COMPETITIVIDADE**, 2., 1998, Belém. Resumos expandidos. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1998. 246 p.

MOCHIUTTI, S.; MELÉM JUNIOR, N. J. M.; FARIAS NETO, J. T.; QUEIROZ, J. A. L. **Taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum*): leguminosa arbórea para a recuperação de áreas degradadas pela agricultura migratória**. Macapá: Embrapa Amapá, 1999. 5 p. (Embrapa Amapá. Comunicado Técnico, 28).

MOCHIUTTI, S.; QUEIROZ, J. A. L.; MELÉM JUNIOR, N. J. M. Produção de serapilheira e retorno de nutrientes de um povoamento de taxi-branco e de uma floresta secundária no Amapá. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 52, p. 3-20, 2006.

MODES, K. S.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; TOMAZELLO FILHO, M.; SANTOS L. M. H.; VIVIAN, M. A.; SILVA JÚNIOR, F. G. Morphological and chemical characterization of the wood of *Schizolobium amazonicum* at 14 years of plantation in the state of Rondônia. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 118, p. 271-283, 2018.

MORAES, M. D. A.; SILVA, M. F.; BARBOSA, P. V. G.; MARQUES, R.; SILVA, R. T.; SETTE JUNIOR, C. R. Characterization of *Khaya ivorensis* (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 34-44, 2019.

MORAIS, P. H. D.; LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L.; MORAIS, E. L. C.; JARDIM, C. M. Influência da idade de corte de clones de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na composição química da madeira e polpação kraft. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 237-248, 2017.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; OLIVEIRA, J. G. L.; CAMPINHOS, E.; GOMES, F.; VIDAURRE, G. B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, e00073914, 2017a.

MOULIN, J. C.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 199-208, 2015.

MOULIN, J. C.; ROCHA, M. F. V.; ARANTES, M. D. C.; BOSCHETTI, W. T. N.; JESUS, M. S.; TRUGILHO, P. F. Influência do espaçamento de plantio e irrigação na densidade e na massa seca em espécies de *Eucalyptus*. **Nativa**, v. 5, n. 5, p. 367-371, 2017b.

NARDUCCI, T. S.; YARED, J. A. G.; BRIENZA JÚNIOR, S. Growth and survival of *Sclerolobium paniculatum* Vogel and the relationship between rainfall and the increment in diameter at different planting spacings. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 447-454, 2016.

NASSER, R. A.; SALEM, M. Z. M.; HIZIROGLU, S.; AL-MEFARREJ, H. A.; MOHAREB, A. S.; ALAM, M.; AREF, I. M. Chemical analysis of different parts of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) using ultimate, proximate and thermo-gravimetric techniques for energy production. **Energies**, v. 9, n. 5, p. 374, 2016.

NEVES, T. A.; PROTÁSSIO, T.P.; COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.C.; VIEIRA, C.M.M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais, visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S.; TROSSERO, M. A.; FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A; F; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2015.

NÚÑEZ-RETANA, V. D.; WEHENKEL, C.; VEJA-NIEVA, D. J.; GARCÍA-QUEZADA, J.; CARILLO-PARRA, A. The bioenergetic potential of four Oak species from Northeastern Mexico. **Forests**, v. 10, n. 869, doi.org/10.3390/f10100869, 2019.

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

OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, M. F. V.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R. 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, 2012a.

- OLIVEIRA, B. R. U.; LATORRACA, J. V. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; PALERMO, G. P. M.; CARVALHO, A. M.; PASTRO, M. S. Microdensitometria de raios X aplicada na determinação da variação da densidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 103-112, 2012b.
- OLIVEIRA, I. R. M.; VALE, A.T.; MELO, J.T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C. Biomass and wood characteristics of the *Scherolobium paniculatum* in different levels of fertilization. **Cerne**, v. 14, n. 4, p. 351-357, 2008.
- OLIVEIRA, I. R.; CHAGAS, M. P.; BOUILLET, J-P.; LONGUI, E. L.; LIMA, I. L.; BORDRON, B.; FERREIRA, A. B.; TOMMASIELLO FILHO, M. Effects of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. **Southern Forests**, v. 80, n. 4, p. 311-318, 2017.
- ORELLANA, B. B. M. A.; VALE, A. T.; GONÇALEZ, J.; GUEDES, M. C.; ORELLANA, J. B. P.; LIMA, C. M. Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, p. 773-781, 2018.
- ORTEGA-RODRIGUEZ, D. R.; ANDRADE, G. C.; BELLOTE, A. F. J.; TOMAZELLO FILHO, M. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p. 179-189, 2018.
- ORTEGA-RODRIGUEZ, D. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New Forests**, doi.org/10.1007/s11056-018-09702-9, 2019.
- ÖZDEN, S.; SLATER, D.; ENNOS, R. Fracture properties of green wood formed within the forks of hazel (*Corylus avellana* L.). **Trees**, v. 31, n. 3, p. 903–917, 2017.
- PAES, J. B.; LIMA, C. R.; OLIVEIRA, E.; MEDEIROS NETO, P. N. Características físico-química, energética e dimensões das fibras de três espécies florestais do Semiárido Brasileiro. **Floresta e Ambiente**, doi.org/10.4322, 2013.
- PAGOTTO, M. A.; DESOTO, L.; CARVALHO, A. NABAIS, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; RIBEIRO, A.; LISI, C. S. Evaluation of X-ray densitometry to identify tree-ring boundaries of two deciduous species from semi-arid forests in Brazil. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 94-103, 2017.
- PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M.; CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D. Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. **European Journal of Wood Products**, v. 73, n. 6, p. 775-780, 2015.
- PATUSCO, J. A. M. Eletricidade no balanço energético nacional – R.E.N. **Economia e Energia**, n. 11, 1998.
- PAUMGARTTEN, A. E. A.; BRASIL NETO, A. B.; SOUSA, V. G.; BRIENZA JUNIOR, S.; YARED, J. A. G.; Desempenho silvicultural de *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don sob diferentes espaçamentos no Oeste do Estado do Pará. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 120, p. 701-707, 2018.

PAYN, T.; CARNUS, J.-M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SILVA, L. N.; WINGFIELD, M. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 325, p. 57-67, 2015.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013b.

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

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **Internacional Journal of Forestry Research**, doi:10.1155/2012/523025, 2012.

PEREIRA, G. F.; RIOS, P. D.; BUSS, R.; VIEIRA, H. C.; GRUBERT, W.; CUNHA, A. B.; BELINI, U. L. Painéis de madeira aglomerada de *Eucalyptus badjensis* e *Pinus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 373-382, 2017.

PÉREZ, S.; RENEDO, C. J.; ORTIZ, A.; DELGADO, F.; FERNÁNDEZ, I. Energy potential of native shrub species in northern Spain. **Renewable Energy**, v. 62, p. 79-83, 2014.

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

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; LIMA JUNIOR, P. H.; SILVA, M. M. L. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 801-816, 2015.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão

vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 295-307, out/dez, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; ARAUJO, A. C. C.; BASTOS, T. A.; ROSADO, S. C. S.; PINTO, J. F. N. Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 45, p. 327-341, 2017.

QMS. **Tree ring analyzer users guide - Model QTRS-01X**. Knoxville, 1999. 72 p.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, 2005.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B. L. C. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for metallurgic use. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, e20180435, 2019.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

REN, B.; LIU, W.; ZHANG, J.; DONG, S.; LIU, P.; ZHAO, B. Effects of plant density on the photosynthetic and chloroplast characteristics of maize under high-yielding conditions. **The Science of Nature**, v. 104, n. 3-4, p.12, 2017.

RESENDE, M. D. V.; FANTINI JÚNIOR, M. **Bifurcação e quebra de copa em *Eucalyptus*: efeitos genéticos, ambientais e silviculturais**. Embrapa Florestas, 2001.

RIBEIRO, M. D. S. B.; JORGE, L. A. B.; MISCHAN, M. M.; SANTOS, A. L.; BALLARIN, A. W. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 31-45, 2017.

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

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARDOSO, M. T.; HEIN, P. R. G. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 28, n. 3, p. 243-248, 2016.

ROCHA, M. F. V.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; ZANUNCIO, A. J. V.; HEIN, P. R. G. Propriedades energéticas do carvão vegetal em função do espaçamento de plantio. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 2, p. 54-63, 2017.

ROSÁRIO, W. A. S. **Variações da densidade básica do lenho de *Tachigali vulgaris* em diferentes espaçamentos de plantio**. 2019. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, Pará, 2019.

SAMPAIO, P. T. B.; RESENDE, M. D.; V.; ARAÚJO, A. J. Estimativas de parâmetros genéticos e métodos de seleção para o melhoramento genético de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 11, p. 2243-2253, 2000.

SANTOS, A.; SIMOES, R.; TAVARES, M. Variation of some wood macroscopic properties along the stem of *Acacia melanoxylon* R. Br. adult trees in Portugal. **Forest Systems**, v. 22, n. 3, p. 463-470, 2013.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlação 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. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. S. P.; FLEIG, F. D.; CUNHA, T. A. Influência do espaçamento no autodesbaste de povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 119-126, 2015.

SCHWERZ, F.; DOURADO NETO, D.; CARON, B. O.; NARDINI, C.; SGARBOSSA, J.; ELOY, E.; BEHLING, A.; ELLI, E. F.; REICHARDT, K. Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1238-1250, 2020.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal**. Universidade Federal de Lavras. FAPE. Lavras, 1997, 433p.

SCOWCROFT, P. G.; FRIDAY, J. B.; HARAGUCHI, J.; IDOL, T.; DUDLEY, N. S. Poor stem form as a potential limitation to private investment in Koa plantation forestry in Hawaii. **Small-scale Forestry**, v. 9, p. 243-262, 2010.

SEPPÄLÄ, J.; HEINONEN, T.; PUKKALA, T.; KILPELÄINEN, A.; MATTILA, T.; MYLLYVIITA, T.; ASIKAINEN, A.; PELTOLA, H. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. **Journal of Environmental Management**, v. 247, p. 580-587, 2019.

SEREGHETTI, G. C.; LANÇAS, K. P.; SARTORI, M. S.; REZENDE, M. A.; SOLER, R. R. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de

Eucalyptus urophylla x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 257-262, 2015.

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

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131p.

SILVA, A. R.; GONÇALVES, D.A.; SALES, A. Desempenho do tachi-branco em resposta à adubação combinada de fósforo e potássio em Latossolos. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 2, p. 37-48, 2016a.

SILVA, C. J.; VALE, A. T.; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado do Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 63-75, 2015a.

SILVA, D. A.; CHRISTO, E. R.; BELHING, A.; MAYER, S. L. S.; PELANDA, K. A.; SIMETTI, R. Potencial e qualidade da madeira de desbaste de teca para produção de biocombustível. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 299-305, 2015b.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthami* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015c.

SILVA, L. F. G.; LIMA, H. C. Mudanças nomenclaturais no gênero *Tachigali* aubl. (Leguminosae – Caesalpinioideae) no Brasil. **Rodriguésia**, v. 58, n. 2, p. 397-401, 2007.

SILVA, M. E. C. M.; LOUZADA, J. L. P. C. Utilização da microdensitometria por raios X na avaliação qualitativa da madeira de choupo (*Populus x euramericana*.cv I.214). In: **SIMPÓSIO DEL CHOPO**, 1., 2001, Zamora. Proceedings... Zamora, 2001. p. 469-478.

SILVA, M. O. S.; SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R.; GONÇALVES, D. A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacing for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, doi: 10.1007/s11676-019-01068-8, 2019a.

SILVA, R. S.; VENDRUSCOLO, D. G. S.; ROCHA, J. R. M.; CHAVES, A. G. S.; SOUZA, H. S.; MOTTA, A. S.; Desempenho silvicultural de *Tectona grandis* L.f. em diferentes espaçamentos em Cáceres, MT. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 397-405, 2016b.

SILVA, R. T.; SETTE JÚNIOR, C. R.; FRANCO, M. P.; TOMAZELLO FILHO, M. LACLAU, J. P.; CHAIX, G. Disponibilidade hídrica e fertilização mineral nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1168-1179, 2019b.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A. Wood quality of five *Eucalyptus* species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 30, n. 2, p. 175-181, 2018a.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A.; MAYER, S. L. S.; SOUZA, H. P.; MUNIZ, G. I. B. Production of biomass and energy stock for five *Eucalyptus* species. **Ciência da Madeira**, v. 9, n. 1, p. 30-36, 2018b.

SIMÕES, P. H. O.; OLIVEIRA NETO, C.F.; VALE, R. S.; PALHETA, L. F.; PAULA, M. T. Crescimento e qualidade de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima em resposta à fontes e doses de nitrogênio. **Espacios**, v. 37, n. 38, p. 1-29, 2016.

SLATER, D.; BRADLEY, R. S.; WITHERS, P. J.; ENNOS, A. R. The anatomy and grain pattern in forks of hazel (*Corylus avellana* L.) and other tree species. **Trees**, v. 28, n. 5, p. 1437-1448, 2014.

SLATER, D.; ENNOS, R. Determining the mechanical properties of hazel forks by testing their component parts. **Trees**, v. 27, p. 1515–1524, 2013.

SLATER, D.; ENNOS, R. Interlocking wood grain patterns provide improved wood strength properties in forks of hazel (*Corylus avellane* L.). **Arboricultural Journal**, v. 37, n. 1, p. 21-32, 2015.

SMILEY, E. T. Does included bark reduce the strength of codominant stem? **Journal of Arboriculture**, v. 29, n. 2, p. 104-106, 2003.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HOFLE, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de Eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

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

SOUCHIE, F. F.; MARIMON JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; MADARI, B.E.; MARIMON, B.S.; LENZA, E. Carvão pirogênico como acondicionamento para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 811-821, 2011.

SOUZA, V. G.; BRIENZA JUNIOR, S.; BARBOSA, M. G.; MARTORANO, L. G.; SILVA, V. C. **Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima): botânica, ecologia e silvicultura**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 426), 2016. 37p.

SOUZA, C. O.; SILVA, J. G. M.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; DIAS JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, M. P. Pyrolysis of *Anadenanthera peregrina* wood grown in different spacings from a forest plantation in Brazil aiming at the energy production. **Environment, Development and Sustainability**, doi.org/10.1007/s10668-019-00418-0, 2019.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. 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.

SOUZA, N. D.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e

qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.

STALLBAUN, P. H.; BARAÚNA, E. E. P.; MONTEIRO, T.C.; VIEIRA, R.S.; SALES, N. D. L. P.; OLIVEIRA, L. S. Resistência natural da madeira de *Tachigali vulgaris* ao fungo xilófago *Postia placenta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 459-463, 2016.

SURDI, P. G.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; CASTRO, V. R.; ALMEIDA, N. F.; MENDES, R. F.; CHAIX, G.; TOMAZELLO FILHO, M. Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 229-236, 2014.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011b.

TELMO, C.; LOUSADA, J. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 1663-1667, 2011a.

TELMO, C.; LOUSADA, J.; MOREIRA, N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. **Bioresources Technology**, v. 101, p. 3808-3815, 2010.

TERRA, T. D. R. Avaliação físico-química do carvão de cachamorra (*Sclerolobium paniculatum* vogel) e pau-terra de folha larga (*Qualea grandiflora* mart.). **Bioenergia em Revista**, n. 2, p. 120-133, 2017.

TOMASELLI, I.; MARQUES, L. C. T.; CARPANEZZI, A.; PEREIRA, J. C. D. Caracterização da madeira de Taxi-branco-da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum* vogel) para energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 6/7, p. 33-44, 1983.

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

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIN, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas - Ciencia y tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P.; ROQUE, R. M. **Manual de aplicação de densitometria de raios X em amostras de madeira, CRAD e CERD**. Piracicaba, 2005. 32 p.

TONINI, H.; SCHWENGBE, D. R.; MORALES, M. M.; MAGALHÃES, C. A. S.; OLIVEIRA, J. M. F. Crescimento, biomassa e qualidade energética da madeira de *Acacia mangium* em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 7, p. 791-799, 2018b.

TONINI, H.; SCHWENGBER, D. R.; MORALES, M. M.; OLIVEIRA, J. M. F. Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-8, 2018a.

TORRES, C. M. M. E.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; CARNEIRO, A. C. O.; TORRES, C. M. M. E. 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. Densidade básica e estimativa de massa seca e lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, n.5, p.1228-1239, 2009.

TRUGILHO, P. F.; ASSIS, C. O.; MELO, I. C. N. A.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. P.; ARANTES, M. D. C. Energia da biomassa florestal. In: Fabrício Gomes Gonçalves; Roberto Carlos Costa Leles; Wendel Sandro de Paula Andrade. (Org.). Engenharia madeireira: pesquisa e produção. 1ªed.Seropédica: EDUR - Editora da UFRRJ, 2017, v.1, p. 175-199.

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. S.; LIMA, J. T.; NAPOLI, A. Análise elementar da madeira de clones de *Eucalyptus*. **Biomassa e Energia**, v. 5, n. 1, p. 53-58, 2012.

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O.; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. 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. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 104–114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259 -267, 1997.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. 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.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 89, p. 89–95, 2001.

VALE, A. T.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VALE, A. T.; NOGUEIRA, M. V. P.; SILVA, M. A. Rendimento da carbonização qualidade do carvão vegetal de madeiras do cerrado em comparação ao *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 1, p. 93-99, 1996.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An Overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, p. 913-933, 2010.

VENTURIN, N.; CARLOS, L.; SOUZA, P. A.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 629-636, 2014.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C.; VALLE, M. L. A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 365-371, 2012.

VIEIRA, A. C.; SOUZA, N. M.; BARICCATTI, R. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C. Caracterização da casca de arroz para geração de energia. **Revista Varia Scientia Agrárias**, v. 3, n. 1, p. 51-57, 2003.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚNA, E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcarys*. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.

VIEIRA, T. A. S.; CARABINEIRO, S. A. C.; TRUGILHO, P. F. Forestry biomass as energy source in Brazil. **International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources**, v. 19, n. 2, 556013, 2019.

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

VITAL, B. R.; PEREIRA, A. R.; DELLA LUCIA, R. M.; ANDRADE, D. C. **Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivado da região do cerrado de Minas Gerais**. Brasília: IBDF, 1984. p. 41-52.

WATSON, P.; GARNER, C.; ROBERTSON, R.; REATH, S.; GEE, W.; HUNT, K. The effects of initial tree spacing on the fibre properties of plantation-grown coastal western hemlock. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, p. 2460-2468, 2003.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.-U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 26, p. 1-27, 2000.

YAMAMOTO, T.; NAKAMURA, A.; IWAI, H.; ISHII, T.; MA, J. F.; YOKOYAMA, R.; NISHITANI, K.; SATOH, S.; FURUKAWA, J. Effect of silicon deficiency on secondary cell wall synthesis in rice leaf. **Journal of Plant Research**, v. 125, n. 6, p. 771-779, 2012.

YARED, J. A. G. Silvicultura de algumas espécies nativas da Amazônia. **Silvicultura**, v. 12, n. 42, t. 1, p. 119-122, 1990. **Edição dos Anais do Congresso Florestal Brasileiro**, 6., 1990, Campo Grande.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L.; ROCHA, M. F. V. Chemical and energetic characterization of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones subject to wind damage. **Revista Árvore**, v. 43, n. 4, e430401, 2019.