

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

LARISSA GONÇALVES MORAES

**EFEITOS DA BIFURCAÇÃO, ESPAÇAMENTO E IDADE NA QUALIDADE DA
MADEIRA DE *Tachigali vulgaris* PROVENIENTE DE PLANTACÕES
HOMOGÊNEAS PARA GERAÇÃO DE BIOENERGIA NA AMAZÔNIA**

**BELÉM-PA
2022**

LARISSA GONÇALVES MORAES

**EFEITOS DA BIFURCAÇÃO, ESPAÇAMENTO E IDADE NA QUALIDADE DA
MADEIRA DE *Tachigali vulgaris* PROVENIENTE DE PLANTAÇÕES
HOMOGÊNEAS PARA GERAÇÃO DE BIOENERGIA NA AMAZÔNIA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Thiago de Paula Protásio.
Coorientadores: Dr^o. Gabriel de Assis Pereira e
Prof^a. Dr^a. Marcela Gomes Silva.

**BELÉM-PA
2022**

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

M827e Moraes, Larissa Gonçalves Moraes

EFEITOS DA BIFURCAÇÃO, ESPAÇAMENTO E IDADE NA QUALIDADE DA MADEIRA DE
Tachigali vulgaris PROVENIENTE DE PLANTACÕES HOMOGÊNEAS PARA GERAÇÃO DE
BIOENERGIA NA AMAZÔNIA / Larissa Gonçalves Moraes Moraes. - 2022.
98 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio Protásio

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel de Assis Pereira.

1. Bioenergia. 2. Florestas energéticas. 3. Amazônia. 4. Indústria siderúrgica. I. Protásio, Thiago de
Paula Protásio. *orient.* II. Título

CDD 634.909811

LARISSA GONÇALVES MORAES

**EFEITOS DA BIFURCAÇÃO, ESPAÇAMENTO E IDADE NA QUALIDADE DA
MADEIRA DE *Tachigali vulgaris* PROVENIENTE DE PLANTACÕES
HOMOGÊNEAS PARA GERAÇÃO DE BIOENERGIA NA AMAZÔNIA.**

Dissertação apresentada à Universidade Feral 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 30 de agosto de 2022

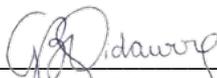
BANCA EXAMINADORA:



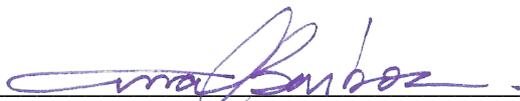
Dr. Thiago de Paula Protásio- Orientador
Universidade Fderal Rural da Amazônia- UFRA



Dr. Lina Bufalino- 1ª Examinadora
Universidade Fderal Rural da Amazônia- UFRA



Dr. Graziela Baptista Vidaurre- 2ª Examinadora
Universidade Federal do Espirito Santo- UFES



Dr. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa- 3ª Examinadora
Universidade Federal de Lavras -UFLA

AGRADECIMENTOS

“Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e dado forças nessa caminhada.”

“À Universidade Federal Rural da Amazônia, por ter sido minha segunda casa nesses sete anos de vida acadêmica. Em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela chance de realização do mestrado.”

“À CAPES pela bolsa concedida nos anos de curso.”

“Ao PROCAD-AMAZÔNIA, pelo suporte acadêmico e financeiro que possibilitaram a realização da minha mobilidade acadêmica.”

“A empresa Jari Celulose S.A pelo suporte operacional na coleta e condução do experimento.”

“À coordenadora do PPGCF-UFRA, Prof^o Dr^a. Lina Bufalino pelo suporte oferecido aos alunos do curso e contribuições durante a execução deste trabalho.”

“Ao Prof^o Dr^o. Mário Tomazello-Filho que disponibilizou a infraestrutura do Laboratório de Anatomia e Identificação da Madeira da Escola Superior de Agricultura – “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), para a realização de análises.”

“Ao meu orientador, Prof^o Dr^o. Thiago Protásio, pela orientação, ensinamentos, conselhos e confiança, durante a execução da dissertação.”

“Ao meu coorientador, Dr^o Gabriel Pereira pela orientação, suporte e companheirismo durante as análises de densitometria de raios-X.”

“Aos meus pais, Antonia de Oliveira Gonçalves e Max Joel da Silva Moraes, por não terem medido esforços para me oferecer as melhores oportunidades e suporte para que eu alcançasse meus objetivos.”

“Ao meu namorado, Lucas Borges de Oliveira pelo companheirismo e compreensão em mais uma etapa importante da minha vida.”

“À minha amiga Kamilla Castro, pelo apoio incondicional. Agradeço por sempre estar comigo.”

“Aos amigos da turma do mestrado que tornaram essa jornada mais leve.”

“À todos que contribuíram direta ou indiretamente na execução deste trabalho, meu muito obrigado.”

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, com que se sintam humildes.”

Leonardo da Vinci

RESUMO GERAL

Nos últimos anos, os estudos sobre a potencialidade de espécies nativas para a composição de plantações com finalidade bioenergética têm ganhado destaque. Entre as espécies investigadas, o *Tachigali vulgaris* apresenta características promissoras para uso alternativo ao *Eucalyptus* na região amazônica. Entretanto, uma problemática observada é a ocorrência de índices significativos de bifurcação em áreas experimentais. O objetivo deste estudo foi de entender os efeitos da bifurcação, idade e espaçamento no padrão de variação da densidade básica e aparente no fuste e, as características dos anéis de crescimento no lenho de *T. vulgaris* proveniente de plantações experimentais para fins energéticos na Amazônia. Foi realizada coleta de material em área de plantação pertencente à empresa Jari celulose S.A., localizada município de Almeirim, na mesorregião do baixo Amazonas, Pará. O experimento foi instalado no ano de 2010 em que foram avaliados 6 espaçamentos distintos (3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m; 3,0 x 2,5 m; 3,0 x 3,0 m; 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m). Foram avaliadas 18 árvores de não bifurcadas e 36 bifurcadas, das quais foram retirados discos de 5 cm de espessura, em posições determinadas de 0%, 1,30 m, 25 %, 50%, 75% e 100% ao longo da altura comercial. A presente dissertação foi dividida em dois capítulos. No primeiro foram avaliadas as variações das densidades básica e relativa aparente ao longo da altura do comercial e as proporções de cerne e alburno à altura do DAP de árvores bifurcadas e não bifurcadas. O segundo apresentou a potencialidade da avaliação da qualidade da madeira de *T. vulgaris* por densitometria de raios-X. Os resultados demonstram que, para a densidade básica, os espaçamentos mais amplos de 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m apresentaram uma maior quantidade de árvores com média DB ($\geq 0,50 \text{ g cm}^{-3}$), variando de 62% a 71%. As médias percentuais de cerne foram de 60,03% $\pm 11,98$ para não bifurcadas e de 61,54% $\pm 11,98$ para as bifurcadas. Os valores de densidade média aparente mostram-se homogêneos desde o início do crescimento nas árvores variando de 0,676 a 0,696 g cm^{-3} nas não bifurcadas e de 0,400 g cm^{-3} a 0,860 g cm^{-3} nas bifurcadas. A largura dos anéis decresceu em função da idade cambial em ambos os tipos de fuste e espaçamentos. Foram observadas maiores porcentagens de lenho inicial em todos os espaçamentos. Em todas as variáveis estudadas o *T. vulgaris* obteve um bom desempenho em relação aos parâmetros desejáveis para destinação a produção de carvão vegetal e potencial para implantação em larga escala, mesmo contendo índices expressivos de bifurcações.

Palavras-chave: Bioenergia. Florestas energéticas. Amazônia. Indústria siderúrgica

ABSTRACT

In recent years, studies on the potential of native species for the composition of plantations for bioenergy purposes have gained prominence. Among the species investigated, *Tachigali vulgaris* shows promising characteristics for alternative use to *Eucalyptus* in the Amazon region. However, a problem observed is the occurrence of significant rates of bifurcation in experimental areas. The objective of this study was to understand the effects of forking, age, and spacing on the variation pattern of basic and bulk density in the stem, and the characteristics of the growth rings in the wood of *T. vulgaris* from experimental plantations for energy purposes in the Amazon. The material was collected from a plantation belonging to the Jari Celulose S.A. company, located in the Almeirim municipality, in the lower Amazon region of Pará. The experiment was set up in 2010 in which 6 different spacings were evaluated (3.0 x 1.5 m; 3.0 x 2.0 m; 3.0 x 2.5 m; 3.0 x 3.0 m; 3.0 x 3.5 m and 3.0 x 4.0 m). Eighteen non-forked and 36 forked trees were evaluated, from which 5 cm thick discs were taken at determined positions of 0%, 1.30 m, 25%, 50%, 75%, and 100% along the commercial height. The present dissertation was divided into two chapters. The first chapter evaluated the variations in basic and relative bulk density along the commercial height and the proportions of heartwood and sapwood at DBH height in forked and nonforked trees. The second presented the potential of evaluating the wood quality of *T. vulgaris* by X-ray densitometry. The results show that for basic density, the wider spacings of 3.0 x 3.0 m, 3.0 x 3.5 m, and 3.0 x 4.0 m showed a higher amount of trees with average DB ($\geq 0.50 \text{ g cm}^{-3}$), ranging from 62% to 71%. Mean heartwood percentages were $60.03\% \pm 11.98$ for non-forked and $61.54\% \pm 11.98$ for forked trees. Mean bulk density values were homogeneous from the beginning of tree growth, ranging from 0.676 to 0.696 g cm^{-3} for non-bifurcated trees and from 0.400 g cm^{-3} to 0.860 g cm^{-3} for forked trees. Ring width decreased as a function of cambial age in both stem types and spacings. Higher percentages of initial wood were observed at all spacings. In all variables studied *T. vulgaris* obtained a good performance about the desirable parameters for charcoal production and potential for deployment on large scale, even containing significant rates of forking.

Key-words: Bioenergy. Energy forests. Amazon. Steel industry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Espécimes de <i>T. vulgaris</i> com bifurcações em plantação experimental no município de Almeirim, distrito de Monte Dourado, estado do Pará.	26
Figura 2- Disco de <i>T. vulgaris</i> (A); corte transversal evidenciando os anéis de crescimento (B); imagem digital em corte transversal (C).	27
Figura 3- Organograma de pesquisa.	38

Capítulo I

Figura 4- Delimitação do estado do Pará (linha amarela), área de estudo (ponto vermelho) (A); Delineamento experimental da plantação de <i>T. vulgaris</i> localizada na Amazônia oriental, no município de Almeirim, Pará, Brasil (Polígono da Plantação em amarelo, blocos em vermelho e espaçamentos em preto) (B); Climógrafo do município de Almeirim, estado do Pará, Brasil (C).	42
Figura 5- Classificação pedológica do Município de Almeirim- PA.	43
Figura 6- Esquema de coleta do lenho de <i>T. vulgaris</i> no fuste (A), divisão para análises (B), preparo para análise de densidade básica (C).	46
Figura 7- Preparo das amostras em serra dupla (A), amostras para obtenção das imagens digitais do lenho (B), organização das amostras em equipamento de raios X (C), imagem digital do lenho de <i>T. vulgaris</i> (D).	48
Figura 8- Esquema para padronização das imagens dos discos (A); Exemplo de fotografia para a realização da metodologia (B), preparo das imagens para análise (C e D), processamento das imagens no QGis (E e F).	50
Figura 9- Variação longitudinal da densidade básica de árvores não bifurcadas de <i>T. vulgaris</i> nos seis espaçamentos iniciais de plantio avaliados.	53
Figura 10- Variação no sentido base-topo da densidade básica nos fustes principais (A) e secundários (B) de <i>T. vulgaris</i> nos seis espaçamentos de plantação avaliados.	53
Figura 11- Classificação da densidade básica das árvores por espaçamento (A) e por tipo de fuste (B) para <i>T. vulgaris</i> em plantio experimental homogêneo.	55
Figura 12- Perfil de variação base-topo e medula-casca da microdensidade aparente das árvores dos espaçamentos de plantio avaliados de <i>T. vulgaris</i> , aos 102 meses de idade.	57
Figura 13- Efeito do espaçamento na área percentual de cerne, alburno, relação C/A e área do disco de <i>T. vulgaris</i>	58
Figura 14- Porcentagem de cerne e alburno nas árvores não bifurcadas e nos fustes principais e secundários das árvores bifurcadas.	61

Capítulo II

- Figura 15-** Delimitação do estado do Pará (linha amarela), área de estudo (ponto vermelho) (A); Delineamento experimental da plantação de *T. vulgaris* localizada na Amazônia oriental, no município de Almeirim, Pará, Brasil (Polígono da Plantação em amarelo, blocos em vermelho e espaçamentos em preto) (B); Plantação de *T. vulgaris* (C); Climógrafo do município de Almeirim, estado do Pará, Brasil (D). 70
- Figura 16-** Árvores bifucadas em plantação experimental de *Tachigali vulgaris* no Distrito de Monte Dourado, Pará..... 71
- Figura 17-** Perfil de microdensidade a altura do DAP do lenho de *T. vulgaris*, nos espaçamentos de plantio avaliados. 77
- Figura 18-** Perfil de microdensidade intra-anual dos anéis de crescimento de *T. vulgaris*, classificados como (1) crescente, (2) estável, (3) decrescente e/ou instável. 77
- Figura 19-** Efeito da idade cambial na densidade aparente do anel de crescimento, densidade aparente mínima, densidade aparente máxima e homogeneidade da densidade aparente, nas árvores não bifurcadas. 79
- Figura 20-** Curvas ajustadas pelos modelos para a largura do anel das árvores não bifurcadas dos diferentes espaçamentos de plantio. 81
- Figura 21-** Porcentagens de lenhos inicial e tardio, por idade cambial, das árvores não bifurcadas de *T. vulgaris* nos espaçamentos iniciais de 3,0 x 1,5 m (A); 3,0 x 2,0 m (B); 3,0 x 2,5 m (C); 3,0 x 3,0 m (D); 3,0 x 3,5 m (E) e 3,0 x 4,0 m (F). 82
- Figura 22-** Variações dos percentuais de lenho inicial (A) e tardio (B) de árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*, independentemente da idade cambial. 83
- Figura 23-** Variações das proporções de lenho inicial/lenho tardio por anel de crescimento, mensuradas em árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*. 84
- Figura 24-** Efeito da idade cambial na densidade aparente do anel de crescimento, densidade aparente mínima, densidade aparente máxima e homogeneidade da densidade, nas árvores bifurcadas de *T. vulgaris*. 86
- Figura 25-** Variação da largura do anel de crescimento das árvores bifurcadas de *T. vulgaris*, em diferentes espaçamentos de plantio. 88
- Figura 26-** Porcentagens de lenhos inicial e tardio, por idade cambial, das árvores bifurcadas de *T. vulgaris* nos espaçamentos iniciais de 3,0 x 1,5 m (A); 3,0 x 3,0 m (B); 3,0 x 2,5 m (C); 3,0 x 3,0 m (D); 3,0 x 3,5 m (E) e 3,0 x 4,0 m (F). 89

Figura 27 -Variações dos percentuais de lenho inicial (A) e tardio (B) de árvores bifurcadas de <i>T. vulgaris</i> , independentemente da idade cambial.....	90
Figura 28 -Variações das proporções de lenho inicial/lenho tardio por anel de crescimento, mensuradas em árvores bifurcadas de <i>T. vulgaris</i>	90
Figura 29 -Densidade média aparente das árvores de <i>T.vulgaris</i> de plantação experimental..	92
Figura 30 -Densidade aparente média do anel de crescimento para os diferentes tipos de fuste de <i>T. vulgaris</i> de plantação experimental.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Lista das espécies selecionadas para compor a Coalizão Brasil Clima, Florestas e Agricultura do Bioma Amazônia	21
---	----

Capítulo I

Tabela 2- Valores de área útil por planta e densidade de plantio das parcelas de <i>Tachigali vulgaris</i> aos 102 meses de idade no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim – PA.	43
---	----

Tabela 3- Informações gerais das árvores amostradas na plantação experimental de <i>T. vulgaris</i> aos 102 meses de idade.	44
---	----

Tabela 4- Resumo da análise de variância para os valores médios e densidade básica a altura do DAP (DB_{DAP}) e da árvore (DB_{fuste}) de <i>T.vulgaris</i>	61
---	----

Capítulo II

Tabela 5- Valores de área útil por planta e densidade de plantio das parcelas de <i>Tachigali vulgaris</i> aos 102 meses de idade no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim – PA	70
---	----

Tabela 6- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial na densidade aparente da madeira a 12% de umidade de árvores não bifurcadas de <i>T. vulgaris</i>	78
---	----

Tabela 7- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial nas características dos anéis de crescimento em árvores não bifurcadas de <i>T. vulgaris</i>	80
---	----

Tabela 8- Estatísticas de qualidade de ajuste para largura do anel e idade – modelo polinômio de 3º grau.	80
---	----

Tabela 9- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial na densidade aparente da madeira a 12% de umidade de árvores bifurcadas de <i>T. vulgaris</i>	84
--	----

Tabela 10- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial nas características dos anéis de crescimento em árvores bifurcadas de <i>T. vulgaris</i>	86
--	----

Tabela 11- Estatísticas de qualidade de ajuste para largura do anel e idade de árvores bifurcadas – modelo polinômio de 3º grau.	87
--	----

Tabela 12- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e tipo de fuste na densidade aparente de <i>T. vulgaris</i>	91
--	----

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
2 OBJETIVO GERAL	18
2.1 Objetivos específicos	18
3 QUESTÕES CIENTÍFICAS E HIPÓTESES	18
3.1 Questões científicas	18
3.2 Hipóteses.....	18
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
4.1 Florestas energéticas	19
4.2 Políticas para o uso de espécies nativas em plantações comerciais no Brasil	20
4.3 <i>Tachigali vulgaris</i>	23
4.4 Ocorrência de bifurcação em plantações experimentais	24
4.5 Uso da densitometria de raios-X para avaliação da qualidade do lenho.....	26
4.6 Fatores que afetam a qualidade da madeira	27
REFERÊNCIAS	30
5 APRESENTAÇÃO E ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA.....	36
6 CAPÍTULO I - VARIAÇÕES DA DENSIDADE E PROPORÇÕES DE CERNE DA MADEIRA DE <i>Tachigali vulgaris</i> EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS	39
REFERÊNCIAS	63
7 CAPÍTULO II- CARACTERÍSTICAS DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO ANUAIS E SUAS RELAÇÕES COM A DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA DE <i>T. vulgaris</i>	66
8 CONCLUSÕES GERAIS	94
REFERÊNCIAS	95

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento das emissões dos gases do efeito estufa (GEE) a partir das mudanças do modo de produção ocasionado pela Revolução Industrial no século XIX tem impulsionado inúmeras discussões sobre os potenciais impactos causados ao meio ambiente. No Acordo de Paris, da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em 2015, o Brasil assumiu compromissos para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa, entre eles o de aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética e reflorestar 12 milhões de hectares (BRASIL, 2015).

Historicamente o Brasil destaca-se por utilizar biomassa para geração de energia. Em 2020, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, as fontes renováveis constituíam aproximadamente 48,4% da matriz energética brasileira, sendo 33,7% a oferta interna total de biomassa e combustíveis derivados (EPE, 2020). As indústrias siderúrgicas estão entre os segmentos que empregam biomassa, principalmente de origem florestal em suas cadeias de produção (PENA-VERGARA et al., 2022). Nesse contexto, o setor siderúrgico utiliza o carvão vegetal no processo de termorredução do ferro-gusa e na geração de energia da indústria, sendo responsável pelo consumo de cerca de 4,9 milhões de toneladas do que é produzido no Brasil (IBÁ, 2021).

Os polos siderúrgicos nacionais são os únicos que realizam o preparo do minério de ferro com calor gerado a partir da queima do carvão vegetal (EPE, 2019; LEME et al., 2018), o que proporciona melhora na qualidade do ferro-gusa e do aço produzido, em comparação ao carvão mineral (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a, 2019b). Nos estados do Pará e parte do Maranhão, na Amazônia Legal, fica localizado o polo siderúrgico de Carajás. É o segundo maior polo do Brasil, responsável por produzir 11,4% do ferro-gusa nacional em 2020, ficando atrás apenas do estado de Minas Gerais que concentra a maior parcela com 77,7% (SINDIFER, 2021).

O carvão vegetal demandado por esse setor é proveniente de áreas de reflorestamento, principalmente do gênero *Eucalyptus* (PROTÁSIO et al., 2021). Apesar de muito difundidas nas regiões centro-oeste, sudeste e sul do Brasil, na região norte as plantações de espécies florestais são incipientes. Em 2019, a área plantada no Pará foi de 0,21 milhões de ha, sendo 0,16 milhões ha de *Eucalyptus* e 0,06 milhões de ha com outras espécies (IBÁ, 2020). As plantações florestais desempenham papel importante no aumento de matéria prima para o

abastecimento dos setores energéticos e industriais, além de contribuir para ações de mitigação das problemáticas ambientais (BICHEL; TELLES, 2021).

A utilização de espécies nativas para compor plantações comerciais é vantajosa quando analisadas as questões de adaptabilidade, a redução da pressão sobre as florestas naturais, se destacando como uma opção para geração de renda para pequenos produtores (ORELLANA et al., 2018). Contudo, as limitações que contribuem para restrição de áreas plantadas com nativas estão relacionadas à ausência de sistemas de produção consolidados, especialmente para rotações curtas e, grande variabilidade das características físicas e químicas da madeira das espécies amazônicas, critérios relevantes para produção de biomassa para fins energéticos.

Nos últimos anos, os estudos sobre a potencialidade de espécies nativas para implantação em larga escala tem ganhado destaque. Entre as espécies investigadas, o *Tachigali vulgaris* apresenta características promissoras como rápido crescimento (incremento médio anual superior a 40 m³/ha.ano), adaptação favorável em solos de baixa fertilidade natural, valores de média densidade básica entre 0,493 g cm³ e 0,633 g cm³, e, poder calorífico superior de 4390 kcal/kg a 4567 kcal/kg (TOMASELLI et al., 1983; SOUZA et al., 2008; FARIAS et al., 2016; ORELLANA et al., 2018; SILVA et al., 2019). Entretanto, as pesquisas realizadas concentram-se em avaliar o comportamento da espécie a fatores como espaçamento de plantio (TONINI et al., 2018; RODRIGUES et al., 2020) e adubação (SILVA; GONÇALVES; SALES, 2016; TEIXEIRA, 2021) na produtividade energética (ORELLANA et al., 2018; TONINI et al., 2018) nas características de crescimento (RAMOS et al., 2021).

Além das características supracitadas, o *T. vulgaris* têm apresentado, em áreas de plantação experimental, a formação de anéis de crescimento anuais e visíveis, que aliada a sua ampla distribuição geográfica a tornam uma espécie interessante para aplicação de técnicas de dendrocronologia, a exemplo da densitometria de raios-X. A análise dos anéis de crescimento permite avaliar a dinâmica de crescimento das árvores, bem como a sua relação com as modificações do meio como as variações climático-ecológicas ou práticas de manejo (espaçamento, desbaste e etc..) (INGA et al., 2017; DE MICCO et al., 2019) , e assim, portanto, na qualidade da madeira. Os aspectos da interação do espaçamento e idade nas propriedades tecnológicas do *T. vulgaris*, avaliados pela caracterização dos anéis de

crescimento é inédito para a espécie e representa um grande avanço desse tipo de estudo em regiões tropicais, principalmente na Amazônia.

As plantações experimentais da espécie apresentam a ocorrência de índices expressivos de bifurcação (LIMA et al., 2022). A bifurcação por sua vez, é considerada um fator indesejável quando pensado em plantações comerciais, pois provoca maior variabilidade e redução da densidade básica da madeira (BARROS-JUNIOR et al., 2022). A ocorrência de múltiplos fustes pode comprometer as operações florestais de colheita e na logística de acomodação dos toretes no interior dos fornos de carbonização, aumentando os espaços vazios e, distribuindo de forma inadequada à temperatura, o que pode contribuir para produção ineficiente de carvão vegetal (SOUZA et al., 2016). Dessa forma, se faz necessária que além dos aspectos silviculturais, seja realizada a investigação das implicações da bifurcação nas propriedades e qualidade da madeira.

Em plantações florestais, a escolha do espaçamento é um dos pontos mais importantes para o sucesso da implantação do povoamento, podendo interferir significativamente na produtividade e qualidade da madeira, uma vez que ele atua como um condicionante para o uso de recursos primários como água, luz e nutrientes essenciais para o crescimento (ROCHA et al., 2016; TONINI et al., 2018). A idade de corte deve ser determinada com cautela e baseada na análise de um conjunto de propriedades e finalidade de uso da espécie, já que a coleta precoce ou tardia da madeira pode resultar na obtenção de um material com características tecnológicas de baixa qualidade e prejuízos econômicos em termos de produtividade.

A avaliação das propriedades físicas, aliada a compreensão dos efeitos do manejo, idade e tipo de fuste, podem fornecer informações importantes para o entendimento da qualidade de espécies nativas potenciais para a geração de bioenergia. A densidade do lenho é um dos principais índices utilizados para essa finalidade por ser de fácil obtenção e estar associado à interpretação de outras variáveis.

Portanto, os resultados gerados nesta pesquisa contribuirão no avanço de informações sobre o plantio de *Tachigali vulgaris*, para o embasamento de estudos de melhoramento genético e melhor aproveitamento do lenho da espécie.

2 OBJETIVO GERAL

O estudo tem como objetivo entender os efeitos da bifurcação, idade e espaçamento no padrão de variação da densidade e dos anéis de crescimento do lenho de *T. vulgaris* proveniente de plantações experimentais para fins energéticos na Amazônia.

2.1 Objetivos específicos

- Compreender a variação da densidade básica e relativa aparente do lenho em árvores de múltiplos fustes comparativamente a árvores de fuste único em diferentes espaçamentos.
- Avaliar as variações das características dos anéis de crescimento anuais e suas relações com a densidade da madeira.

3 QUESTÕES CIENTÍFICAS E HIPÓTESES

3.1 Questões científicas

- Há variação significativa da densidade no tronco de árvores de *T. vulgaris* nos sentidos radial e longitudinal?
- Há efeito do espaçamento, tipo de fuste e idade na densidade da madeira e proporções de cerne e alburno?
- As características dos anéis de crescimento de *T. vulgaris* se diferenciam em função do tipo de fuste?

3.2 Hipóteses

Hipótese 1: O padrão de variação da densidade em árvores de *T. vulgaris* apresenta decréscimo dos valores no sentido base-topo e acréscimo no sentido medula-casca.

Hipótese 2: Árvores em espaçamentos mais amplos, não bifurcadas e com maior idade tendem a apresentar maior densidade e maior área de cerne.

Hipótese 3: A bifurcação exerce influência no comportamento da densidade básica e relativa aparente nas árvores de *T. vulgaris*.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Florestas energéticas

A demanda crescente por energia observada em todo o mundo tem impulsionado a busca por fontes alternativas e sustentáveis que venham a suprir as necessidades da sociedade (JUNIOR et al., 2020). O aumento do preço do petróleo e dos problemas decorrentes das mudanças climáticas são fatores que contribuem diretamente para a insegurança econômica e ambiental (AZAM; LIU; AHMAD, 2021). A utilização de biomassa, principalmente a de origem florestal plantada, para a geração de energia, vem ganhando cada vez mais espaço em razão de apresentar-se como uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis e contribuir para a redução das emissões de gases do efeito estufa (ALMEIDA et al., 2020; DEBONI et al., 2019).

Atualmente, a área de plantações florestais no Brasil ocupa aproximadamente 9,6 milhões de ha, em que são utilizadas predominantemente espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus* (IBÁ, 2020). Entretanto, observa-se que o aumento da demanda não acompanha a oferta do material, havendo a necessidade de expansão das áreas de produção desse tipo de matéria prima (AKHTARI et al., 2019; COSTA et al., 2014). Segundo os objetivos estabelecidos no Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas (PNDF), o setor florestal brasileiro visa ampliar em 2 milhões de ha a área plantada até 2030 e contribuir com a geração de mais de 36 mil novos postos de trabalho diretos e indiretos (IBÁ, 2019).

Um dos desafios encontrados para a expansão de áreas de produção de madeira plantada é a adaptação das espécies as variadas condições edafoclimáticas que ocorrem no Brasil (ALMEIDA et al., 2020). Fatores como clima, tipologia de solo, disponibilidade hídrica e o manejo empregado causam flutuações nas taxas de crescimento, ciclo de rotação e na formação e, conseqüentemente, na qualidade da madeira (COSTA et al., 2020).

Ibanez et al. (2017) ao avaliar 175 espécies em nove sítios localizados em florestas secas, úmidas e húmidas e Maherali et al. (2004) ao avaliar as relações entre capacidade e resitência ao transporte de água de 167 espécies, em que, ambientes com índices pluviométricos mais baixos tendem a apresentar espécies com maior densidade da madeira, enquanto que Clough et al. (2017) ao avaliar 83 espécies de localidades diferentes do leste dos Estados Unidos, relatam que em temperaturas mais altas há o aumento da densidade da madeira.

Nesse sentido, a silvicultura tem avançado significativamente na seleção de materiais com baixa sensibilidade às variações ambientais, tendo participação direta em cerca de 76,1% no ano de 2016 na produção de madeira plantada e segue em crescimento (MAPA, 2018). A busca por novas fronteiras florestais, principalmente nas regiões que abrangem os estados do Pará, Maranhão e Tocantins devido à localização do polo siderúrgico de Carajás e a necessidade de abastecimento do setor com insumos de qualidade, é um dos propulsores da atividade no país. Dessa forma, as plantações florestais com finalidade energética desempenham papel importante na redução da pressão sobre ecossistemas naturais, aumento de matéria prima para o abastecimento dos setores energéticos e industriais, além de contribuir para ações de mitigação das problemáticas ambientais (BICHEL;TELLES, 2021).

4.2 Políticas para o uso de espécies nativas em plantações comerciais no Brasil

Os gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus* são os mais utilizados na composição das florestas plantadas. A área recoberta por *Eucalyptus* chega a 6,97 milhões de ha e a de *Pinus* a 1,64 milhões de ha. Nesse cenário, a área plantada composta por espécies nativas para a finalidade comercial é de 0,39 milhões de ha (IBÁ, 2020). Contudo, a valorização da madeira de espécies nativas, principalmente de origem tropical, e a escassez desse tipo de sortimento em decorrência de um processo de exploração não sustentável, tem gerado o interesse de investimento no segmento.

Para abastecer o mercado de produtos florestais madeireiros, no ritmo de crescimento da demanda, seriam necessários 30 milhões de ha sob regime de manejo ou 7% da floresta Amazônica (BATISTA, 2018). O Brasil apresenta grande potencial para a expansão de áreas comerciais com espécies nativas, visto que é detentor de rica biodiversidade e apresenta disponibilidade de áreas para implantação.

A utilização de espécies nativas para compor plantações comerciais é vantajosa quando analisadas as questões de adaptabilidade, a redução da pressão sobre as florestas naturais e se destaca como uma opção para geração de renda de pequenos produtores (ORELLANA et al., 2018). Apesar disso, os fatores apontados como os que contribuem para baixa área plantada de nativas estão relacionados à ausência de sistemas de produção consolidados, conhecimento técnico limitado e custos envolvidos nos modelos de negócios florestais com espécies nativas e/ou sistemas agroflorestais (BATISTA et al., 2021).

As tentativas de desenvolvimento na silvicultura de nativas são incipientes. Em 2006, o Brasil lançou o Plano Nacional de Silvicultura com Espécies Nativas e Sistemas Agroflorestais – PENSAF com o objetivo de estabelecer um ambiente propício para a utilização de espécies nativas e sistema agroflorestais em escala comercial, a fim de gerar benefícios econômicos, sociais e ambientais, com base na construção de conhecimento sobre a silvicultura das espécies e o desenvolvimento de tecnologias para a consolidação dos sistemas de produção (BRASIL, 2007). Entretanto, no ano de 2007 as etapas de implementação do plano estavam em fase de avaliação e discussão pelas partes envolvidas, não sendo encontrada atualmente nenhuma informação sobre os seus avanços.

No ano de 2007, no âmbito da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, foi aprovado o projeto “Florestas Energéticas na Matriz de Agroenergia Brasileira” visando à diversificação da matriz energética brasileira”, selecionou cinco espécies, entre elas o *T. vulgaris* (Tachi branco), para a condução de experimentos para avaliar a utilização dessas para o referido uso, o que possibilitou maior visibilidade do tachi branco como espécie potencial para plantações homogêneas (EMBRAPA, 2007).

No ano de 2016 foi difundida a iniciativa Coalizão Brasil Clima, Florestas e Agricultura, que visa ao incentivo à pesquisa e o fortalecimento de Programas de Desenvolvimento (P&D) sobre silvicultura de espécies nativas em conjunto com instituições de ensino, setor privado, institutos de pesquisa, entre outros, com o propósito de desenvolver o potencial do Brasil na área (PIOTTO et al., 2021). No entanto, o tachi branco (*Tachigali vulgaris*) não foi incluído na lista de espécies selecionadas para compor os projetos na Amazônia, conforme pode ser observado na Tabela 1. A principal contribuição do plano concerne à seleção inicial de 15 espécies ocorrentes na Mata Atlântica e 15 ocorrentes na Amazônia com potencial de utilização para produção de madeira serrada. As espécies selecionadas para a região amazônica estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1- Lista das espécies selecionadas para compor a Coalizão Brasil Clima, Florestas e Agricultura do Bioma Amazônia .

Nome científico	Nome comum
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl	tatajuba
<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl	castanha-da-Amazônia
<i>Carapa guianensis</i> Aubl	andiroba
<i>Copaifera multijuga</i> Hayne	copaíba

<i>Cordia goeldiana</i> Huber	freijó-cinza
<i>Dinizia excelsa</i>	angelim-vermelho
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl) Maguire et al.	cumarú
<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. Grose	ipê-amarelo
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl) D. Don	parapará
<i>Schefflera morototoni</i> (Aubl) Maguire et al.	morototó
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Duke) Barneby	paricá
<i>Simarouba amara</i> Aubl	marupá
<i>Swietenia macrophylla</i> King	mogno
<i>Virola surinamensis</i> (Rol. Ex Rottb.) Warb	ucuúba
<i>Vochsya máxima</i> Ducke	quaruba-verdadeira

Fonte: Programa de Pesquisa & Desenvolvimento em Silvicultura de Espécies Nativas, 2021.

No período de 2016 a 2019, o projeto “Valorização Econômica do Reflorestamento com Espécies Nativas – VERENA” avaliou 12 estudos de caso de negócios distribuídos nos biomas Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado envolvendo quatro sistemas de produção distintos: plantios mistos de espécies nativas, monoculturas de espécies nativas, plantios mistos de espécies nativas e espécies exóticas e sistemas agroflorestais. Os resultados obtidos demonstraram que o retorno financeiro dos sistemas avaliados são próximos e com menor variação aos alcançados pelas plantações com *Eucalyptus* e *Pinus*, o que enfatiza o potencial do uso de nativas no estabelecimento de uma economia viável e competitiva, capaz de contribuir para o alcance das metas de mitigação das mudanças climáticas (BATISTA et al., 2021; ROLIM et al., 2019).

Para isso, há a necessidade de políticas públicas e maior incentivo aos programas de pesquisa, desenvolvimento e inovação, que abordem temáticas prioritárias e essenciais (ROLIM et al., 2020), a fim de preencher lacunas importantes para a formulação de um sistema de produção competitivo de espécies nativas e compreender os aspectos que as tornam comercialmente atrativas como o ciclo de corte, volume produzido, taxa de crescimento, mercados pretendidos e qualidade da madeira produzida (BRANCALION, VIANI, 2012; SILVA E SILVA et al., 2013).

4.3 *Tachigali vulgaris*

O *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H.C. Lima está inserido na família das leguminosas (Fabaceae) que compreende cerca de 19 mil espécies (SILVA E SILVA et al., 2013). É popularmente conhecido como taxi-branco-da-terra-firme, carvão-de-ferreiro, carvoeiro, taxizeiro, pau-bosta, tachí-do-campo, tachi branco, dependendo da região (SOUSA et al., 2016). Os gêneros *Tachigali* e *Sclerolobium* apresentam inúmeras semelhanças em suas estruturas anatômicas e morfológicas. Em razão disso a comunidade científica passou a adotar *Sclerolobium paniculatum* como sinônimo de *Tachigali vulgaris* (DA SILVA; DE LIMA, 2007).

A espécie é nativa do Brasil com ampla distribuição geográfica podendo ser encontradas nas regiões Norte, Nordeste, Centro-oeste e Sudeste. Fora do país é possível encontrá-la em áreas de floresta da Amazônia Peruana oriental e países como Suriname, Guianas e Venezuela (SOUSA et al., 2016). São típicas de Floresta Ombrófila Densa, em áreas de terra firme e vegetação secundária, cerradão e mata seca (CRUZ et al., 2020; CARPANEZZI et al., 1983).

São árvores heliófilas, com alta adaptabilidade em pleno sol, perenifólia, com características de espécie pioneiras, tendo seu crescimento impulsionado por atividades antrópicas que viabilizam a quebra de sementes no banco do solo. Apresenta tronco retilíneo e cilíndrico, atingindo de 8 a 15 m de fuste e altura total de 8 a 30 m, com DAP de 23 a 100 cm. A casca pode apresentar espessura de até 10 mm, coloração branca a acinzentada, com cicatrizes causadas pelo desrame e internamente coloração arroxeada. Tem como vetores de polinização dípteros e vespas e a dispersão de frutos e sementes do tipo anemocórica (CARVALHO, 2005; RAMOS, 2019).

É uma espécie que apresenta potencial para utilização em plantações comerciais, devido ao seu rápido crescimento e capacidade de associar-se a bactérias fixadoras de nitrogênio. Nos experimentos realizados no estado do Pará, as médias de DAP variaram de 11,77 cm a 14,04 cm, nas idades de 8 a 10 anos (TEIXEIRA, 2021). Ao avaliar a produtividade volumétrica por unidade de área podem alcançar 21 m³ ha⁻¹ aos 5,8 anos (TONINI et al., 2018).

A alta deposição de folhas, desrama natural e elevada produção de biomassa são características que tornam o *T. vulgaris*, uma espécie comumente utilizada para a recuperação

de áreas degradadas. Além disso, se observa um grau elevado de adaptação em áreas de pouca fertilidade natural como de solos ácidos, arenosos ou em latossolos com alto teor de argila extremamente antropizados (SILVA et al., 2016).

Sua madeira é considerada moderadamente densa ($\pm 0,645 \text{ g cm}^{-3}$), possui cerne e alborno distintos, cerne castanho, odor característico e, gosto indistinto (ROLIM; PIOTTO, 2018). Apresenta boa adaptação e resistência em locais com déficit hídrico, podendo ocorrer em áreas com disponibilidade hídrica de 150 mm a 250 mm (MARTORANO et al., 2011). Lima (2004) verificou que a taxa hídrica ideal para o desenvolvimento da espécie é de 114 mm mensal, e que valores abaixo podem restringir significativamente o seu crescimento.

Em plantações florestais, com finalidade energética, o *T. vulgaris* apresenta ciclo médio de corte de 5 a 10 anos, e para fins de produção em madeira serrada de 15 a 20 anos (CARVALHO, 2005). A madeira apresenta potencial para uso múltiplo, sendo utilizada para a produção de carvão vegetal, com elevada qualidade, na construção civil, fabricação de mourões, esteios, lenha e álcool e arborização urbana (PILON et al., 2012).

4.4 Ocorrência de bifurcação em plantações experimentais

As causas que levam a formação de fustes secundários nas árvores são desconhecidas, mas pesquisadores a atribuem a fatores ligados à genética, ambiente ou como resultado da interação entre eles (RESENDE; FANTINI JÚNIOR, 2001; ENNOS; VAN CASTEREN, 2010).

A bifurcação é entendida como uma consequência de ações biomecânicas no fuste principal, de onde ramificam um ou mais fustes, que podem ter diâmetros iguais, maior, ou menor aquele do qual originaram. Além da formação dos fustes, o processo resulta na formação de junções que oferecem resistência mecânica para as ramificações (DOMEC; GARTNER, 2001; BUCKLEY et al., 2015; SLATER; ENNOS, 2015).

Os experimentos de plantação com espécies nativas avaliados por Mendonça et al., (2017) com *Astronium concinnum*, *Cariniana legalis*, *Goniorrhachis marginata*, *Kielmeyera albopunctata*, *Lecythis pisonis*, *Manilkara bella*, *Basilloxylon brasiliensis*, *Spondias venulosa*, *Vitex sp.* e *Zeyheria tuberculosa* e Ducati (2019) com *Parapiptadenia rigida* e *Dalbergia nigra*, apresentaram a ocorrência de bifurcações. As bifurcações não ocorrem apenas em plantações com espécies nativas, em plantações com espécies melhoradas e com maior

conhecimento sobre seus aspectos silviculturais como o *Eucalyptus* e *Pinus*, também são acometidas pela formação de fustes secundários, conforme é relatado em Bar-Ness et al., (2012) e Sampaio et al., (2000) em plantações de *Eucalyptus obliqua* e *Pinus caribaea var. hondurensis*, respectivamente. Sendo assim, o conhecimento da ecofisiologia das espécies e as suas interações com o ambiente são de suma importância para o planejamento de projetos de povoamentos comerciais (MENDONÇA et al., 2017).

No experimento de avaliação deste estudo observou-se a ocorrência de árvores bifurcadas, chegando a 69,35% no espaçamento de 12 m²/planta (PATRÍCIO, 2021). Lima et al., (2022) ao avaliar a plantação aos 87 meses e 102 meses, identificou influência significativa da idade nos fustes secundários, Patrício (2021) ao avaliar as características dendrométricas da plantação de *T. vulgaris* em diferentes idades, verificou a ausência de efeito do espaçamento e efeito significativo da idade no diâmetro à altura de 1,30 m da superfície do solo por fuste, altura média dos fustes e área basal. Barros Júnior et al. (2022) identificou que a bifurcação reduziu a densidade da madeira em quase 7% e promoveu uma variação mais ampla dentro do caule, em árvores de *T. vulgaris* aos 87 meses.

Outra característica observada nos povoamentos experimentais de *T. vulgaris* é a ocorrência da bifurcação abaixo dos 1,30 do solo, entre 0,70-0,80 cm (Figura 1). Mendonça et al., (2017) relatam que a diferença entre a altura total da planta e a altura do fuste comercial indica possíveis perdas de rendimento no processamento e/ou na qualidade da madeira, sendo, portanto, uma lacuna a ser esclarecida. Dessa forma, a ocorrência das bifurcações as torna uma questão importante para investigação, a fim de se identificar qual a sua influência sobre as propriedades tecnológicas, e se consiste em uma característica da espécie para o embasamento de estudos para o melhoramento genético do *T. vulgaris*.

Figura 1- Espécimes de *T. vulgaris* com bifurcações em plantação experimental no município de Almeirim, distrito de Monte Dourado, estado do Pará.



4.5 Uso da densitometria de raios-X para avaliação da qualidade do lenho

A Amazônia representa uma das maiores áreas de florestas tropicais existentes no mundo (CARDOSO et al., 2017). A região destaca-se por sua extensão territorial que pode chegar a mais de 6 milhões de km² e por seu alto índice de biodiversidade de espécies de fauna e flora. Contudo, a maioria das espécies arbóreas do domínio amazônico não é adequada para a dendrocronologia, devido a não adequação dos requisitos de viabilidade como formação de anéis de crescimento visíveis e anuais, falta de sincronismo de variáveis dentro da árvore e entre indivíduos (CAETANO-ANDRADE et al., 2020).

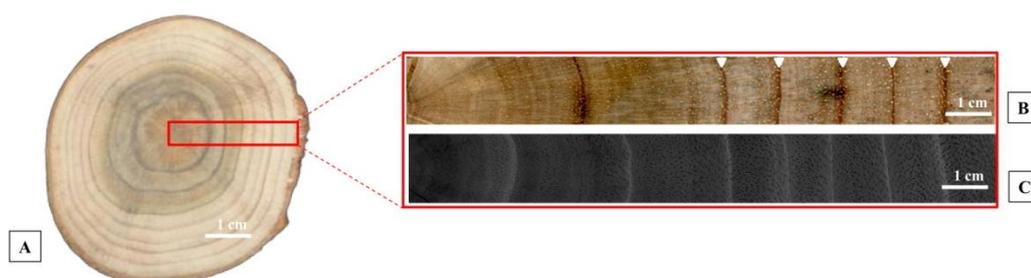
O estudo da dendrocronologia é realizado por meio do uso de técnicas que permitem a avaliação do lenho das árvores pela análise dos anéis de crescimento de forma rápida. Entre elas, a densitometria de raios-X possibilita obter de forma automática os perfis de microdensidade do lenho e dos anéis de crescimento.

É considerada como uma análise qualitativa e quantitativa altamente precisa que ajudam a compreender melhor as variações que ocorrem na árvore ao longo do tempo oferecendo suporte para na determinação dos ciclos de cortes, além de subsidiar a realização de melhores práticas silviculturais para a condução de florestas (INGA et al., 2017) e para reconstrução de eventos extremos como secas e cheias.

Entre as espécies tropicais com potencialidade de aplicação da densitometria de raios-X está o *T. vulgaris*. A espécie apresenta a formação de anéis de crescimento anuais e visíveis, com demarcação por zonas fibrosas em faixas escuras e redução do número de vasos (Figura 2), e considerável distribuição geográfica podendo ser encontrado em ambientes naturais ou plantado.

Essas características permitem avaliar como as mudanças edafoclimáticas atuam sobre as propriedades do lenho, assim como podem ajudar na compreensão da vulnerabilidade e fragilidade de diferentes domínios florestais frente às mudanças climáticas, principalmente na região amazônica (BARBOSA et al., 2012; BRIENEN; SCHÖNGART; ZUIDEMA, 2016).

Figura 2- Disco de *T. vulgaris* (A); corte transversal evidenciando os anéis de crescimento (B); imagem digital em corte transversal (C).



Ao se determinar e delimitar o perfil de microdensidade relativa aparente (radial e longitudinal) e os anéis de crescimento é obtidas informações sobre largura, diâmetro e as proporções de lenho inicial/lenho tardio, que são parâmetros importantes para a compreensão da variabilidade da densidade do lenho e caracterização dos anéis de crescimento. A densitometria de raios-X tem se mostrado eficiente para avaliação do lenho em espécies como *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).

4.6 Fatores que afetam a qualidade da madeira

A madeira é um material que apresenta variações significativas em suas propriedades. Essas variações podem ser observadas dentro de um mesmo indivíduo e/ou entre indivíduos da mesma espécie. Essas diferenciações ocorrem em razão de fatores bióticos e abióticos, como a genética, características do sítio, tratamentos silviculturais, idade e do resultado da interação entre eles.

Em plantações florestais, a escolha do espaçamento é um dos pontos mais importantes para o sucesso da implantação do povoamento, uma vez que este pode interferir significativamente na produtividade e qualidade da madeira, por atuar como um condicionante para o uso de recursos primários como água, luz e nutrientes essenciais para o crescimento (ROCHA et al., 2016; TONINI et al., 2018). Em povoamentos muito adensados, o crescimento das árvores em diâmetro tende a ser reduzido e há maior taxa de mortalidade, por outro lado, pode se observar maior área basal por hectare e maior volume total. Em espaçamentos amplos, o desenvolvimento das árvores é maior em virtude da maior disponibilidade de recursos e menor competição entre as árvores (NARDUCCI et al., 2016).

Em relação aos parâmetros de qualidade da madeira, a densidade básica sofre influência do número de árvores por unidade de área, embora não haja um padrão para determinar qual comportamento à densidade terá ao se implantar determinada espécie em certo espaçamento. Isso ocorre devido a tendências e comportamentos diferenciados nos espaçamentos (BARROS JÚNIOR, 2020). Magalhães et al. (2020) verificaram que a densidade básica da madeira variou de acordo com o espaçamento, em que o uso de maiores espaçamentos proporcionou maiores valores de densidade básica para clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

A idade de corte de uma plantação é outro fator que deve ser determinado com cautela e baseada na análise de um conjunto de propriedades e finalidade de uso da espécie, uma vez que a coleta precoce ou tardia da madeira pode resultar na obtenção de um material com características tecnológicas de baixa qualidade. Soares et al. (2015) avaliando as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em idades de 3, 5 e 7 anos observaram o aumento dos teores de extrativos, carbono, relação C/H e da densidade com o incremento em idade. Xiang et al. (2014) verificaram a diminuição da densidade no sentido radial da espécie de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. nos primeiros anos, com tendência a estabilidade em idades mais avançadas. Adicionalmente, 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 (SILVA et al., 2020).

A declividade do terreno, vento e ramificações são fatores que afetam o desenvolvimento do fuste. O lenho de tração é o principal resultado da ação desses elementos, ele ocorre como uma resposta mecânica ao *estresse* ocasionado pela inclinação do fuste e

caracteriza-se pela formação de uma camada gelatinosa no interior das paredes das fibras. Essas células gelatinosas comprometem a qualidade da madeira devido ao aumento da espessura de parede, que apesar de aumentar a densidade, reduz o teor de lignina, o que é indesejável para fins de geração direta de energia ou produção de carvão vegetal. Devido às alterações das propriedades demandadas originalmente, as árvores com grande proporção de lenho de tração podem representar prejuízos ao empreendimento florestal (BOSCHETTI et al., 2020).

A avaliação das propriedades físicas e anatômicas da madeira, aliada a compreensão dos efeitos do manejo, idade e tipo de fuste, podem fornecer informações importantes para o entendimento da qualidade de espécies nativas potenciais para a geração de bioenergia.

REFERÊNCIAS

- AKHTARI, S. *et al.* Impact of inventory management on demand fulfilment, cost and emission of forest-based biomass supply chains using simulation modelling. **Biosystems Engineering**, v. 178, p. 184–199, 2019.
- ALMEIDA, M. N. F. *et al.* Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. November 2019, p. 1–10, 2020.
- AZAM, M.; LIU, L.; AHMAD, N. Impact of institutional quality on environment and energy consumption: evidence from developing world. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 2, p. 1646–1667, 2021.
- BARBOSA, J.P.R.A.D. *et al.* Plant physiological ecology and the global changes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, p. 253-269, 2012.
- 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.
- BARROS-JUNIOR, U. *et al.* Effects of Tree Spacing and Forking on the Modification of Wood Density in a Trial Plantation of *Tachigali Vulgaris* for Energy in Amazonia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n. 1, p. 11–23, 2022.
- BATISTA, A. *et al.* Investimento em Reflorestamento com Espécies Nativas e Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma Avaliação Econômica. World Resources Institute, 2021.
- BATISTA, A. F. Silvicultura com espécies nativas e SAF - mercados, viabilidade e competitividade. p. 1–82, 2018.
- BEN. Brazilian energy balance 2019: year 2018. Rio de Janeiro: EPE; 2019.
- BICHEL, A.; TELLES, T. S. Spatial dynamics of firewood and charcoal production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, n. June, p. 127714, 2021.
- BOSCHETTI, W. T. N; VIDAURRE, G. B; PAES, J. B. Ocorrência e propriedades da madeira de reação em eucalipto. Graziela Baptista Vidaurre João Gabriel Missia da Silva Jordão Cabral Moulin, v. 29075, p. 47. 2020.
- BRANCALION, P. H. S. *et al.* Finding the money for tropical forest restoration, **Unasylva**, Roma, v. 63, n. 239, p. 41- 91 50, 2012.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA). 21ª Conferência das Nações Unidas Para Mudanças Climáticas, 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 20 agosto 2021.
- BRASIL. Plano nacional de silvicultura com espécies nativas e sistemas agroflorestais – PENSAF. 2007. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/pnf/_arquivos/pensaf_v1.pdf. Acesso em 11/10/2021

BRIENEN, R.J.; SCHÖNGART, J.; ZUIDEMA, P.A. Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. In: *Tropical Tree Physiology*, p. 439 - 461. **Springer International Publishing**, UK, 2016.

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.

CAETANO-ANDRADE, V. L. *et al.* Tropical trees a time capsules of anthropogenic activess. **Trends in Plant Science**, Vol. 25, No. 4. 2020.

CAMARA, A. P. *et al.* Physiological disorders affecting dendrometric parameters and eucalyptus wood quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, p. 27-34, 2018.

CARDOSO, D. *et al.* Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 40, p. 10695-10700, 2017.

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

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

CASTRO, V. R. *et al.* The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. **Scientific Reports**, v. 10, p. 1-9, 2020.

CLOUGH, B. *et al.* Climate driven trends in stem wood density of tree species in the eastern United States: ecological impact and implications for national forest carbon assessments. **Glob. Ecol. Biogeogr.** 26, 1153–1164. 2017.

COSTA, E. L. S. *et al.* The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. November 2019, 2020.

COSTA, T. G. *et al.* Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 37–45, 2014.

CRUZ, S. L. *et al.* Parâmetros genéticos e seleção inicial de procedências e progênies de taxi-branco (*Tachigali vulgaris*) em Roraima. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 258-269, 2020.

DE MICCO, V. *et al.* From xylogenesis to tree rings: wood traits to investigate tree response to environmental changes. **IAWA journal**, v. 40, n. 2, p. 155-182, 2019.

DEBONI, T. L. *et al.* Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1291–1302, 2019.

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

DUCATTI, M. **Desempenho silvicultural de espécies nativas em plantações florestais no estado interior do estado de São Paulo**. Dissertação. (Mestrado em ciência florestal)- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2019.

EMBRAPA. Projetos “Florestas Energéticas na Matriz de Agroenergia Brasileira”. Plano direcional. 2007.

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] Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Ano base 2019, 2021. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em jun 2021.

EPE. Balanço energético nacional: Ano base 2018. EPE - Empresa de Pesquisa Energética, p. 67, 2019.

FARIAS, J. *et al.* 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.

FERNANDES, N. C. L.; VALLE, M. L. A.; CALDERON, C. M. A. Características físicas e anatômicas de *Cedrela odorata* L. e *Cedrelinga cateniformis* Ducke. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1–10, 2018.

IBÁ. Anuário estatístico do IBÁ. Ano base 2020. Indústria brasileira de árvores. Associação Brasileira de Árvores, p. 160, 2021.

IBANEZ, T. *et al.* Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island. **J. Veg. Sci.** 28, 19–33. 2017.

Indústria Brasileira de Árvores. IBÁ: Indústria Brasileira de Árvores. Brasília, DF, 2020. Relatório 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2021.

INGA, J. G.; DEL VALLE, J. I. Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and *Juglans neotropica*, Central Forest, Peru. **Dendrochronologia**, v. 44, p. 117-129, 2017.

INGA, J.; DEL-VALE, J. I. Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and ***Juglus neotropica***, central Forest, Peru. **Dendrochronologia**, 44:117–129, 2017.

JUNIOR, L. M. C. *et al.* O desenvolvimento brasileiro das florestas de rápido crescimento com fins energéticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28111–28125, 2020.

LEME, M. M. V. *et al.* Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 219–242, 2018.

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

MAHERALI, H., POCKMAN, W.T., JACKSON, R.B., 2004. Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. **Ecology** 85 (8), 2184–2199.

MAPA. Plano nacional de desenvolvimento de florestas plantadas. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, p. 52, 2018.

MARTORANO, L. G. *et al.* Top-bioclimate conditions associated with the natural occurrence of two Amazonian tree species for sustainable reforestation in the State of Para, Brazil. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 144, p. 111-122, 2011.

MENDONÇA, G.C. *et al.* Avaliação silvicultural de dez espécies nativas da Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 277-290, 2017.

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.

ORELLANA, B. B. M. *et al.* Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na amazônia. **Nativa**, v. 6, n. 2009, p. 773, 2018.

ORTEGA-RODRIGUEZ, D. R. *et al.* 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.

P.H.S. BRANCALION, R.A.G. VIANI, B. B. N. S. AND R. R. R. Finding Money for tropical forest restoration. v. 63, p. 41–50, 2012.

PATRÍCIO, E.P.S. **Compreensão dos efeitos de espaçamento e idade na produtividade e ocorrência de bifurcação em plantações de *Tachigali vulgaris* com finalidade energética.** 2021. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia florestal)- Universidade Federal Rural da Amazônia. 45 p.

PENA-VERGARA, G. *et al.* Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, v. 239, p. 122243, 2022.

PILON, N. A. L.; MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Comparação de métodos para quebra de dormência das sementes de carvoeiro – *Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva e H.C. Lima (Família: Fabaceae – Caesalpinioideae). **Revista do Instituto Florestal**, v. 24, n. 1, p.133-138, 2012. Nota científica.

PIOTTO, D. *et al.* Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura de Espécies Nativas. p. 20, 2021.

PROTÁSIO, T.P. *et al.* Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021.

RAMOS, L.O. **Volúmetria em povoamentos puros de tachi-branco (*Tachigali vulgaris*) em diferentes espaçamentos.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia. p.39, 2019.

RESENDE, M. D. V.; FANTINI JÚNIOR, M. Bifurcação e quebra de copa em eucalipto: efeitos genéticos, ambientais e silviculturais. Colombo: Embrapa Florestas (Documento, 63), 2001. 20 p.

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

RODRIGUES, R. P. *et al.* Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima em diferentes espaçamentos de plantio para a produção de biomassa. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, 2020.

RODRIGUES, R.P. **Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima em diferentes espaçamentos para fins energéticos no município de Almeirim, pa.** 2018. Dissertação. (Mestrado em ciências florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia. 44 p.

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

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, n. February, p. 170–183, 2019b.

ROLIM, S. G. *et al.* Research Gaps and Priorities in Silviculture of Native Species in Brazil. World Resources Institute Brasil, n. October, p. 1–44, 2019.

ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica. Editora Rona. 2018. 160 p.

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.

SILVA E SILVA, W. L. *et al.* Inventário e distribuição geográfica de Leguminosae no arquipélago de Marajó, PA, Brasil. **Hoehnea**, v. 40, n. 4, p. 627–647, 2013.

SILVA, A.; GONÇALVES, D.; SALES, A. Desempenho do Tachi-Branco em resposta a adubação combinada de fósforo e potássio em latossolos. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 2, p. 37–48, 2016.

SILVA, L. F. G.; DE LIMA, H. C. Nomenclatural changes in the genus *Tachigali* Aubl. (Leguminosae - Caesalpinioideae) in Brazil. **Rodriguesia**, v. 58, n. 2, p. 397–491, 2007.

SILVA, M. O. S. *et al.* Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacing for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8>

SILVA, M.O.S. **Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético.** 2018. Tese de Doutorado. UFRA.

SINDIFER. Anuário estatístico. 2021. Disponível em: < <http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>>.

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.

SOUSA, V. G., BRIENZA JUNIOR, S., BARBOSA, M. G., MARTORANO, L. G., & SILVA, V. C. Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* LF Gomes da Silva & HC Lima): botânica, ecologia e silvicultura. Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E), 2016.

SOUZA, C. R.; LIMA, R. M. B.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, M. B. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 7-14, 2008.

TEIXEIRA, R.A.C. **Dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima em resposta à adubação e textura de solo.** 2021. Dissertação . (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia. 79 p.

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

TONINI, H. *et al.* Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

UNITED NATIONS. Framework on Climate Change. Clear Development Mecanism: sustainable development co-benefits. Disponível em: <http://cdmcobenefits.unfccc.int/Pages/SD-Reports.aspx>. Acesso em: 12 mar. 2017.

XIANG, W. *et al.* Radial trends in black spruce wood density can show an age- and growth-related decline. **Annals of Forest Science**, v. 71, n. 5, p. 603–615, 2014.

5 APRESENTAÇÃO E ESTRUTURA GERAL DA PESQUISA

Esse estudo foi realizado no âmbito da “Rede Brasileira de Pesquisa em Crescimento e Qualidade da Madeira da Espécie *Tachigali vulgaris* (tachi branco), proveniente de plantios homogêneos, para geração de bioenergia na Amazônia”, em parceria com a Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”-ESALQ/USP, Universidade Federal do Amazonas- UFAM e, subsidiada pelo Programa Nacional de Cooperação Acadêmica na Amazônia– PROCAD AMAZÔNIA (Edital N° 21/2018, Processo N° 23038.005350/2018-78).

O projeto tem como objetivo contribuir para os estudos do crescimento e da qualidade da madeira de árvores de *Tachigali vulgaris*, proveniente de plantações homogêneas para a geração de bioenergia na Amazônia, visando ao avanço do conhecimento sobre os aspectos silviculturais da espécie, por meio de ações de ensino e pesquisa que envolve alunos de pós-graduação e graduação.

Atualmente, duas discentes de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais estão envolvidas no acompanhamento do projeto e irão desenvolver as dissertações a partir das pesquisas realizadas com a produção sustentável de madeira e carvão vegetal de tachi branco.

1º) A discente **Larissa Gonçalves Moraes** irá desenvolver o estudo com o tema: “Efeitos da bifurcação, espaçamento e idade na qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantações homogêneas para geração de bioenergia na Amazônia.”, com previsão de defesa em agosto/2022), sob orientação do Prof. Thiago Protásio.

Até o ano de 2021 foram desenvolvidas quatro dissertações sob orientação do Prof. Thiago de Paula Protásio e defendidas com as temáticas:

Marilene Olga dos Santos e Silva. Título: “Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético”. Defesa realizada em: Julho de 2018.

Udson de Oliveira Barros Júnior. Título: “Características de crescimento, madeira e carvão vegetal de *Tachigali vulgaris* (tachi branco), em diferentes espaçamentos, para uso bioenergético na Amazônia”. Defesa realizada em julho de 2020.

Rafaela Patrícia da Silva Ceretta. Título: “Caracterização anatômica da madeira do tachi branco (*Tachigali vulgaris*) em plantios experimentais da Amazônia”. Defesa realizada em abril de 2021.

Roberthi Alef Costa Teixeira. Título: “Produtividade e qualidade da madeira da espécie amazônica *Tachigali vulgaris*, em diferentes níveis de adubação, para geração de bioenergia”. Defesa realizada em outubro/2021.

No âmbito do curso de graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural da Amazônia, Câmpus de Parauapebas, foram realizados cinco trabalhos de conclusão de curso:

●1º - Discente: Wilson Alan Santos do Rosário. Título: “Variações da densidade básica do lenho de *Tachigali vulgaris* em diferentes espaçamentos de plantio”. Defesa realizada em: fevereiro de 2019.

●2º - Discente: Reynaldo Melo Koury Sobrinho. Título “Caracterização dendrométrica e estimação da altura total de tachi branco (*Tachigali vulgaris*) em um plantio no Pará, um estado da Amazônia brasileira”. Defesa realizada em: fevereiro de 2019.

●3º - Discente: Rita de Cássia Carvalho Silva. Título “Variabilidade dendrométrica e qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* para produção de biomassa para energia na Amazônia”. Defesa realizada em: novembro de 2019.

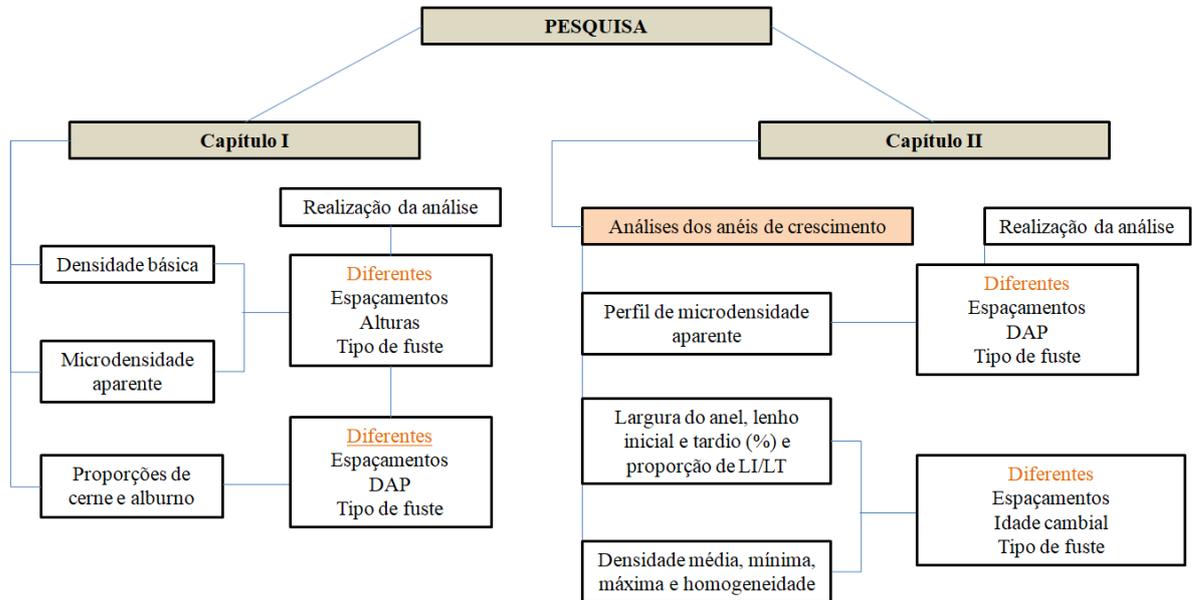
●4º - Discente: Evelyn Poliana Santos Patrício. Título “Compreensão dos efeitos de espaçamento e idade na produtividade e ocorrência de bifurcação em plantações de *Tachigali vulgaris* com finalidade energética”. Defesa realizada em: agosto de 2021.

● 5º - Discente: Elvis Vieira dos Santos. Título “Composição inorgânica da madeira de *Tachigali vulgaris* (tachi branco): implicações na geração de energia e na sustentabilidade da produção florestal na Amazônia”. Defesa realizada em: junho de 2022.

Este estudo apresenta os resultados obtidos pela discente **Larissa Gonçalves Moraes** sobre os “Efeitos da bifurcação, espaçamento e idade na qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantações homogêneas para geração de bioenergia na Amazônia” e será apresentado em dois capítulos intitulados: (I) Variações da densidade e proporções de cerne da madeira de *T. vulgaris* em diferentes espaçamentos; (II) Variações das características

dos anéis de crescimento anuais e suas relações com a densidade da madeira de *T. vulgaris*. O conteúdo abordado em cada capítulo pode ser observado na Figura 3.

Figura 3- Organograma de pesquisa.



Fonte: Autora, 2022.

6 CAPÍTULO I - VARIAÇÕES DA DENSIDADE E PROPORÇÕES DE CERNE DA MADEIRA DE *Tachigali vulgaris* EM DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

RESUMO: O conhecimento sobre as variações das propriedades da madeira é de grande relevância para a silvicultura de espécies nativas. O objetivo deste estudo é compreender as variações das densidades básica e relativa aparente em função do espaçamento de plantio e proporções de cerne e alburno da madeira de *T. vulgaris* proveniente de plantações homogêneas na Amazônia Brasileira. O estudo foi realizado em um experimento instalado no ano de 2010, com espaçamentos de plantio inicial de 3,0 x 1,5 m, 3,0 x 2,0 m, 3,0 x 2,5 m, 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m aos 102 meses de idade, localizado no município de Almeirim-PA. Foram avaliadas as densidades básica e aparente a 12% de umidade em posições relativas na altura do comercial e as proporções de cerne e alburno a altura do DAP de árvores bifurcadas e não bifurcadas. As árvores BF possuem 55% das suas posições longitudinais com média DB ($\geq 0,50 \text{ g cm}^{-3}$), e 45% com baixa DB ($< 0,50 \text{ g cm}^{-3}$) e as NB apresentam 66% de suas posições no sentido longitudinal com média DB e 34% com baixa DB. O perfil de microdensidade aparente apresentado pela espécie foi crescente no sentido medula-casca e decrescente no sentido base-topo. As médias percentuais de cerne encontradas foram de 60,03% $\pm 11,98$ para não bifurcadas e de 61,54% $\pm 11,98$ para as bifurcadas. As relações C/A variaram de 1,06 a 2,64. A espécie demonstra melhor desenvolvimento em espaçamentos intermediários como o de 3,0 x 3,0 m. A bifurcação provoca efeito negativo na densidade da madeira e aumenta as variações dessa variável dentro do fuste, sendo, portanto, um fator a ser isolado nos estudos de melhoramento genético, uma vez que pode provocar prejuízos na cadeia logística florestal, bem como a diminuição da qualidade e produtividade da madeira.

Palavras-chave: Amazônia. Bifurcação. Qualidade da madeira, Silvicultura.

ABSTRACT: Knowledge about the variations of wood properties is of great relevance to the forestry of native species. The objective of this study is to understand the variations of basic and relative bulk densities as a function of planting spacing and proportions of heartwood and sapwood of *T. vulgaris* wood from homogeneous plantations in the Brazilian Amazon. The study was conducted in an experiment installed in 2010, with initial planting spacings of 3.0 x 1.5 m, 3.0 x 2.0 m, 3.0 x 2.5 m, 3.0 x 3.0 m, 3.0 x 3.5 m, and 3.0 x 4.0 m at 102 months of age, located in Almeirim-PA. The basic and bulk densities at 12% moisture content were evaluated in relative positions at the commercial height and the proportions of heartwood and sapwood at DBH height of forked and non forked trees. BF trees have 55% of their longitudinal positions with medium DB ($\geq 0.50 \text{ g cm}^{-3}$), and 45% with low DB ($< 0.50 \text{ g cm}^{-3}$), and NB trees have 66% of their positions in the longitudinal direction with medium DB and 34% with low DB. The apparent microdensity profile presented by the species was increasing in the medulla-shell direction and decreasing in the base-top direction. The mean percentages of heartwood found were 60.03% ± 11.98 for non-bifurcated and 61.54% ± 11.98 for forked trees. The C/A ratios ranged from 1.06 to 2.64. The species shows better development at intermediate spacings such as 3.0 x 3.0 m. The bifurcation harms wood density and increases the variations of this variable within the stem, being, therefore, a factor

to be isolated in genetic improvement studies, since it can cause losses in the forest logistics chain, as well as a decrease in wood quality and productivity.

Key-words: Amazon. Bifurcation. Wood quality, Forestry.

6.1 Introdução

A área de plantações florestais no Brasil ocupam aproximadamente 9,6 milhões de ha (IBÁ, 2020). Apesar de muito difundidas nas regiões centro-oeste e sudeste, na região norte as plantações de espécies florestais são incipientes. Em 2019, a área plantada no Pará foi de 0,21 milhões ha, sendo 0,16 milhões ha de *Eucalyptus* e 0,06 milhões de ha com outras espécies (IBÁ, 2020).

O polo siderúrgico de Carajás, segundo maior do Brasil, fica localizado entre os estados do Pará e Maranhão e é responsável pela produção de 11,4% do ferro-gusa nacional e utiliza no seu processo de produção grandes quantidades de carvão vegetal, provenientes em sua maioria de áreas de reflorestamento (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a; SINDIFER, 2020). Devido à necessidade de abastecimento do setor e, uma área de florestas plantadas para fins energéticos incompatível com a demanda, estudos sobre a potencialidade de espécies nativas para implantação em larga escala têm ganhado destaque nos últimos anos.

A espécie *Tachigali vulgaris* apresenta características promissoras para uso alternativo ao *Eucalyptus* na região amazônica, como o rápido crescimento com taxas de 4,5 metros de incremento médio anual em altura (CARVALHO, 2005). Em experimentos realizados no estado do Pará, as médias de DAP variaram de 11,77 cm a 14,04 cm, nas idades de 8 a 10 anos (TEIXEIRA, 2021), com produtividade volumétrica por unidade de área podendo alcançar 21 m³ ha⁻¹ aos 5,8 anos (TONINI et al., 2018) e madeira moderadamente densa variando de 0,443 g cm⁻³ a 0,529 g cm⁻³ aos 87 meses (BARROS JÚNIOR et al., 2022).

A utilização de espécies nativas para compor plantações comerciais é vantajosa quando analisadas as questões de adaptabilidade. Contudo, a falta de informações consolidadas sobre condução em sistemas produtivos, forma de crescimento, variações sobre as propriedades do lenho, entre outros aspectos importantes de manejo, são fatores apontados como responsáveis pela pouca área recoberta com plantações de nativas (BATISTA et al., 2021). Estudos realizados com híbridos de *Eucalyptus* em diferentes condições edafoclimáticas, densidade de plantio e idade, mostraram diferenças significativas no comportamento das propriedades da madeira como a densidade básica e as proporções de

cerne e alburno, que são parâmetros importantes para a avaliação da qualidade e designação de uso do material (ALMEIDA et al., 2020; COSTA et al., 2020), sendo portanto, fatores a serem investigados para delimitar os efeitos em povoamentos de *T. vulgaris*.

Nesse sentido, o conhecimento de fatores que provocam variações das propriedades da madeira é de grande relevância para a silvicultura de espécies nativas, por auxiliar no embasamento do manejo florestal frente às necessidades atuais das florestas com finalidade energética. Silva et al. (2021) constataram que os espaçamentos de 3,0 x 2,0 m, 3,0 x 2,5 m e 3,0 x 3,0 m são promissores para produção de biorredutor de boa qualidade. Lima et al. (2022), ao avaliar povoamento experimental de *T.vulgaris* aos 87 e 102 meses de idade observaram que em espaçamentos mais amplos ocorre o aumento da densidade básica e que a idade atua como fator importante no incremento dessa propriedade. Os autores ainda indicam a ocorrência de bifurcações com maior frequência nos espaçamentos mais amplos de 10,5 e 12,0 m² (SILVA et al., 2021; LIMA et al., 2022). Barros-Júnior et al. (2022), ao avaliar a influência da bifurcação na densidade básica em árvores com 87 meses, verificou que a mesma causa efeito negativo.

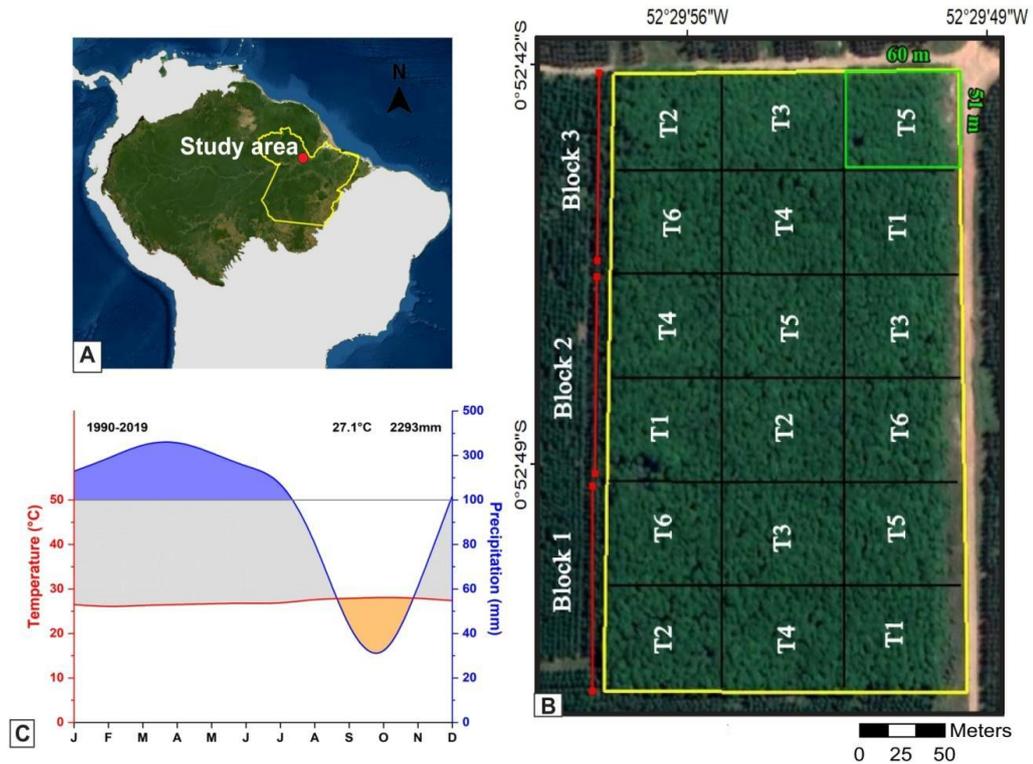
Dado ao exposto, o objetivo deste estudo é de compreender o efeito da bifurcação nas variações da densidade básica e relativa aparente, e das proporções de cerne e alburno da madeira de *T. vulgaris* em diferentes espaçamentos de plantio em povoamento experimental com 102 meses de idade na Amazônia Brasileira.

6. 2 Material e métodos

6.2.1 Área de estudo

Foi realizada coleta de material lenhoso da espécie de *T. vulgaris* em área de plantação experimental com cobertura total de 5,6 ha pertencente à empresa Jari celulose S.A, localizada a aproximadamente 7 km do distrito de Monte Dourado, município de Almeirim na mesorregião do baixo Amazonas, estado do Pará, com as coordenadas 0°52'42.1"S e 52°29'56.7"W (Figura 4).

Figura 4- Delimitação do estado do Pará (linha amarela), área de estudo (ponto vermelho) (A); Delineamento experimental da plantação de *T. vulgaris* localizada na Amazônia oriental, no município de Almeirim, Pará, Brasil (Polígono da Plantação em amarelo, blocos em vermelho e espaçamentos em preto) (B); Climógrafo do município de Almeirim, estado do Pará, Brasil (C).

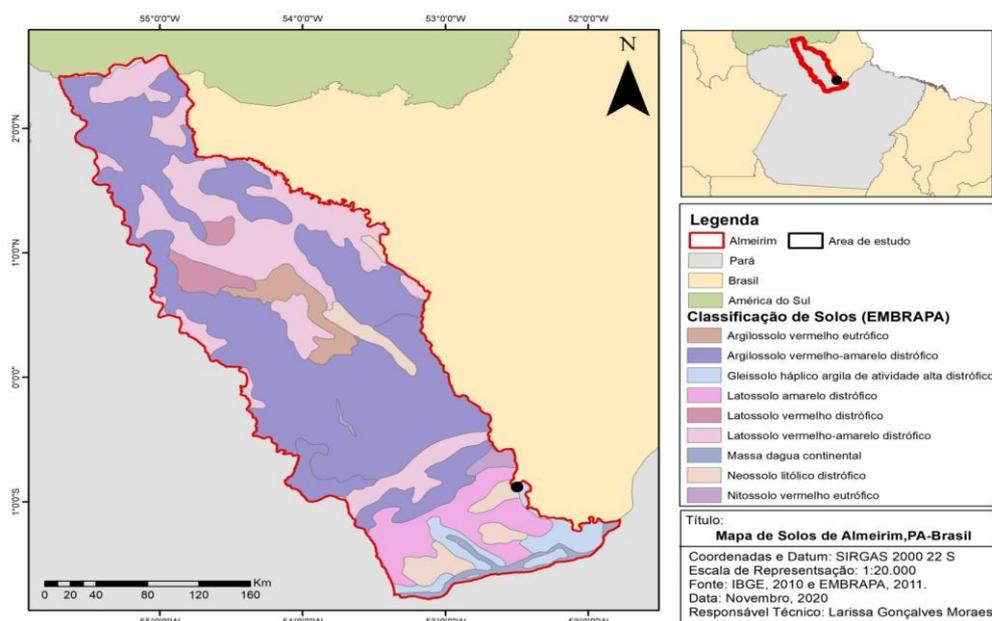


Fonte: Lima et al. (2022).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am que corresponde a ambientes quentes e úmido, com breve estação seca (AMORIM et al., 2010). Apresenta temperatura média anual de 27°C com máximas nos meses de agosto a novembro. O índice pluviométrico anual pode chegar a 428,51 mm no período chuvoso e a 2300 mm por ano, sendo que os maiores registros ocorrem nos meses de março a maio (INMET, 2020; AMORIM et al., 2010).

Com base no mapa pedológico do município de Almeirim (Figura 5), a área estudada é situada em uma região de transição entre Neossolo litótico distrófico e Gleissolo háplico de argila de atividade alta distrófico, que pode apresentar desenvolvimento incipiente, baixa fertilidade natural, tendência a apresentar excesso de alumínio, característico de terrenos com declive e/ou com restrição de drenagem (IBGE, 2020).

Figura 5- Classificação pedológica do Município de Almeirim- PA.



Fonte: Autora, 2022.

6.1.3 Histórico da plantação e delineamento experimental

O experimento foi instalado no ano de 2010 em delineamento de blocos casualizados, composto por 3 blocos, em que cada bloco foi dividido em 6 parcelas, com dimensões de 60 x 51 m (3.060 m²/parcela), constituídas de 6 espaçamentos distintos, distribuídos de forma aleatória em cada bloco (Tabela 2).

Tabela 2- Valores de área útil por planta e densidade de plantio das parcelas de *Tachigali vulgaris* aos 102 meses de idade no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim – PA.

Espaçamento	Área útil (m ² /planta)	Densidade do plantio aos 102 meses (árv/ha)	Árvores bifurcadas (%)	Mortalidade 102 meses (%)	Volume com casca (m ³ /ha)	DAP médio (cm)	DAP _{eq} médio (cm)	HT Média (m)
3,0 x 1,5 m	4,5	1240	27,14	44,23	216,12	12,73	14,50	17,77
3,0 x 2,0 m	6,0	1032	41,66	38,10	197,35	12,70	15,40	17,63
3,0 x 2,5 m	7,5	844	54,73	36,73	175,37	12,57	16,33	17,07
3,0 x 3,0 m	9,0	824	54,79	25,87	201,90	13,13	17,63	17,40
3,0 x 3,5 m	10,5	777	60,19	18,37	181,10	13,23	17,47	17,43
3,0 x 4,0 m	12,0	703	62,12	15,67	207,57	13,77	19,20	18,20

DAP: Diâmetro a 1,30 m do solo; DAP_{eq}: Diâmetro a 1,30 m do solo equivalente; HT: Altura média.

As sementes utilizadas para gerar as mudas para implantação foram obtidas nos municípios de Santarém, Belterra e Almeirim, estado do Pará e ao longo da estrada que liga o

Laranjal do Jari a Macapá, no estado do Amapá. Foi realizado o método de plantio seminal e a área foi preparada segundo o descrito em Rodrigues et al. (2020). Nos anos iniciais da plantação foram realizadas as seguintes intervenções de manutenção: no ano 1 foi executada a limpeza mecanizada e química mecanizada, controle de formigas, adubação inicial com NPK, levantamento de sobrevivência e replantio; e nos anos 2 e 3 foram realizados a: limpeza manual de manutenção, monitoramento de pragas e doenças, limpeza do plantio com motorroçadeira e avaliação de crescimento das parcelas.

6.2.4 Amostragem das árvores e do lenho

As árvores foram abatidas no ano de 2018 com idade aproximada de 102 meses (8,5 anos). As informações das árvores amostradas estão contidas na Tabela 3. No total foram retiradas 54 árvores da plantação sendo 18 árvores de fuste único e 36 com fuste secundário, das quais foram retirados discos de 5 cm de espessura, em posições determinadas de 0%, 1,30 da altura do solo, 25 %, 50%, 75% e 100% ao longo da altura comercial considerada até o diâmetro mínimo de 5 cm com casca. Tal procedimento foi realizado nos fustes principais e nos secundários, quando presentes (Figura 6) e, posteriormente, o material foi seccionado ao meio (em relação à espessura) dando origem a dois discos com 2,5 cm de espessura.

Tabela 3- Informações gerais das árvores amostradas na plantação experimental de *T. vulgaris* aos 102 meses de idade.

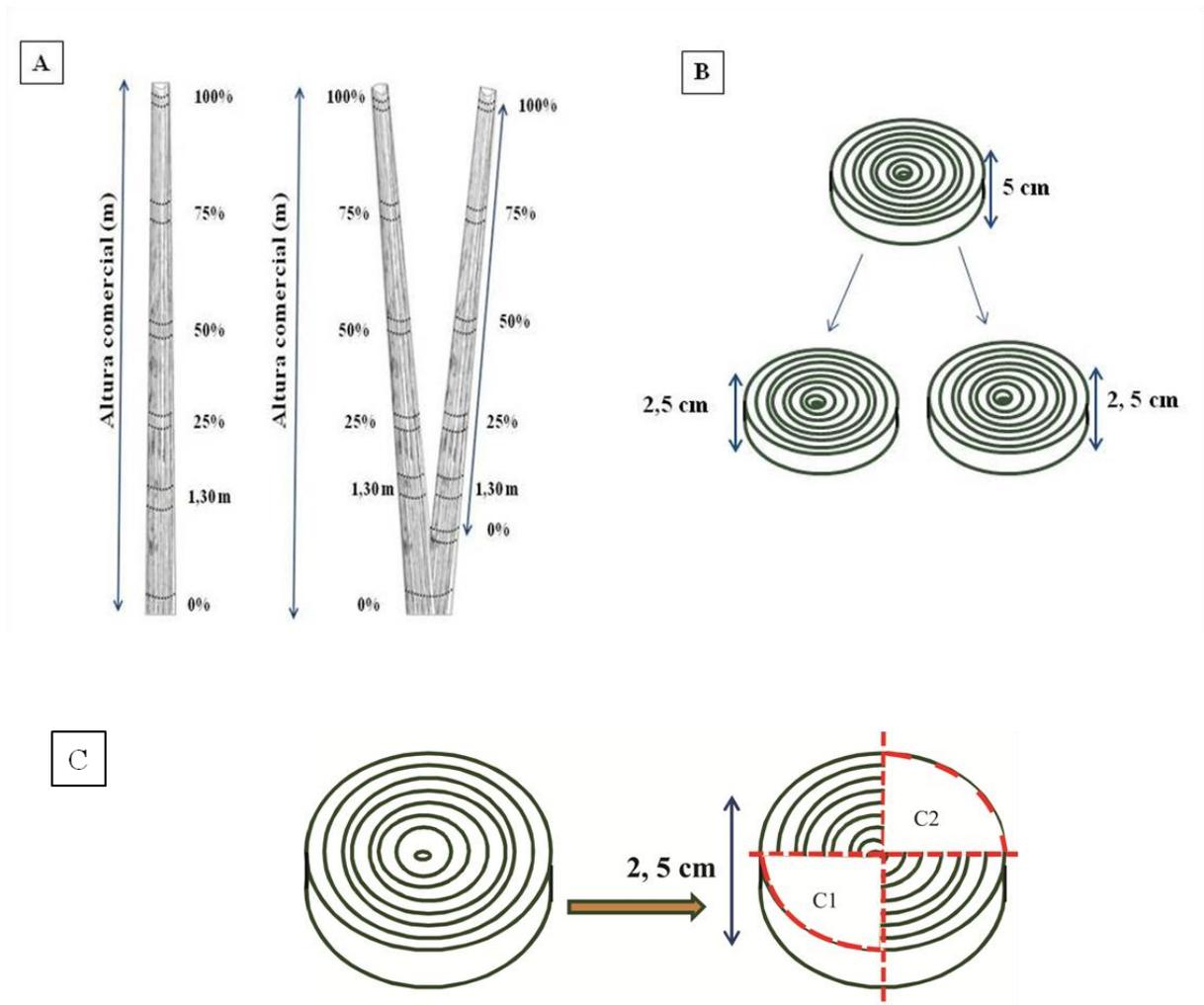
Espaçamento	Tipo de fuste	Bloco	Árvore	Idade (meses)	HT (m)	Hc (m)	DAPsc (cm)	VCC (m ³ /arv)
3,0 x 1,5 m	NB	1	1	102	20,67	16,81	13,55	0,1549
3,0 x 1,5 m	BF	1	2	102	19,30	15,95	13,69	0,1927
3,0 x 1,5 m	BF	1	3	102	21,50	18,52	17,28	0,2746
3,0 x 1,5 m	NB	2	1	102	18,55	15,11	10,82	0,1081
3,0 x 1,5 m	BF	2	2	102	19,90	16,16	13,84	0,1855
3,0 x 1,5 m	BF	2	3	102	19,30	16,28	14,78	0,2053
3,0 x 1,5 m	NB	3	1	102	20,70	17,20	12,07	0,1486
3,0 x 1,5 m	BF	3	2	102	18,70	14,74	12,14	0,1285
3,0 x 1,5 m	BF	3	3	102	20,25	16,56	17,57	0,2135
3,0 x 2,0 m	BF	1	1	102	23,40	18,80	20,75	0,4093
3,0 x 2,0 m	NB	1	2	102	20,50	16,90	13,52	0,1581
3,0 x 2,0 m	BF	1	3	102	20,40	16,56	14,46	0,2051
3,0 x 2,0 m	NB	2	1	102	20,80	16,67	12,43	0,1378
3,0 x 2,0 m	BF	2	2	102	19,60	16,14	15,76	0,2356
3,0 x 2,0 m	BF	2	3	102	20,20	16,60	19,45	0,3184
3,0 x 2,0 m	NB	3	1	102	18,82	15,98	12,00	0,1385
3,0 x 2,0 m	NB	3	2	102	17,93	14,35	13,40	0,1344
3,0 x 2,0 m	BF	3	3	102	17,35	14,32	14,02	0,1360

3,0 x 2,5 m	NB	1	1	102	18,60	14,73	11,77	0,1216
3,0 x 2,5 m	BF	1	2	102	22,30	18,59	15,67	0,2371
3,0 x 2,5 m	BF	1	3	102	21,40	17,92	23,30	0,2948
3,0 x 2,5 m	BF	2	1	102	19,80	17,24	21,28	0,4111
3,0 x 2,5 m	NB	2	2	102	18,50	15,22	10,66	0,1009
3,0 x 2,5 m	BF	2	3	102	20,70	16,98	16,44	0,2583
3,0 x 2,5 m	NB	3	1	102	19,00	15,55	13,16	0,1468
3,0 x 2,5 m	BF	3	2	102	19,93	15,54	16,75	0,2518
3,0 x 2,5 m	BF	3	3	102	18,85	15,98	12,64	0,2308
3,0 x 3,0 m	BF	1	1	102	20,90	17,50	18,42	0,3264
3,0 x 3,0 m	NB	1	2	102	19,60	17,13	14,38	0,1725
3,0 x 3,0 m	BF	1	3	102	21,52	18,12	19,89	0,3602
3,0 x 3,0 m	BF	2	1	102	20,90	16,16	19,32	0,3106
3,0 x 3,0 m	NB	2	2	102	20,17	17,55	12,49	0,1566
3,0 x 3,0 m	BF	2	3	102	19,80	16,34	16,79	0,2603
3,0 x 3,0 m	BF	3	1	102	20,87	16,72	19,71	0,3449
3,0 x 3,0 m	NB	3	2	102	21,35	18,00	14,28	0,1979
3,0 x 3,0 m	BF	3	3	102	20,50	16,00	15,12	0,2111
3,0 x 3,5 m	BF	1	1	102	19,70	16,23	17,58	0,2770
3,0 x 3,5 m	BF	1	2	102	20,40	17,02	19,58	0,3406
3,0 x 3,5 m	NB	1	3	102	17,70	16,58	13,32	0,1553
3,0 x 3,5 m	BF	2	1	102	19,95	16,36	17,97	0,2732
3,0 x 3,5 m	NB	2	2	102	21,80	18,22	17,72	0,2673
3,0 x 3,5 m	BF	2	3	102	20,20	16,82	20,79	0,3429
3,0 x 3,5 m	BF	3	1	102	19,96	16,56	17,95	0,3116
3,0 x 3,5 m	BF	3	2	102	17,34	13,24	14,94	0,1768
3,0 x 3,5 m	BF	3	3	102	19,40	16,24	21,87	0,4139
3,0 x 4,0 m	BF	1	1	102	22,23	18,43	23,14	0,4754
3,0 x 4,0 m	BF	1	2	102	21,40	17,50	21,74	0,3726
3,0 x 4,0 m	NB	1	3	102	21,30	18,40	15,37	0,2376
3,0 x 4,0 m	BF	2	1	102	20,70	16,50	14,55	0,2002
3,0 x 4,0 m	NB	2	2	102	21,52	17,75	19,15	0,2913
3,0 x 4,0 m	BF	2	3	102	18,90	15,10	15,87	0,2171
3,0 x 4,0 m	BF	3	1	102	20,00	16,60	20,99	0,3741
3,0 x 4,0 m	BF	3	2	102	19,40	16,23	17,40	0,2463
3,0 x 4,0 m	NB	3	3	102	20,00	16,30	14,17	0,1702

NB: árvores não bifurcadas; BF: árvores bifurcadas; HT: altura total (m); Hc: altura comercial (m); DAP_{sc}: diâmetro altura do peito sem casca; VCC: volume com casca.

Um disco foi seccionado em serra circular em quatro cunhas, em que as duas menores e opostas foram destinadas a determinação da densidade básica da madeira. O outro disco foi seccionado ao meio, do qual apenas uma porção foi utilizada para as análises de densitometria de raios-X.

Figura 6- Esquema de coleta do lenho de *T. vulgaris* no fuste (A), divisão para análises (B), preparo para análise de densidade básica (C).



A determinação da densidade básica 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 de amostragem ao longo do fuste. A densidade básica média da árvore foi calculada a partir da média aritmética de cada amostra de cada posição longitudinal de amostragem.

6.2.5 Classificação em percentagem da densidade básica das árvores do plantio

Foi realizada em cada ponto de amostragem do fuste a classificação da densidade básica por espaçamento inicial de plantio e por tipo de fuste, em que valores $< 0,50 \text{ g cm}^{-3}$ foram classificados como densidade básica baixa e valores $\geq 0,50 \text{ g cm}^{-3}$ como média densidade básica. Esta metodologia foi adotada por Barros Junior et al. (2022).

6.2.6 Determinação da densidade aparente (g cm^{-3}) por microdensitometria de raios-X

6.2.6.1 Preparo das amostras

A partir do material dos discos de todas as alturas, foram coletadas da seção transversal 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 (Figura 7).

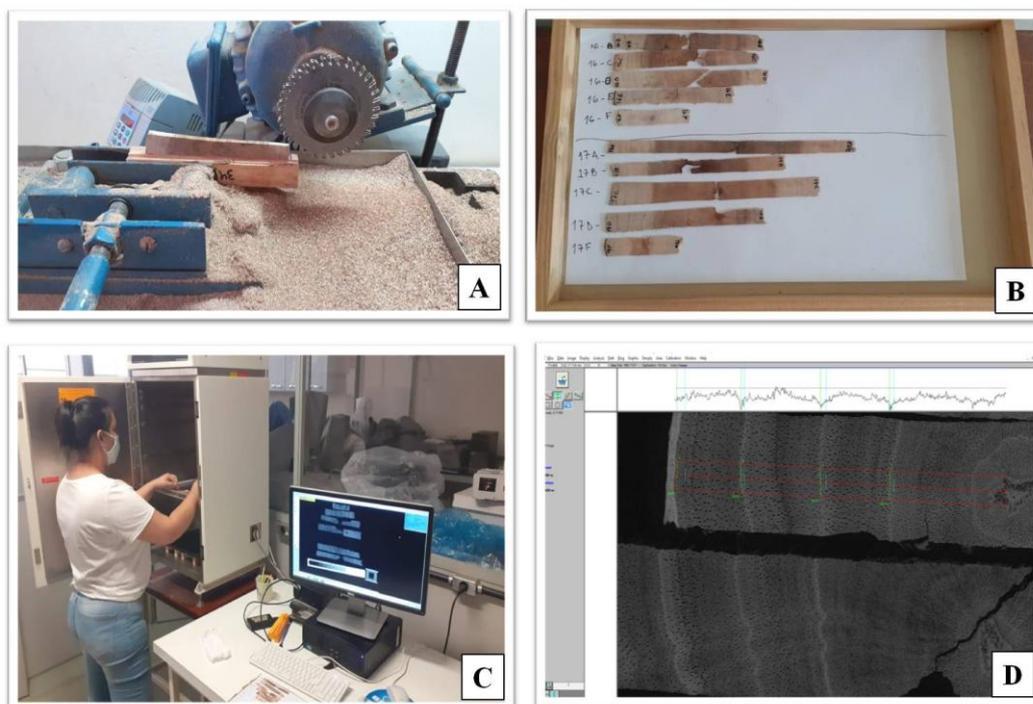
A colagem foi realizada de modo que haja o alinhamento perpendicular das fibras e vasos em relação à linha de corte. Em seguida, em equipamento de dupla serra circular paralela, o material foi cortado na direção transversal gerando corpos de prova com dimensão final de aproximadamente 1,4 cm de espessura \times 1 cm de largura \times comprimento igual ao diâmetro do disco inicial. Para melhor precisão dos resultados, os corpos de prova foram submetidos à aferição da espessura com paquímetro.

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 (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

6.2.6.2 Análise da microdensitometria de raios-X

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, em que foram irradiadas por 3 segundos com ajuste automático da potência (Figura 7). Após esta etapa, foi obtida uma imagem digital em escala de cinza. Para que se possam obter informações quantitativas, as amostras foram radiografadas juntamente com dois tipos diferentes de escala uma escala para medida de área (1 cm^2) e uma escala de acetato de celulose. Em seguida, as imagens foram analisadas com auxílio do *Software WinDendro*™ (Regent Instruments Inc.) para a determinação dos valores pontuais de microdensidade aparente no sentido radial das árvores de *T. vulgaris*.

Figura 7- Preparo das amostras em serra dupla (A), amostras para obtenção das imagens digitais do lenho (B), organização das amostras em equipamento de raios X (C), imagem digital do lenho de *T. vulgaris* (D).



6.2.6.3 Análise dos perfis de variação radial e longitudinal de densidade aparente

Para a construção dos perfis de variação da densidade aparente do lenho nas direções radial (medula-casca) e longitudinal (base-topo) foram utilizados os valores de microdensidade obtidos nas secções transversais nas alturas relativas de 0% (base), DAP, 25%, 50%, 75% e 100% ao longo da altura comercial e em um dos raios das árvores. A seleção das árvores representativas de cada espaçamento da plantação foi baseada nos critérios de: (I) árvores com amostras em todas as alturas de coleta em pelo menos um dos raios e (II) boa qualidade da imagem digital para leitura da microdensidade.

Foi aplicado o método de interpolação considerando a espacialidade e a sua influência no comportamento dos dados, permitindo melhor compreensão da distribuição da densidade aparente no interior das árvores e nos tratamentos.

Os pontos de interpolação foram determinados a partir: (I) amostra em posição longitudinal com raio de maior número de registros de microdensidade; (II) redução do banco de dados com base na amplitude da amostra de referência; e (III) A partir da redução do banco de dados foram criados pares de coordenadas entre a média da microdensidade e a distância radial para manter a espacialidade dos dados.

A redução do banco de dados foi realizada no *Software* estatístico RStudio 1.4.1717, utilizando os pacotes *dplyr*, *tidyr* e *readr* para a manipulação dos dados. A interpolação dos pontos foi realizada em *Software* de GIS, com a ferramenta Global Polynomial Interpolation.

6.2.7 Determinação da proporção de cerne e alburno

Para a determinação das áreas de cerne e alburno os discos da altura do DAP dos fustes principais e secundários foram lixados e fotografados em ambiente com controle de luminosidade, escala, ângulo e posição da câmera a fim de padronizar as fotografias (Figura 8A).

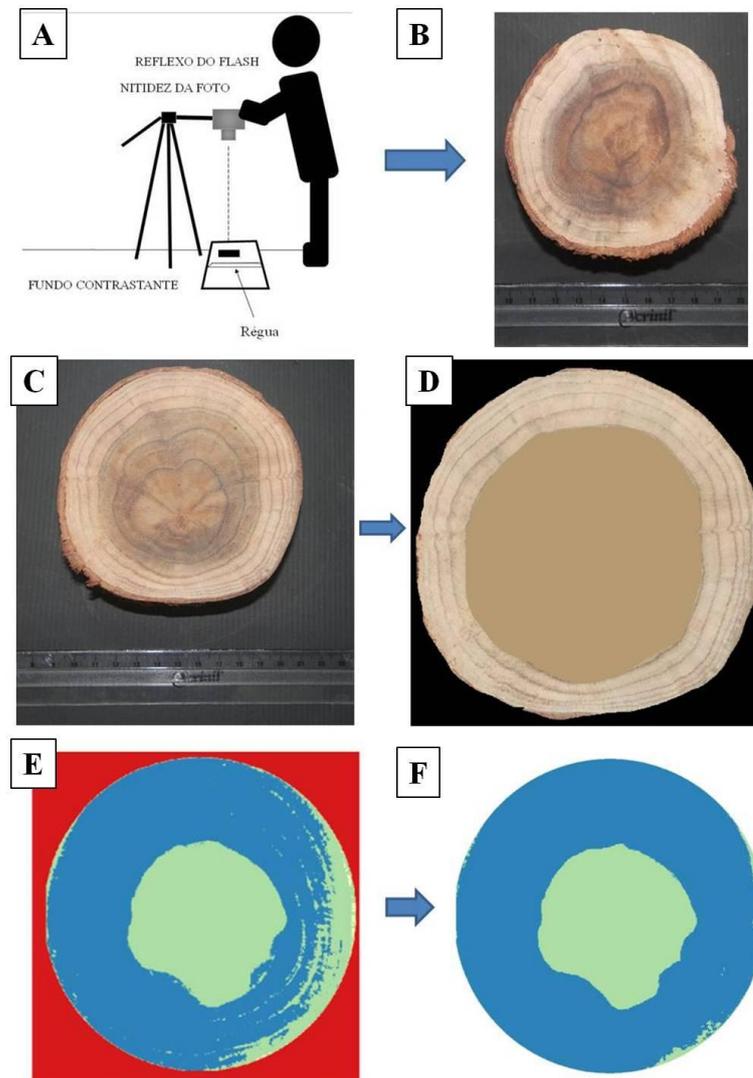
As imagens passaram por tratamento no programa de manipulação de imagem GIMP 2.10.2, no qual foram realizados o recorte de borda para ampliação do disco, determinação dos valores de pixels em 1 cm da imagem com o auxílio da ferramenta de medidas e delimitação preliminar da área de cerne com as ferramentas de recorte livre e preenchimento (Figura 8B; 8C; 8D). Os fragmentos de casca presentes nos discos foram removidos com a ferramenta de recorte livre a fim de evitar interferências na quantificação da área de cerne. Após os procedimentos, a imagem foi salva no formato TIFF.

A quantificação do cerne e alburno foi realizada pelo método de classificação de cores utilizando o *Software* QGIS versão 3.14.15 (PI). As imagens dos discos salvas anteriormente foram carregadas no programa e avaliadas individualmente. A classificação foi executada a partir da redenização em valores únicos de cores na banda espectral vermelha (que possui maior intervalo de captação de pixels). As cores assumidas fora das áreas de interesse foram descartadas e as de interesse passaram por ajuste até tornarem-se uniformes (Figura 8E e 8F).

Os intervalos assumidos por cada cor nas áreas de cerne e alburno foram anotados e reservados. Com a ferramenta de processamento de reporte da camada raster em valores únicos foi gerado o relatório contendo o número de pixels utilizados por cada cor correspondente as áreas de cerne e alburno e salvo no formato HTML.

O relatório gerado foi carregado no Microsoft Excel para a realização dos cálculos de áreas. O valor de pixel em 1 cm da imagem obtido anteriormente no GIMP 2.10.2 foi transformado em cm². A área de cerne e alburno foi obtida pela soma dos pixels no intervalo assumido pela cor predominante nas áreas no *Software* QGIS versão 3.14.15 (PI), em razão da quantidade de pixels em 1cm² da imagem, dessa forma foi possível obter área total do disco em cm², área de cerne e alburno em cm² e porcentagem e a relação C/A.

Figura 8- Esquema para padronização das imagens dos discos (A); Exemplo de fotografia para a realização da metodologia (B), preparo das imagens para análise (C e D), processamento das imagens no QGis (E e F).



6.2.8 Análise estatística dos dados

Foi realizado ajuste de modelo de regressão polinomial de grau 3 para as variáveis de densidade básica da madeira e altura comercial a fim de verificar as variações da densidade em função do incremento em altura dos fustes. O ajuste foi realizado com o auxílio do *software* estatístico R Studio versão 4.2.1 e dos pacotes ggplot2, tidyverse e pacman.

Para a classificação da densidade básica foram utilizadas estatísticas descritivas simples de média e coeficiente de variação. Os dados de cerne e alburno foram submetidos a análises de variância univariadas utilizando-se o delineamento em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, em que as parcelas foram constituídas pela densidade de árvores por hectare atual nos espaçamentos iniciais de plantio (4,5; 6,0; 7,5; 9,0; 10,5 e 12,0

m²/planta) e as subparcelas pelos pelo tipo de fuste (não bifurcado e bifurcado), conforme modelo estatístico apresentado na Eq. 1. Quando verificado efeito estatístico significativo do fator densidade de árvores por hectare procedeu-se ao ajuste de modelos de regressão linear simples.

$$Y_{ikj} = \mu + D\acute{a}rvore_i + \beta_j + \epsilon_{ij} + TF_k + (D\acute{a}rvore \times TF)_{ik} + \epsilon_{ikj} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: Y_{ikj} é a observação (cerne %, alburno %, relação cerne/alburno, área do disco) do i -ésimo nível do fator densidade de árvores por hectare, no k -ésimo nível do fator tipo de fuste, no j -ésimo bloco; μ é a constante geral do modelo; $D\acute{a}rvore_i$ é o efeito do i -ésimo nível do fator densidade de árvores por hectare, efeito fixo; β_j é o efeito do j -ésimo bloco; ϵ_{ij} é o erro experimental entre i -ésimo nível do fator densidade de árvores por hectare e o j -ésimo bloco (erro a); TF_k é o efeito do k -ésimo nível do fator tipo de fuste, efeito fixo; $(E \times TF)_{ik}$ é o efeito da interação do i -ésimo nível do fator densidade de árvores por hectare com o k -ésimo nível do fator tipo de fuste, efeito fixo; ϵ_{ikj} é o erro experimental entre i -ésimo nível do fator densidade de árvores por hectare do plantio, j -ésimo bloco e k -ésimo nível do fator tipo de fuste (erro b), suposto normal e independentemente distribuído com média 0 e variância σ^2 .

Para verificar a validade das análises de variância foram testadas as hipóteses básicas de independência, homogeneidade de variâncias e normalidade dos resíduos do modelo estatístico utilizado (Equação 1). Para isso foi considerado o nível de 5% de significância para os testes de homogeneidade de variâncias (testes de Bartlett e Levene), normalidade dos resíduos (teste Shapiro-Wilk).

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando o *Software* estatístico R versão 4.1.1, pacote ExpDes.

6.3 Resultados e discussões

6.3.1 Variações da DB da madeira nos sentidos longitudinal do tronco de *T. vulgaris*.

As variações da densidade básica (DB) da madeira no sentido longitudinal das árvores de *T. vulgaris* podem ser observadas nas Figuras 9 e 10. As árvores não bifurcadas (NB) (Figura 9) apresentam maior número de posições ao longo do fuste com $DB \geq 0,50 \text{ g cm}^{-3}$, demonstrando que esses indivíduos possuem fuste de DB classificada como média. Em contrapartida, as árvores com bifurcação (BF) (Figura 10) demonstraram maior quantidade das posições avaliadas com valores $< 0,50 \text{ g cm}^{-3}$, o que representa uma madeira com DB

baixa. Esse resultado indica que a bifurcação pode ser responsável por induzir a redução da DB madeira.

De modo geral, observa-se o decréscimo de DB da base até os quatro primeiros metros dos fustes com leve aumento até o topo, tanto para árvores NB como para as BF, independentemente do espaçamento. Esse padrão de variação ao longo do tronco das árvores foi relatado por Barros Júnior et al., (2022) em estudo com *T. vulgaris* aos 87 meses e Boschetti et al., (2015) ao avaliar híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 6 anos de idade. Nos espaçamentos mais adensados de 3,0 x 1,5 m, 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 2,5 m esse decréscimo ocorre de forma mais acentuada nas árvores BF e mais suave nas NB. Nos espaçamentos mais amplos de 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m a diminuição dos valores de DB, ocorre de forma suave em todos os tipos de fuste. Isso ocorre, pois espaçamentos mais adensados tendem a provocar maior variação das propriedades do lenho e a ocorrência de ramificações aumentam a competição por recursos, tornando as árvores bifurcadas mais suscetíveis aos fatores ambientais que podem contribuir para a diminuição da DB (BARROS JÚNIOR et al., 2022).

Em eucalipto, os maiores espaçamentos de plantio resultam, normalmente, em maiores valores de densidade da madeira quando comparados aos menores espaçamentos (SANTOS et al., 2021, BRITO et al., 2021). No entanto, Gomes et al., (2021) encontrou os maiores valores de densidade da madeira de eucalipto para o espaçamento 3,0 x 3,0 m quando comparado aos maiores espaçamentos testados na pesquisa de 3,0 x 5,0 m e 3,0 x 6,0 m . Neste estudo, o *T. vulgaris* apresentou as menores variações de DB no espaçamento de 3,0 x 3,0 m, com coeficiente de variação (CV%) de 4,44%, sendo o espaçamento com 3,0 x 2,0 m com maior variação da DB de 9,41%.

Figura 9- Variação longitudinal da densidade básica de árvores não bifurcadas de *T. vulgaris* nos seis espaçamentos iniciais de plantio avaliados.

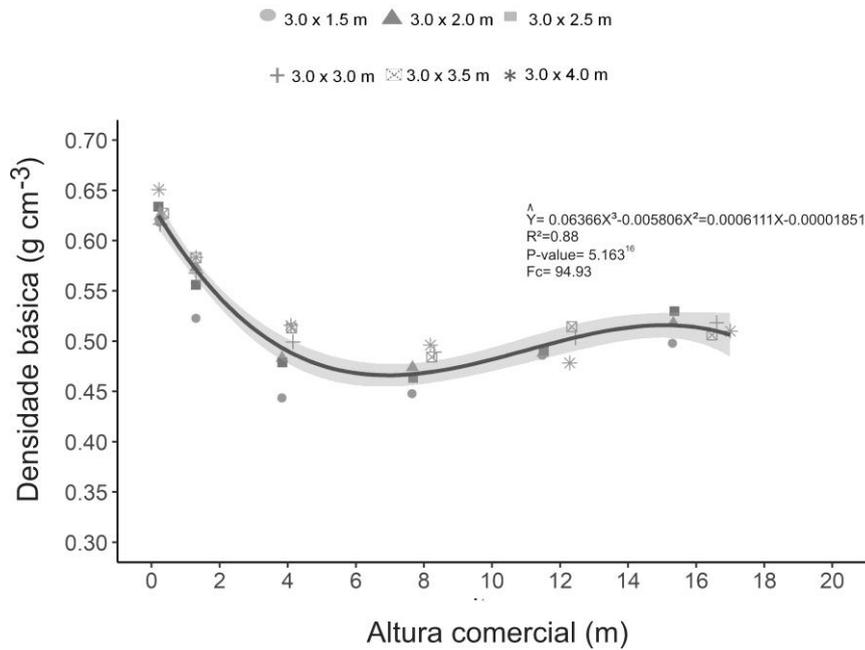
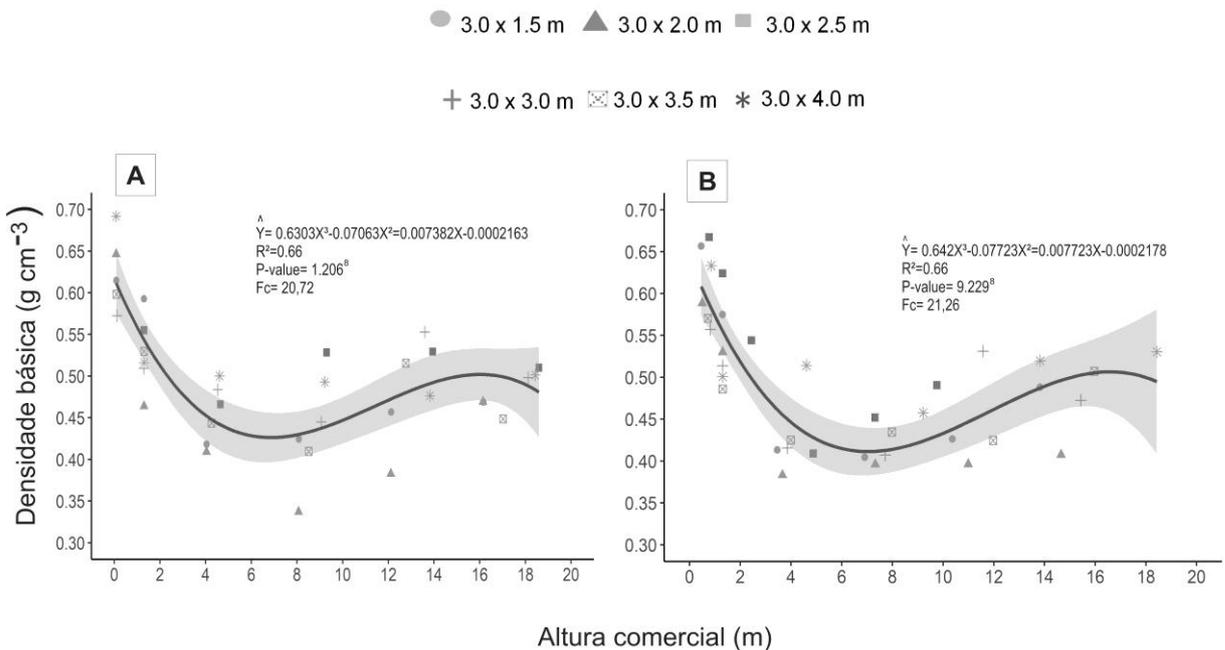


Figura 10- Variação no sentido base-topo da densidade básica nos fustes principais (A) e secundários (B) de *T. vulgaris* nos seis espaçamentos de plantação avaliados.



6.3.2 Classificação da densidade básica das árvores por espaçamento e por tipo de fuste para *T. vulgaris*

A classificação das árvores quanto aos valores de densidade básica, considerando os espaçamentos e tipos de fuste, pode ser observada na Figura 11.

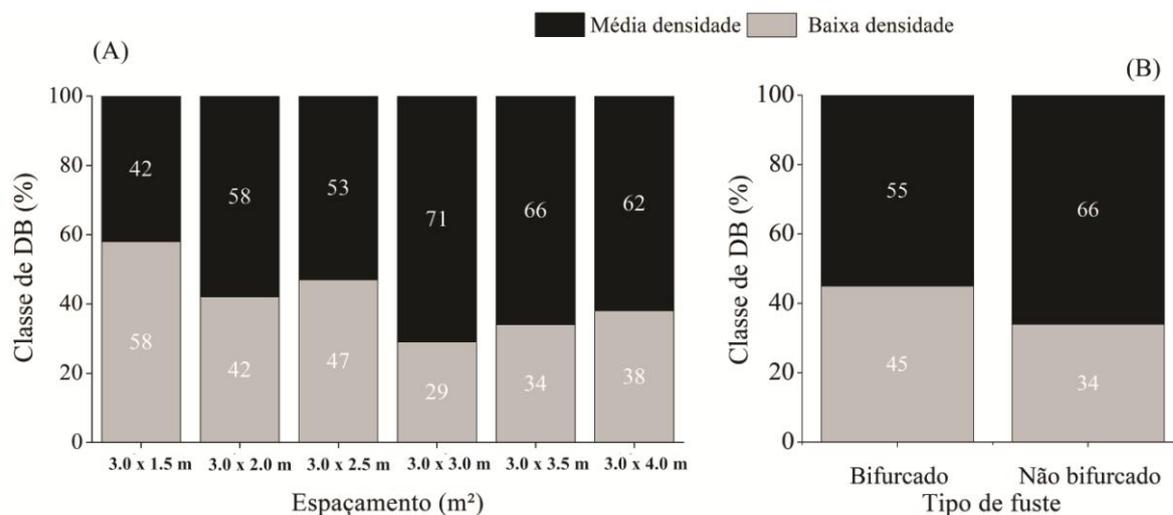
Os espaçamentos de 3,0 x 1,5 m, 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 2,5 m apresentaram as maiores quantidades de posições longitudinais com densidade básica classificada como baixa, variando de 42 a 58%. Nesses espaçamentos ocorre uma maior competição interespecífica por recursos como água, luz e nutrientes, o que acarreta a diminuição da taxa de produção de substâncias fotoassimiladas como celulose, hemiceluloses, pectina e monossacarídeos (TORRES et al., 2016). Uma vez reduzida à disponibilidade dessas substâncias, o processo de formação e expansão da parede celular torna-se ineficiente, resultando em parede de menor espessura o que proporciona a formação de madeira de menor densidade (BARROS JÚNIOR et al., 2022).

Nesse panorama, os espaçamentos mais amplos de 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m apresentaram maior quantidade de árvores com média DB ($\geq 0,50 \text{ g cm}^{-3}$), variando de 62% a 71%. A maior disponibilidade de recursos, devido à menor competição, proporciona a formação de madeira com maior densidade. Além disso, maiores espaçamentos contribuem para o desenvolvimento em diâmetro das árvores o que pode influenciar na formação precoce de madeira madura mais densa (MAGALHÃES et al., 2020; MOULIN et al., 2020). Os maiores espaçamentos de plantio (3 m x 3 m; 3 m x 5 m e 3 m x 6,5 m) também resultaram em maiores valores de densidade básica em clone de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus brassiana*, aos 4,5 anos em estudo conduzido por Gomes et al., 2021).

As árvores BF possuem 55% das suas posições longitudinais com média DB ($\geq 0,50 \text{ g cm}^{-3}$), e 45% com baixa DB ($< 0,50 \text{ g cm}^{-3}$), por outro lado, os indivíduos NB apresentam 66% de suas posições no sentido longitudinal com média DB e 34% com baixa DB. Dessa forma, árvores NB detém maior número de posições ao longo do fuste com DB classificada como média.

A diminuição da DB nos fustes secundários foi observada nos estudos de Barros Júnior et al. (2022) com *T. vulgaris* aos 87 meses de idade. Os autores identificaram influência negativa da bifurcação nessa propriedade, e apontaram o menor emprego de energia e recursos no desenvolvimento da parede celular e a maior proporção de madeira juvenil nos fustes secundários como os fatores que resultam na menor densidade básica.

Figura 11- Classificação da densidade básica das árvores por espaçamento (A) e por tipo de fuste (B) para *T. vulgaris* em plantio experimental homogêneo.



6.3.3 Perfis de variação radial e longitudinal da microdensidade de *T. vulgaris*

A análise qualitativa da variação dos perfis mostrou aumento da microdensidade no sentido medula-casca das árvores avaliadas até aproximadamente os 6 metros de altura em todos os espaçamentos do experimento, tal como pode ser observado pela variação de tonalidades de azul escuro (do azul escuro, menor densidade obtida, ao vermelho, maior densidade de madeira) (Figura 12). Entretanto, ao avaliar as demais posições longitudinais dos fustes, nota-se uma mudança no padrão de variação entre os espaçamentos.

A maior densidade da madeira presenciada nas regiões mais periféricas do fuste, principalmente na base e DAP das árvores, ocorre devido à produção de madeira com idade cambial aproximada a idade da plantação, que é formada nos anéis mais externos, resultando na variação no sentido radial (OLIVEIRA et al., 2018). Resultados semelhantes ao deste estudo foram constatados por Omonte e Valenzuela (2011) com *Eucalyptus regnans*. Outro fator que pode estar associado a maior densidade na base é a ocorrência da bifurcação nessa região que durante o processo de formação da ramificação, promove o enrigecimento do tecido lenhoso para que haja maior resistência mecânica para a sustentação, o que, contribui para o aumento da densidade no local de junção, o que torna mais perceptível a redução da DB ao longo do fuste (DAHLE & GRABOSKY, 2010; ÖZDEN et al., 2017).

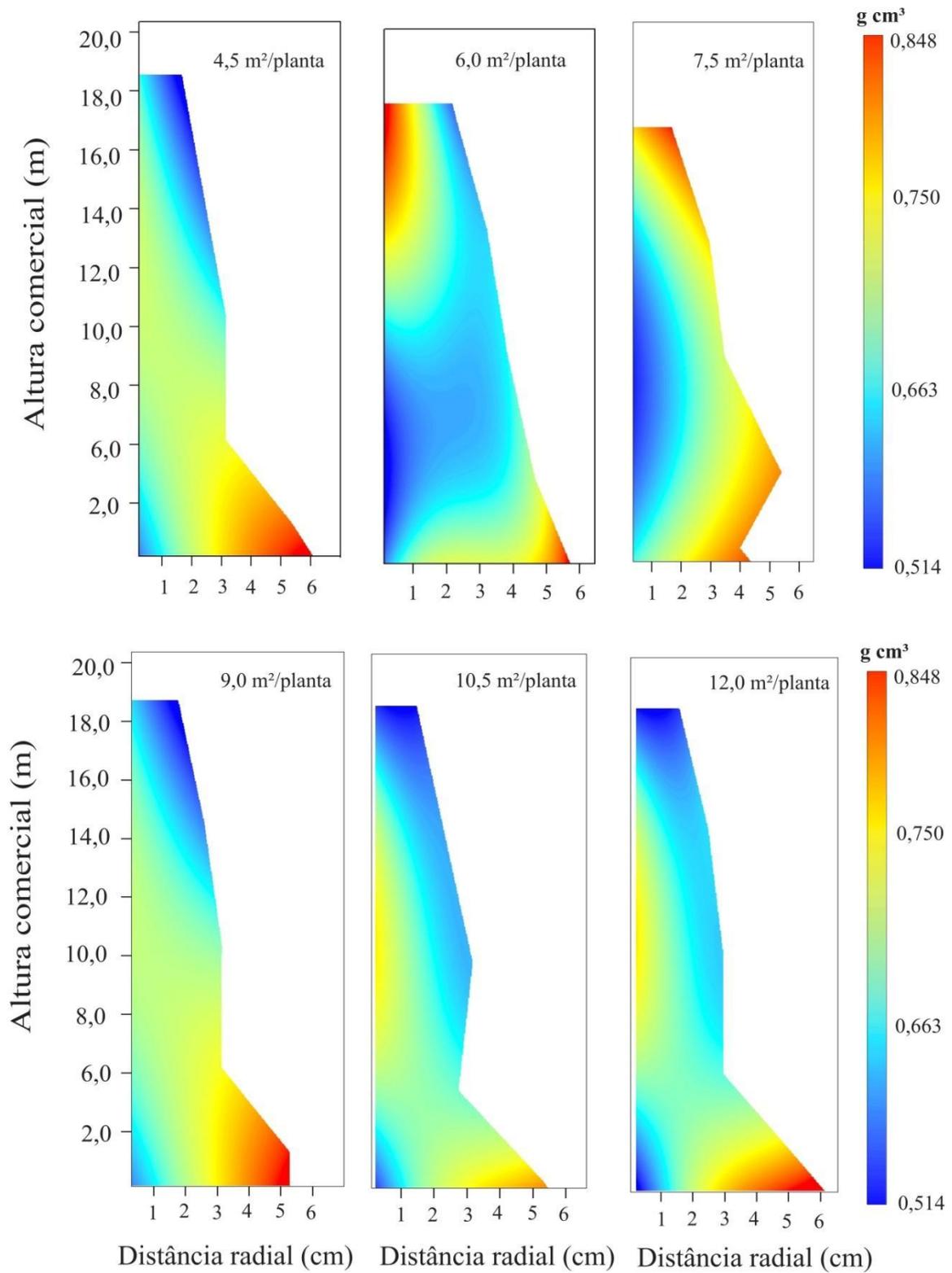
Os espaçamentos de 3,0 x 3,0 m e 3,0 x 2,5m apresentaram maior variação da microdensidade. No espaçamento de 3,0 x 2,0 m há uma tendência de diminuição da variável na direção base-topo, com distribuição sem grandes variações no sentido medula-casca até os

12 metros de altura, onde há a sua redução expressiva no sentido radial, enquanto que no espaçamento de 3,0 x 2,5 m observa-se o comportamento de aumento da microdensidade no sentido medula-casca em todo o fuste, no qual os valores são percebidos mais intensamente na base e topo. Para as árvores avaliadas nas áreas de 3,0 x 1,5 m, 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m houve uma similaridade no comportamento da microdensidade de diminuição no sentido base-topo e medula-casca.

Os padrões de diminuição da microdensidade aparente no sentido base-topo podem ser explicados, além da diferença da idade cambial da madeira produzida com o incremento em altura, pela frequência, diâmetro, largura, comprimento e espessura dos elementos anatômicos que se diferenciam de acordo com o tipo de lenho (juvenil, transição, maduro) e influenciam diretamente na densidade (PALERMO et al., 2015).

O aumento da densidade no sentido medula-casca observado no espaçamento de 3,0 x 2,5 m foi relatado por Schimleck et al. (2018) em seu estudo com *Pinus taeda* L. O aumento da densidade no topo pode estar relacionados com a formação de lenho de tração como uma resposta mecânica ao *estresse* ocasionado (I) pela inserção dos galhos da copa; (II) pelo adensamento e competição por luz; e (III) a combinação entre esses fatores (BOSCHETTI et al., 2020).

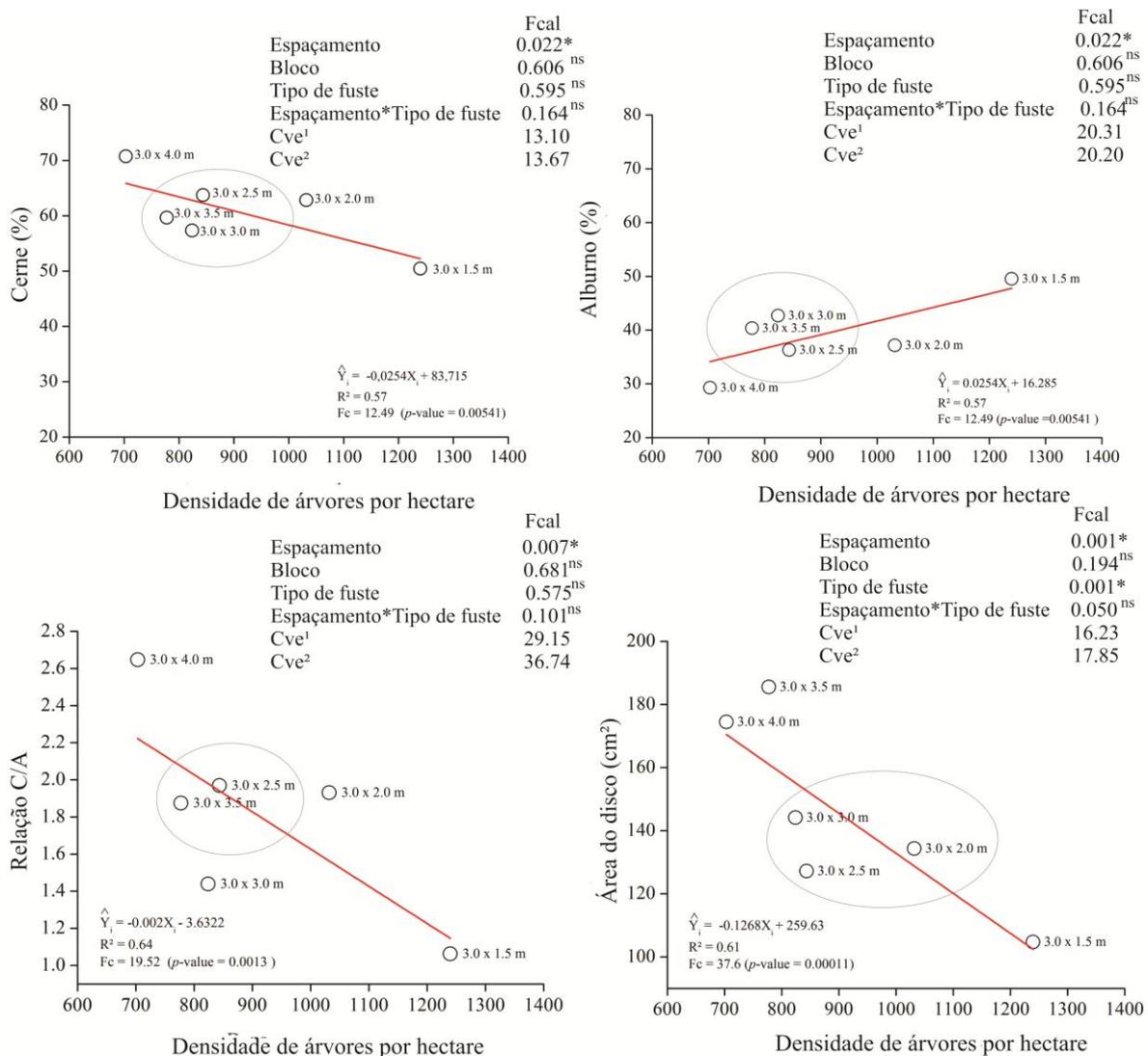
Figura 12- Perfil de variação base-topo e medula-casca da microdensidade aparente das árvores dos espaçamentos de plantio avaliados de *T. vulgaris*, aos 102 meses de idade.



6.3.4 Proporção de cerne/alburno e sua relação com a densidade básica da madeira

Para as características do lenho da *T. vulgaris* (percentuais médios da área de cerne, alburno, relação C/A, área do disco) não foi observado efeito estatístico significativo da interação entre o espaçamento inicial de plantio e tipo de fuste, ou seja, os fatores estudados são independentes (Figura 13).

Figura 13- Efeito do espaçamento na área percentual de cerne, alburno, relação C/A e área do disco de *T. vulgaris*.



QM: quadrado médio; Fc = Fcalculado; CV: coeficiente de variação experimental; *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

O efeito do espaçamento inicial de plantio foi pronunciado para as variáveis de percentuais médios da área de cerne, alburno e relação C/A, enquanto que para a área do disco houve efeito do espaçamento e tipo de fuste, que pode estar relacionada com a maior quantidade de fustes por área, em consequência da maior ocorrência de bifurcações,

principalmente nos espaçamentos mais amplos (PATRÍCIO, 2021). Para essas variáveis observa-se que quanto menor a densidade de árvores no espaçamento, maiores são os valores retornados, exceto para área percentual de alborno que segue uma tendência inversamente proporcional ao comportamento da área percentual de cerne.

Esse comportamento é esperado, uma vez que árvores em maiores espaçamentos tendem a ter maior desenvolvimento, principalmente em diâmetro, que ao levar em consideração outros fatores, como idade e características da espécie, a exemplo do rápido crescimento apresentado pelo *T. vulgaris*, podem contribuir para formação precoce de cerne, culminado em altas proporções, mesmo em plantações jovens (MOULIN et al., 2020). Em estudo realizado por Santos et al., (2020) em plantação clonal com *E. grandis* × *E. urophylla* as taxas de crescimento em diâmetro, altura e volume influenciaram no aumento das proporções de cerne nas árvores.

A média de cerne encontrada foi de 50,46% a 70,73%. Os maiores valores de cerne foram observados nos espaçamentos de 3,0 x 3,0 m (62,82%), 3,0 x 2,5 m (63,42%) e 3,0 x 4,0 m (70,73%). Estudo realizado por Gominho & Pereira (2005) em plantações experimentais do gênero *Eucalyptus* encontraram variações de cerne na ordem de 58% e 62% em espaçamentos de 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m, respectivamente, aos 9 anos de idade. Almeida et al (2020) ao avaliar as porcentagens de cerne em *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos, em diferentes sítios e classes de diâmetros encontrou variações de 4 e 47%.

Os espaçamentos de 3,0 x 2,5 m, 3,0 x 3,0 m e 3,0 x 3,5 m demonstraram comportamento semelhante, para percentual de cerne e alborno, e os de 3,0 x 2,5 m e de 3,0 x 3,5 m na relação C/A, provavelmente devido a mortalidade de árvores, que chegou a reduzir em até 40% a densidade inicial, segundo o relatado no estudo de Patrício (2021) ao avaliar a densidade de árvores por hectare em diferentes idades, conduzido no mesmo povoamento desta pesquisa.

As relações C/A variaram de 1,06 a 2,64, os espaçamentos de 3,0 x 3,0 m e 3,0 x 1,5 m obtiveram os menores valores de 1,06 e 1,44, respectivamente. As relações C/A encontradas variaram de 1,21 a 2,79 nos fustes principais e de 1,32 a 3,39 nos fustes secundários, em que é possível perceber um aumento da relação C/A entre os fustes principais e secundários das árvores bifurcadas.

A baixa relação C/A reflete em uma menor área de cerne e menor dificuldade de secagem da madeira, o que diminui o tempo demandado para execução desta etapa, além disso, há uma redução da quantidade de finos e da friabilidade do carvão, pois o material terá mais facilidade para liberar os gases gerados no processo de carbonização (PEREIRA et al., 2013).

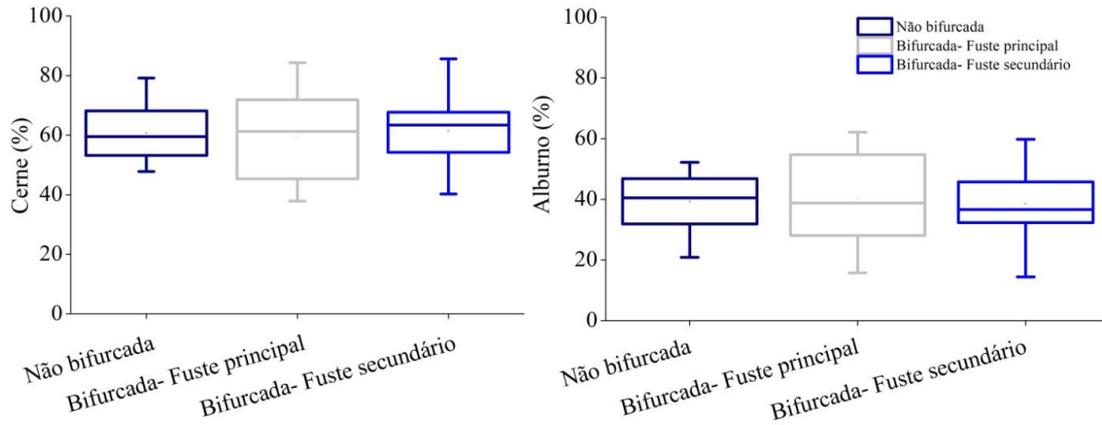
Para finalidade energética é desejável madeira com baixa relação C/A e densidade básica $\geq 0,50 \text{ g cm}^3$, nesse contexto o espaçamento de 3,0 x 3,0 m avaliado, foi o mais promissor para a obtenção de matéria prima com qualidade adequada para a produção de carvão vegetal. Autores como Pereira et al., (2013); Pinheiro (2013); Arantes (2009) e Trevisan et al. (2008) observaram em seus estudos o aumento da densidade básica no sentido medula-casca, obtendo os maiores valores na região externa, próximo a casca. Esse comportamento é observado em povoamentos com idade aproximada de sete anos e que são constituídos majoritariamente por madeira jovem na região central e madeira madura próxima a casca, além disso, a ausência de substâncias como extrativos fenólicos e óleos nas células do parênquima radial, contribuem para o aumento da densidade básica e redução da relação C/A (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

Devido a isto, a determinação das proporções de cerne e alburno e a influência exercida do espaçamento e tipo de fuste na sua formação, são informações importantes para tomadas de decisão para o planejamento florestal, uma vez que este pode interferir na taxa de transição do lenho juvenil para o lenho maduro, e conseqüentemente, na qualidade final da madeira produzida (MOULIN et al., 2020).

As árvores não bifurcadas e bifurcadas não apresentaram diferenças significativas nas proporções de cerne e alburno (Figura 14). As médias percentuais de cerne encontradas foram de 60,03% $\pm 11,98$ para não bifurcadas e de 61,54% $\pm 11,98$ para as bifurcadas. Ao analisar as árvores bifurcadas nota-se que os fustes principais possuem menor percentual médio de cerne em relação aos fustes secundários, com 60,73%, enquanto que os fustes secundários apresentaram média de 68,49%. As variações ambientais, taxas de crescimento, classes de diâmetro e o estímulo hidráulico do tronco são fatores que podem contribuir para as variações das porcentagens de cerne nas árvores (Santos et al., 2021). Em estudo realizado por Almeida et al., (2020) a porcentagem de cerne em clones de *E. urophylla*, aos 6 anos de idade em diferentes sítios, foi maior em classes de diâmetros menores. Ainda segundo os autores, a formação de cerne pode ocorrer como uma forma de manter uma proporção ótima de alburno,

resultante de um estímulo hidráulico, em que este é um processo regulado pela própria árvore, podendo ser decisivo para a sua sobrevivência e adaptação às diversas condições ambientais.

Figura 14- Porcentagem de cerne e albarno nas árvores não bifurcadas e nos fustes principais e secundários das árvores bifurcadas.



Para a densidade básica no DAP e por fuste não foi verificada interação estatisticamente significativa de nenhum dos fatores avaliados (Tabela 4). As médias de densidade básica a altura do DAP variaram de $0,530 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,600 \text{ g cm}^{-3}$ com os menores valores no espaçamento de $3,0 \times 1,5 \text{ m}$ ($0,530 \text{ g cm}^{-3}$) e os maiores nos espaçamentos de $3,0 \times 3,5 \text{ m}$ ($0,600 \text{ g cm}^{-3}$) e $3,0 \times 4,0 \text{ m}$ ($0,591 \text{ g cm}^{-3}$). Houve uma tendência de aumento da densidade do fuste conforme o aumento da área disponível no espaçamento, os valores médios variaram de $0,501 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,560 \text{ g cm}^{-3}$ do menor espaçamento de $3,0 \times 1,5 \text{ m}$ ao de maior $3,0 \times 4,0 \text{ m}$. O mesmo efeito foi constatado por Barros Júnior et al. (2022), apesar de neste estudo, as médias obtidas para a densidade básica aos 8,5 anos foram maiores das encontradas pelo autor aos 7 anos de idade, dessa forma, pode-se inferir que a idade influencia positivamente no incremento da densidade em árvores de *T. vulgaris*.

Tabela 4- Resumo da análise de variância para os valores médios e densidade básica a altura do DAP (DB_{DAP}) e da árvore (DB_{fuste}) de *T. vulgaris*.

Fonte de Variação	GL	$DB_{\text{DAP}} (\text{g cm}^{-3})$		$DB_{\text{fuste}} (\text{g cm}^{-3})$	
		QM	Fc	QM	Fc
Initial spacing	5	0,003949	0,476 ^{ns}	0,002116	0,452 ^{ns}
Block	2	0,000411	0,904 ^{ns}	0,000090	0,957 ^{ns}
Erro a (parcela)	10	0,004044		0,002062	
Tipo de fuste	1	0,001003	0,525 ^{ns}	0,000044	0,808 ^{ns}
Espaçamento *Tipo de fuste	5	0,002283	0,471 ^{ns}	0,002053	0,063 ^{ns}
Erro b (subparcela)	12	0,002344		0,000720	
Total	35				
Cve ¹			11,19		8,56
Cve ²			8,52		5,06

GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; $F_c = F_{\text{calculado}}$; CV: coeficiente de variação experimental; *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

Não foi encontrada correlação significativa entre a densidade básica à altura do DAP e a relação C/A ($r^2=0,265$) para as árvores não bifurcadas e bifurcadas. De acordo com Pereira et al. (2013), não há uma regra para expressar a correlação entre a densidade básica da madeira e as proporções de cerne e alburno devido à dificuldade de isolar fatores que levam as grandes variações dessas propriedades nos indivíduos, que neste estudo pode-se destacar a alta variabilidade genética do material de origem.

6.4 Conclusão

Os dados obtidos neste estudo revelam que o espaçamento influenciou as características da madeira de *T. vulgaris* de densidade básica e aparente, percentual de cerne e alburno, relação C/A e área do disco. A espécie demonstra melhor desenvolvimento em espaçamentos intermediários como o de 3,0 x 3,0 m. O padrão de variação da microdensidade tende a diminuir no sentido medula-casca e apresentar valores elevados na base e baixos no topo. O tipo de fuste não influenciou a formação de cerne nas árvores avaliadas. A bifurcação provoca efeito negativo na densidade básica da madeira e aumenta as variações desta variável dentro do fuste, sendo, portanto, um fator que deve ter suas causas investigadas a fim de se estabelecer um programa de controle, tendo em vista que a ocorrência de bifurcação em plantios experimentais de *T. vulgaris*, podem provocar prejuízos na cadeia logística florestal, bem como a diminuição da qualidade e produtividade da madeira.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: Madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.
- ALMEIDA, M. N. F. DE *et al.* Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. November 2019, p. 1–10, 2020.
- AMORIM, P. *et al.* Diagnóstico econômico-ambiental no município de Almeirim, Pará. – Belém, PA: Instituto Floresta Tropical. Fundação Floresta Tropical; Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (Imaflora), 2010.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.** 2009, 149 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BARROS-JUNIOR, U. *et al.* Effects of Tree Spacing and Forking on the Modification of Wood Density in a Trial Plantation of *Tachigali Vulgaris* for Energy in Amazonia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n. 1, p. 11–23, 2022.
- BATISTA, A. *et al.* Investimento em Reflorestamento com Espécies Nativas e Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma Avaliação Econômica. World Resources Institute, 2021.
- BOSCHETTI, W. T. N. **Qualidade da madeira de árvores do híbrido clonal *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* inclinadas por ação de ventos para produção de celulose.** 2014. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.
- CARVALHO, P. E. R. Taxi-branco. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 11 p. (Embrapa Florestas. Circular técnica, 111).
- COSTA, J.M.F.N., *et al.* Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 1, 2020.
- DAHLE, G.A; GRABOSKY, J.C. 2010. Allometric patterns in *Acer platanoides* (*Aceraceae*) branches. *Trees - Structure and Function* 24: 321–326. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0401-5>.
- IBÁ. Anuário estatístico do IBÁ. Ano base 2020. Indústria brasileira de árvores. Associação Brasileira de Árvores, p. 160, 2020.
- IBGE. Mapa de Aptidão Agrícola do Estado do Pará. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/p_a_pedologia.pdf>. Acesso em: 05/11/2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos, Almeirim-PA. 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 09/11/2020.

LIMA, M.D.R. *et al.* *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. **New Forests**. 2022.

MAGALHÃES, L.G.S. *et al.* Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 19435-19445, 2020.

MORA, C. R; SCHIMLECK, L. R. Determination of within-tree variation of *Pinus taeda* wood properties by near infrared spectroscopy. Part 2: Whole-tree wood property maps. **Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment**, v. 62, n. 3, p. 232-238, 2009.

MOULIN, J. C. *et al.* Influência do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira de eucalipto. Graziela Baptista Vidaurre João Gabriel Missia da Silva Jordão Cabral Moulin, v. 29075, p. 171. 2020.

OLIVEIRA, I. R *et al.* Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 80, n. 4, p. 311-318, 2018.

OMONTE, M; VALENZUELA L. Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. **Maderas: Ciencia y Tecnología** 13: 211–224 [in Portuguese with English abstract], 2011.

ÖZDEN, S; SLATER, D; ENNOS, R. Fracture properties of green wood formed within the forks of hazel (*Corylus avellana* L.). **Trees-Structure and Function** 31: 903–917. 2017.

PALERMO, G.P de M. *et al.* Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 6, p. 775-780, 2015.

PATRÍCIO, E.P.S. **Compreensão dos efeitos de espaçamento e idade na produtividade e ocorrência de bifurcação em plantações de *Tachigali vulgaris* com finalidade energética.** 2021. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia florestal)- Universidade Federal Rural da Amazônia. 45 p.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 41, n. 98, p. 217–225, 2013.

PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal.** 2013. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PROTÁSIO, T. *et al.* Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021.

RAMOS, L.O. *et al.* WOOD VOLUMETRY OF *Tachigali vulgaris* PURE PLANTATIONS IN DIFFERENT PLANTING SPACINGS. **FLORESTA**, v. 51, n. 4, p. 962-970, 2021.

RODRIGUES, R. P. **Crescimento e Mortalidade de *Tachigali Vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima em Diferentes Espaçamentos para Fins Energéticos no Município de Almeirim, PA.** 2018. 44f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia, Pará. 2018.

RODRIGUES, R. P. *et al.* Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima em diferentes espaçamentos de plantio para a produção de biomassa. **Scientia Forestalis**, 48(128), 2020.

SCHIMLECK, L. *et al.* Comparison of whole-tree wood property maps for 13-and 22-year-old loblolly pine. **Forests**, v. 9, n. 6, p. 287, 2018.

SINDIFER. Anuário estatístico. 2020. Disponível em:<
<https://www.yumpu.com/pt/document/read/63450752/anuario-sindifer-2020-ingles-portugues-baixa>>.

TEIXEIRA, R.A.C. **Dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima em resposta à adubação e textura de solo.** 2021. Dissertação. (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia. 79 p.

TOMAZELLO FILHO, M. *et al.* Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v.10, n. 2, p.139-149, 2008.

TONINI, H. *et al.* Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

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

TREVISAN, R.; HASELEIN. *et al.* Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, 2008.

7 CAPÍTULO II- CARACTERÍSTICAS DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO ANUAIS E SUAS RELAÇÕES COM A DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA DE *T. vulgaris*

RESUMO: O *Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima é umas das seletas espécies tropicais viáveis para a aplicação de ferramentas dendrocronológicas para avaliação do lenho por anéis crescimento. Este estudo tem como objetivo avaliar as variações das características dos anéis de crescimento anuais e suas relações com a densidade aparente da madeira. O estudo foi realizado em área de plantação experimental de *T. vulgaris* aos 102 meses de idade, no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, estado do Pará. As variáveis estudadas no lenho das árvores de *T. vulgaris* proveniente de diferentes espaçamentos foram: largura do anel de crescimento, percentagens de lenho inicial e de lenho tardio, proporção de lenho inicial/lenho tardio, densidade aparente do anel de crescimento, densidades aparente mínima e máxima do anel de crescimento. Os valores de densidade aparente das árvores não bifurcadas variaram de 0,52 g cm⁻³ a 0,77 g cm⁻³, enquanto que as variações observadas para as árvores com bifurcações foram de 0,52 g cm⁻³ a 0,75 g cm⁻³. Para as características dos anéis de crescimento o efeito da idade cambial foi mais pronunciado que o de espaçamento. A largura dos anéis de crescimento variou de 3,41 cm (medula) a 0,27 cm (casca). As árvores avaliadas apresentaram maior percentual de lenho inicial com a 88,62% (não bifurcadas) e 79,44% (bifurcadas). O lenho de *T. vulgaris* demonstrou ter um incremento homogêneo de densidade aparente em função da idade desde o segundo ano de implantação, sendo o comportamento observado tanto para as árvores não bifurcadas como para as bifurcadas.

Palavras-chave: Densitometria de raios X. Bioenergia. Idade cambial. Espécie nativa.

ABSTRACT: The *Tachigali vulgaris* L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima is one of the select tropical species viable for the application of dendrochronological tools to evaluate the wood by growth rings. This study aims to evaluate variations in the characteristics of annual growth rings and their relationship to wood bulk density. The study was conducted in an experimental plantation of *T. vulgaris* at 102 months of age, in the district of Monte Dourado, Almeirim municipality, Pará state. The variables studied in the wood of *T. vulgaris* trees at different spacing were: growth ring width, percentages of early and late wood, the proportion of early/late wood, growth ring bulk density, and minimum and maximum bulk density of the growth ring. The bulk density values of non-forked trees ranged from 0.52 g cm⁻³ to 0.77 g cm⁻³, while the ranges observed for trees with forks were from 0.52 g cm⁻³ to 0.75 g cm⁻³. For growth ring characteristics the effect of cambial age was more pronounced than that of spacing. The width of the growth rings ranged from 3.41 cm (pith) to 0.27 cm (bark). The trees evaluated showed a higher percentage of initial wood with 88.62% (non-bifurcated) and 79.44% (bifurcated). The wood of *T. vulgaris* showed a homogeneous increase in bulk density as a function of age since the second year of planting, with the behavior observed for both non-bifurcated and forked trees.

Key-words: X-ray densitometry. Bioenergy. Cambial age. Native species.

7.1 Introdução

Os gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus* são os mais utilizados na composição das florestas plantadas no Brasil. A área recoberta por *Eucalyptus* chega a 7,47 milhões de ha e a de *Pinus* a 1,7 milhões de ha, nesse cenário a área plantada composta por outras espécies para a finalidade comercial é de 387 mil de ha (IBÁ, 2021). As regiões norte e nordeste concentram as menores áreas recobertas por plantações florestais, principalmente com a finalidade energética. Por isso, nos últimos anos essas regiões tem enfrentado um grande desafio, o de suprir às necessidades de abastecimento de madeira de boa qualidade para geração de bioenergia, principalmente para o Polo Siderúrgico de Carajás, segundo maior do país e que fica localizado entre os estados do Pará e Maranhão na Amazônia brasileira (PEREIRA et al., 2020; LIMA et al., 2020)

A utilização de espécies nativas para a composição de povoamentos florestais para a finalidade energética na Amazônia tem gerado interesse de investimento do setor florestal em razão de apresentar-se como uma alternativa ao uso de espécies exóticas, por oferecer vantagens de adaptação e contribuir para redução da pressão sobre as florestas nativas (SILVA et al., 2021).

Neste cenário, destaca-se o tachi branco (*Tachigali vulgaris*), leguminosa arbórea nativa da Região Amazônica, que se caracteriza pelo rápido crescimento, elevada produção de biomassa e deposição de serapilheira, e capacidade de associação simbiótica às bactérias do gênero *Rhizobium*, responsáveis pela fixação biológica do nitrogênio, sendo, portanto, espécie indicada para a recuperação de áreas perturbadas, enriquecimento de capoeiras e composição de sistemas agroflorestais e plantios homogêneos (FARIAS et al., 2016). As pesquisas demonstram que a espécie está adaptada aos solos ácidos e pobres em nutrientes (SILVA et al., 2016) como os da Amazônia, sendo este um indicativo da vantagem do tachi branco comparativamente ao *Eucalyptus*.

As características supracitadas, aliadas às propriedades tecnológicas da madeira do tachi, como densidade moderada ($\sim 500 \text{ kg/m}^3$), composição química e propriedades térmicas, possibilitam o emprego industrial desta espécie para fins bioenergéticos, especialmente a produção de carvão vegetal e lenha. Barros Junior et al. (2022) relataram densidade básica da madeira da espécie *T. vulgaris* variando de 443 a 529 kg/m^3 , dependendo do espaçamento adotado no plantio. Além disso, Silva et al. (2021) destacaram que as semelhanças nos processos termoquímicos de pirólise dos lenhos de *T. vulgaris* e *Eucalyptus* demonstram a

possibilidade de uso de espécies alternativas para produção de carvão vegetal visando aos usos siderúrgicos e domésticos, principalmente nos estados da Amazônia.

Estudos dos últimos 40 anos tem demonstrado a possibilidade de implantação de plantios homogêneos com o tachi branco, contudo, são relatados apenas em florestas energéticas em escala experimental nos estados do Pará (NARDUCCI et al., 2016; RODRIGUES et al., 2020; SILVA et al., 2021; BARROS-JÚNIOR et al. 2022), Amazonas (SOUZA et al., 2008), Amapá (ORELLANA et al., 2018), Roraima (TONINI et al., 2018), Distrito Federal (MELO e HARIDASAN, 2010), Mato Grosso (FARIAS et al., 2016) e Espírito Santo (ROLIM e PIOTTO, 2018). Apesar de décadas de pesquisa com a espécie no Brasil, a elevada variabilidade genética, associada às variações de crescimento e qualidade da madeira nos diferentes sítios e condições silviculturais, impossibilitam a indicação da espécie para a composição de florestas comerciais homogêneas destinadas à produção de biomassa para atender ao setor energético brasileiro.

Além dessas características, o *T. vulgaris*, apresenta a formação de anéis de crescimento anuais e visíveis, com demarcação por zonas fibrosas em faixas escuras e redução do número de vasos, com ampla distribuição geográfica alcançando a maioria das regiões do Brasil e, também, em países como o Peru (SOUSA et al., 2016). Sendo, portanto, umas das seletas espécies tropicais viáveis para a aplicação de ferramentas dendrocronológicas para avaliação do lenho por anéis crescimento.

Entre elas, a densitometria de raios X possibilita obter de forma automática os perfis de microdensidade do lenho e dos anéis de crescimento, sendo considerada como uma análise qualitativa e quantitativa altamente precisa que ajudam a compreender melhor as variações que ocorrem na árvore ao longo do tempo oferecendo suporte para na determinação dos ciclos de cortes, além de subsidiar a realização de melhores práticas silviculturais para a condução de florestas (INGA et al., 2017; JACQUIN et al., 2017).

A densitometria de raios X tem se mostrado eficiente para avaliação da qualidade do lenho em espécies como *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (CAMARA et al., 2018), *Pinus taeda* (ORTEGA-RODRIGUEZ et al., 2018) e *Eucalyptus grandis* (CASTRO et al., 2020). Por meio dessa ferramenta, é possível determinar e delimitar o perfil de microdensidade relativa aparente (radial e longitudinal) e informações sobre largura, diâmetro e as proporções de lenho inicial/lenho tardio por anel, que são parâmetros importantes para a

compreensão variabilidade da densidade do lenho e caracterização dos anéis de crescimento (JACQUIN et al., 2017).

Dado a importância do *T.vulgaris* para o fornecimento de material bioenergético e a adequação da espécie para aplicação dendrocronológica, este estudo tem como objetivo avaliar as variações das características dos anéis de crescimento anuais e suas relações com a densidade aparente da madeira, em diferentes espaçamentos de plantio e tipo de fuste em plantação experimental na Amazônia.

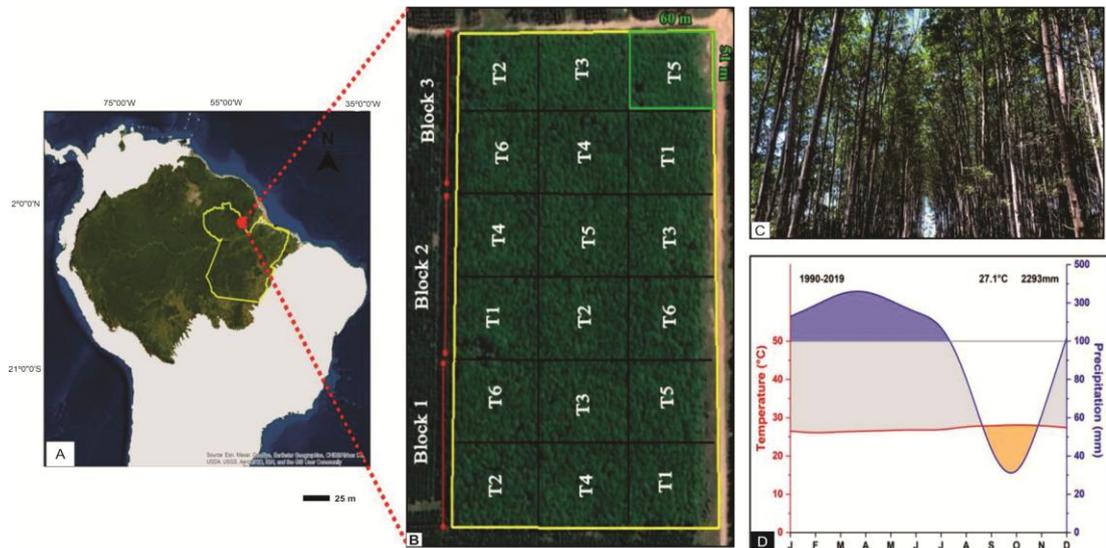
7.2 Material e métodos

7.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em área de plantação experimental de *T. vulgaris* aos 102 meses de idade, no distrito de Monte dourado, município de Almeirim, mesorregião do baixo Amazonas, no estado do Pará, Brasil. A plantação recobre uma área de aproximadamente 6 ha pertencente à empresa Jari celulose S.A (Figura 15A).

O clima da região é classificado de acordo com Köppen como quente e úmido (Am). A temperatura média anual de 26,8 °C com máximas nos meses de agosto a dezembro. O índice pluviométrico anual pode chegar a 2300 mm (Figura 15D), onde os maiores registros ocorrem nos meses de março a maio (INMET, 2020; AMORIM et al., 2010). O solo da área do experimento é classificado como de transição entre Neossolo litótico distrófico e Gleissolo háplico de argila de atividade alta distrófico, com desenvolvimento incipiente de baixa fertilidade natural, com propensão a apresentar nível excessivo de alumínio (IBGE, 2020).

Figura 15- Delimitação do estado do Pará (linha amarela), área de estudo (ponto vermelho) (A); Delineamento experimental da plantação de *T. vulgaris* localizada na Amazônia oriental, no município de Almeirim, Pará, Brasil (Polígono da Plantação em amarelo, blocos em vermelho e espaçamentos em preto) (B); Plantação de *T. vulgaris* (C); Climógrafo do município de Almeirim, estado do Pará, Brasil (D).



Fonte: Lima et al., 2022.

7.2.2 Delineamento experimental

O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, composto por 3 blocos, em que cada bloco foi dividido em 6 parcelas, com dimensões de 60 x 51 m (3.060 m²/parcela), constituídas de 6 espaçamentos distintos, distribuídos de forma aleatória em cada bloco (Figura 18B). A altura total e comercial em metros (HT) e o diâmetro à altura do peito (DAP, cm) e volume com casca individual (m³/árv) foram medidos para todas as árvores amostradas. A densidade atual e a mortalidade (%) de cada espaçamento inicial de plantio foram obtidas pelas mensurações de parcelas permanentes localizadas no interior dos espaçamentos, as quais são inventariadas a cada dois anos. O resumo para as estatísticas da plantação estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de área útil por planta e densidade de plantio das parcelas de *Tachigali vulgaris* aos 102 meses de idade no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim – PA

Espaçamento (m ² /planta)	Densidade do plantio aos 102 meses (árv/ha)	Mortalidade 102 meses (%)	Volume cc (m ³ /ha)	DAP médio (cm)	DAP _{eq} médio (cm)	HT Média (m)
4,5	1240	44,23	216,12	12,73	14,50	17,77
6,0	1032	38,10	197,35	12,70	15,40	17,63
7,5	844	36,73	175,37	12,57	16,33	17,07

9,0	824	25,87	201,90	13,13	17,63	17,40
10,5	777	18,37	181,10	13,23	17,47	17,43
12,0	703	15,67	207,57	13,77	19,20	18,20

*Densidade atual de árvores analisada aos 8,62 anos de idade do plantio.

7.2.3 Coleta e preparação das amostras do lenho

A plantação de estudo apresenta ocorrência significativa de bifurcações em todos os espaçamentos avaliados, portanto, como forma de obter uma amostra representativa do tipo de fuste, foram abatidas árvores bifurcadas e não bifurcadas (Figura 16).

Figura 16- Árvores bifurcadas em plantação experimental de *Tachigali vulgaris* no Distrito de Monte Dourado, Pará.



Foram amostradas aleatoriamente 3 árvores por tratamento e por bloco, evitando a área de borda, no ano de 2018. As árvores abatidas foram mensuradas quanto sua altura comercial (h) e, em seguida, foram retiradas secções transversais (discos) de 5 cm de espessura nas posições longitudinais de 0%, 1,30 m a partir do solo (DAP), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste principal, e dos fustes secundários nas árvores bifurcadas. Dessa forma, foram abatidas no total 54 árvores, sendo 36 bifurcadas e 18 não bifurcadas. Posteriormente, todos os discos foram seccionados no sentido transversal, dando origem a

corpos de prova com dimensão aproximada de 1 cm de largura \times 5 cm de espessura \times comprimento igual ao diâmetro do disco.

A partir dos cortes transversais, foi retirado em dupla serra circular, amostras com dimensão final de aproximadamente 1,4 cm de espessura \times 1 cm de largura \times comprimento igual ao diâmetro do disco inicial de todas as posições longitudinais, totalizando 576 amostras. As amostras 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 (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

7.2.4 Demarcação e caracterização dos anéis de crescimento por densitometria de raios-X

Para a demarcação, caracterização dos anéis de crescimento e do perfil de microdensidade, as amostras foram irradiadas em equipamento de raios-X (Faxitron X-ray, modelo LX 60) por 3 segundos com ajuste automático da potência em conjunto dois tipos diferentes de escala (i) uma escala para medida de área (1 cm²) e (ii) uma escala de acetato de celulose. Posteriormente, as imagens radiografadas foram analisadas com auxílio do software WinDendroTM (Regent Instruments_{Inc.}), para a obtenção das informações sobre (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). A homogeneidade do anel foi obtida pela diferença entre a densidade máxima e mínima, conforme descrito em Rozemberg e Cahalan, 1997, a qual foi posteriormente dividida pela densidade do anel para expressão em porcentagem.

7.2.5 Ajuste de modelos de regressão

Para verificar o efeito da interação do espaçamento inicial de plantio e idade cambial na largura dos anéis de crescimento foram realizados ajustes do modelo de regressão de polinômio de grau 3. Os ajustes foram realizados com o auxílio do *software* R, e dos pacotes ggplot2, MLmetrics e tidyverse.

Foram considerados os valores de algumas estatísticas de qualidade do ajuste, como coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), coeficiente de correlação ($r_{y\hat{y}}$) entre a idade cambial e a largura do anel, erro padrão residual percentual ($S_{yx}\%$), média dos erros absolutos (MEA) e o critério de informação de Akaike (AIC). As

estatísticas de qualidade do ajuste utilizadas foram calculadas conforme procedimento mencionado a seguir:

1) Coeficiente de determinação (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQT}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQT}$$

Em que: R^2 = coeficiente de determinação;

SQ_{res} = soma de quadrado dos resíduos; $SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (HT - \overline{HT})^2$;

SQT = soma de quadrado total da regressão: $SQT = \sum_{i=1}^n (HT - \overline{HT})^2$.

2) Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}):

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} \cdot (1 - R^2)$$

Em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado;

n = número de observações do tratamento;

p = número de parâmetros do modelo de regressão;

R^2 = coeficiente de determinação.

3) Coeficiente de correlação de Pearson ($r_{y\hat{y}}$): entre a idade cambial e a largura do anel

$$r_{y\hat{y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}) \cdot (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}}$$

Em que:

$r_{y\hat{y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson;

σ = valores observados;

E = valores estimados;

$\bar{\sigma}$ = média dos valores observados;

\bar{E} = média dos valores estimados.

4) Média dos erros absolutos (MEA):

$$MEA = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n}$$

Em que:

MEA = média dos erros absolutos;

Y_i = valores observados;

\hat{Y}_i = valores estimados;

n = número de observações.

Para: $n - p + 1 < 40$:

$$AIC = -2 \left(\frac{-n}{2} \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n} \right) \right) + 2(p + 1) \cdot \left(\frac{n}{n - k - 1} \right)$$

Em que:

AIC = critério de informação de Akaike;

n = número de observações;

e^2 = soma do quadrado do erro;

p = parâmetros do modelo;

k = p + 1.

5) Desvio padrão residual (Syx):

$$Syx = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}}{n - p}$$

Em que:

Y_i = valores observados;

\hat{Y}_i = valores estimados;

n = números de observações;

p = número de parâmetros.

6) Desvio padrão residual percentual $Syx(\%)$:

$$S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{y}}$$

Em que:

S_{yx} = desvio padrão;

\hat{Y} = média dos valores observados.

7.2.6 Análise estatística dos dados

As variáveis estudadas no lenho das árvores de *T. vulgaris* proveniente de diferentes espaçamentos foram: largura do anel de crescimento, percentagens de lenho inicial e de lenho tardio, proporção de lenho inicial/lenho tardio, densidade aparente do anel de crescimento, densidade aparente mínima e máxima do anel de crescimento e a homogeneidade da densidade por anel de crescimento.

Os resultados obtidos para a densidade aparente dos anéis de crescimento foram ponderados em função da área ocupada pela amostra (eq. 1). Dessa forma, foram obtidos valores médios representativos da árvore. A partir desses resultados foram elaborados gráficos com o objetivo de verificar as o comportamento entre as variáveis amostradas.

$$\frac{Den_{anel} = Den_{anel1} * Lar_{anel1} + Den_{anel2} * Lar_{anel2} + \dots + Den_{anelx} * Lar_{anelx}}{\sum Lar_{anelTotal}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Para análise estatística dos dados, foram realizadas análises de variância univariadas, para avaliar: (I) o efeito do espaçamento e da idade cambial nas características dos anéis, e (II) o efeito do espaçamento e tipo de fuste na densidade média aparente.

O delineamento utilizado nas análises foi o de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, em que as parcelas foram constituídas pelos seis níveis de espaçamento inicial de plantio (4,5; 6,0; 7,5; 9,0; 10,5 e 12,0 m²/planta) e as subparcelas pelos oito níveis de idade cambial do anel de crescimento (8 anéis, correspondentes aos anos de 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018), e pelo dois tipos de fustes (não bifurcado e bifurcado) conforme modelo estatístico apresentado na Eq. 2.

$$Y_{ikj} = \mu + E_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} + I_k + (E \times I)_{ik} + \varepsilon_{ikj} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que: Y_{ijk} é a observação do i -ésimo nível do fator espaçamento, no k -ésimo nível do fator tipo de fuste, no j -ésimo bloco; μ é a constante geral do modelo; E_i é o efeito do i -ésimo nível do fator espaçamento, efeito fixo; β_j é o efeito do j -ésimo bloco; ε_{ij} é o erro experimental entre i -ésimo nível do fator espaçamento de plantio e o j -ésimo bloco (erro a); I_k é o efeito do k -ésimo nível do fator idade, efeito fixo; $(E \times I)_{ik}$ é o efeito da interação do i -ésimo nível do fator espaçamento com o k -ésimo nível do fator idade, efeito fixo; ε_{ikj} é o erro experimental entre i -ésimo nível do fator espaçamento de plantio, j -ésimo bloco e k -ésimo nível do fator idade (erro b), suposto normal e independentemente distribuído com média 0 e variância σ^2 .

Para verificar a validade das análises de variância foram testadas as hipóteses básicas de independência, homogeneidade de variâncias e normalidade dos resíduos do modelo estatístico utilizado (Equação 1). 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). Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando o *software* estatístico R versão 3.4.3, pacotes *stats* (R Core Team, 2017), *ExpDes*, *lmtest*, *car* e *HH*.

7.3 Resultados e discussões

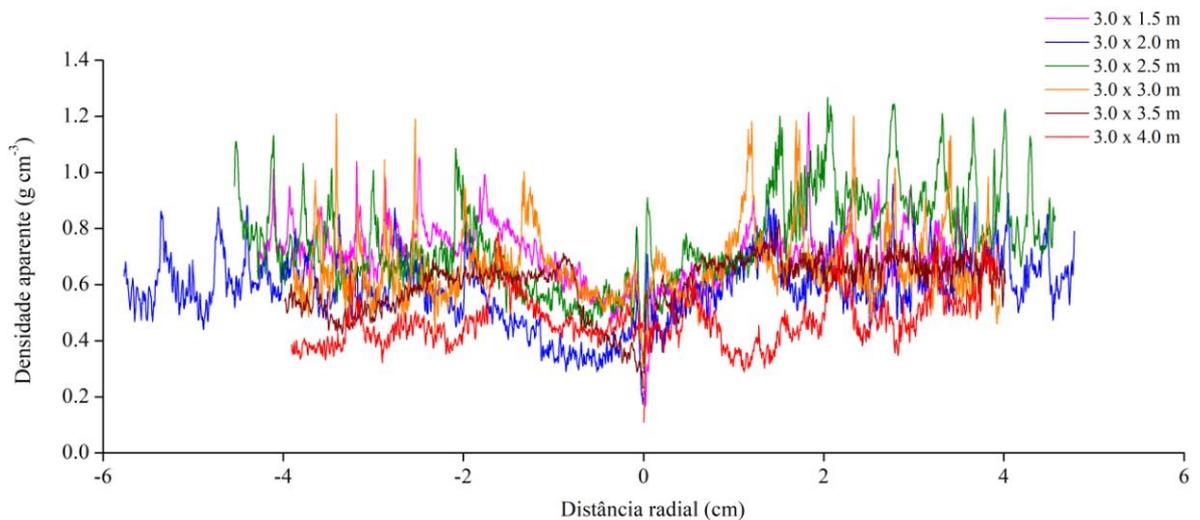
7.3.1 Perfil densitométrico do lenho e variações intra-anuais dos anéis de crescimento

Foram analisados os perfis de variação radial da densidade aparente das árvores de *T. vulgaris* nos diferentes espaçamentos da plantação (Figura 17).

Os perfis revelaram regiões com maiores e menores valores da densidade, comumente observados pela variação intra-anual da estrutura do lenho. Essa variação permite realizar a diferenciação dos lenhos inicial e tardio no sentido medula-casca, em que os picos de densidade ao longo do perfil correspondem à transição entre as duas estruturas. De modo geral, a análise do perfil densitométrico indica: (i) maior variação da densidade nos dois primeiros anéis de crescimento, seguido da estabilização ao longo do perfil e, (ii) formação de anéis de crescimento mais estreitos à medida que o lenho amadurece, independente do espaçamento de plantio adotado. A compreensão do perfil radial da densidade da madeira, associada ao estudo dos anéis de crescimento, auxilia na compreensão sobre o processo de maturação das células cambiais, extremamente importante para designar as aplicações do uso

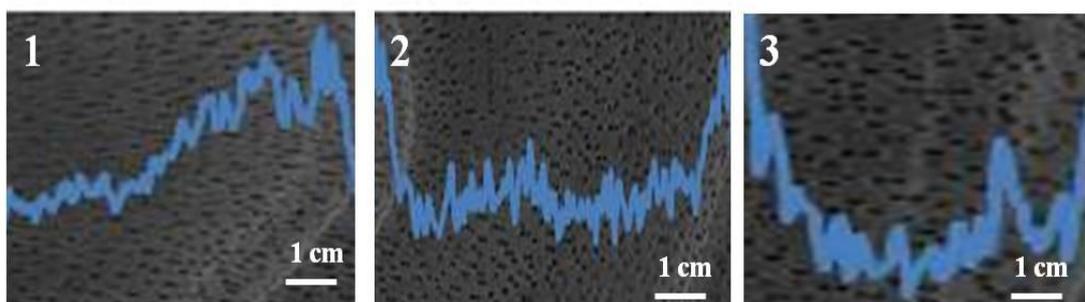
da madeira de *T. vulgaris*, devido à estreita relação com as propriedades físicas, anatômicas e biomecânicas do lenho (JACQUIN et al., 2017; SOUSA, LOUZADA, PEREIRA, 2018)

Figura 17-Perfil de microdensidade a altura do DAP do lenho de *T. vulgaris*, nos espaçamentos de plantio avaliados.



Além do observado, é possível delimitar o comportamento da variação da densidade (Figura 18) considerando (i) a região dos picos, e (ii) os limites entre os anéis de crescimento, podendo ser classificado como (1) crescente, (2) estável, (3) decrescente e/ou instável. As variações intra-anuais são resultado das interações da árvore com o meio durante o processo de formação do lenho, nesse sentido, os anéis com densidade crescente e estáveis podem ser entendidos como períodos com condições de competição favoráveis ao crescimento, enquanto que em situações menos favoráveis a densidade apresenta maior instabilidade podendo decrescer, um exemplo são as flutuações climáticas, com épocas alternadas de chuva intensa seguido de longas secas (GAITAN-ALVAREZ; MOYA; BERROCAL, 2019; UGULINO; LATORRACA; TOMAZELLO FILHO, 2014), como ocorrem na região Amazônica.

Figura 18- Perfil de microdensidade intra-anual dos anéis de crescimento de *T. vulgaris*, classificados como (1) crescente, (2) estável, (3) decrescente e/ou instável.



7.3.2 Efeitos de espaçamento e idade cambial na densidade aparente e características dos anéis de crescimento de árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*.

Os resultados obtidos pelas análises de variância demonstraram que não há efeito significativo da interação entre a idade cambial e o espaçamento inicial de plantio para a densidade aparente do lenho de *T. vulgaris* (Tabela 6). Além disso, não foi detectado efeito significativo de espaçamento de plantio nessa propriedade, sendo observado efeito apenas da idade cambial. Portanto, a influência da idade das árvores na densidade aparente da madeira foi mais relevante comparativamente ao efeito de espaçamento de plantio. Provavelmente, isso ocorreu devido à intensa variabilidade genética das árvores de *T. vulgaris*.

Tabela 6- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial na densidade aparente da madeira a 12% de umidade de árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*.

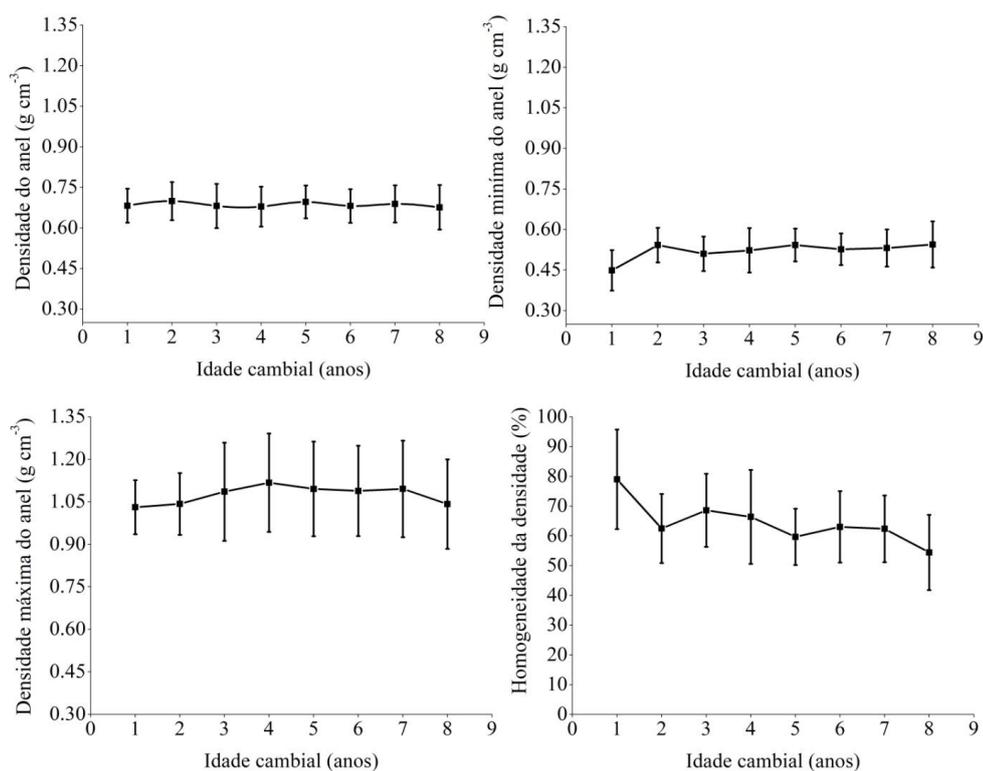
Fonte de Variação	GL	D_{anel}		D_{mín}		D_{máx}		Homo	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espaçamento	5	0,0372	1,54 ^{ns}	0,0226	0,86 ^{ns}	0,2747	2,31 ^{ns}	0,0439	1,30 ^{ns}
Bloco	2	0,0165	0,68 ^{ns}	0,0105	0,40 ^{ns}	0,0290	0,24 ^{ns}	0,0079	0,23 ^{ns}
Erro a (parcela)	10	0,0242		0,0263		0,1191		0,0338	
Idade	7	0,0013	0,71 ^{ns}	0,0179	7,15*	0,0181	3,74*	0,0424	17,97*
Espaçamento*Idade	35	0,0020	1,10 ^{ns}	0,0018	0,75 ^{ns}	0,0050	1,04 ^{ns}	0,0033	0,10 ^{ns}
Erro b (subparcela)	84	0,0018		0,0025		0,0048		0,0024	
Total	143								
Cve ¹		22,68%		31,12%		32,10%		41,90%	
Cve ²		6,19%		9,60%		6,47%		11,07%	

D_{anel}: densidade aparente do anel de crescimento (g cm⁻³); D_{mín}: densidade aparente mínima do anel de crescimento; D_{máx}: densidade aparente máxima do anel de crescimento; Homo: homogeneidade da densidade aparente do anel de crescimento; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; Fc = Fcalculado; Cve¹: coeficiente de variação experimental para parcela (%); Cve²: coeficiente de variação experimental para subparcela (%); *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

Os valores médios dos seis espaçamentos de plantio foram de 0,685±0,069, 0,521±0,290 e 1,074±1,653 g cm⁻³ para as densidades média, mínima e máxima por anel de crescimento, respectivamente. Esses valores são superiores aos encontrados para *E. grandis*, cuja variação foi de 0,37 a 0,55 g cm⁻³, 0,19 a 0,39 g cm⁻³ e 0,60 a 0,82 g cm⁻³, para as densidades média, mínima e máxima, respectivamente (CASTRO et al., 2017) e *E. grandis* aos 23 anos de idade, com valores de densidade média de 0,550 a 0,620 g cm⁻³ (OLIVEIRA et al., 2012). A densidade média do anel não apresentou variações expressivas em função da idade cambial. A análise dos dados revela uma tendência de aumento da densidade do anel no sentido radial das árvores variando de 0,676 a 0,696 g cm⁻³ (Figura 19). As densidades mínima e máxima demonstraram maior variação nos três primeiros anos, sendo notável a estabilização da propriedade a partir do 4º ano. A idade cambial afeta a proporção e a

densidade do lenho inicial e tardio, o que reflete na variabilidade das densidades médias da madeira (MÖRLING 2002; GULLER et al. 2012). Nesse sentido, os fatores combinados da atividade cambial e as proporções de lenho inicial e tardio produzido ao longo do tempo é o que resulta no aumento da densidade observado no sentido medula-casca (ORTEGA-RODRIGUEZ E TOMAZELLO-FILHO, 2019).

Figura 19-Efeito da idade cambial na densidade aparente do anel de crescimento, densidade aparente mínima, densidade aparente máxima e homogeneidade da densidade aparente, nas árvores não bifurcadas.



O anel de crescimento do ano 1 apresentou 79,02% de homogeneidade da densidade aparente para o lenho de *T. vulgaris*, em relação ao ano 2, houve uma redução de 16,52% da propriedade, apesar disso, a partir dessa idade observa-se maior estabilidade sobre a variação da homogeneidade da densidade com médias de 62,50% a 68,60%, com oscilações de aproximadamente 7% entre os 2º e 8º anos. Esse comportamento pode ser considerado um fator positivo para espécie, uma vez que quanto menor a variação dos valores de densidade do material de origem, melhor será a qualidade do produto final, no caso o carvão vegetal.

O resumo das análises de variância realizadas para as características dos anéis de crescimento de largura do anel, porcentagem de lenho inicial e tardio e, proporção de lenho inicial/lenho tardio está disposto na Tabela 7.

Tabela 7- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial nas características dos anéis de crescimento em árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*.

Fonte de Variação	GL	Largura (cm)		LI (%)		LT (%)		LI/LT	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espaçamento	5	0,0699	0,28 ^{ns}	3361,8	1,66 ^{ns}	3346,1	1,66 ^{ns}	5967,6	0,99 ^{ns}
Bloco	2	0,4171	1,70 ^{ns}	2634,7	1,30 ^{ns}	2603,3	1,29 ^{ns}	4180,9	0,69 ^{ns}
Erro a (parcela)	10	0,2471		2019,4		2021,7		6030,5	
Idade	7	8,4141	74,77*	404,3	7,33*	414,7	7,62*	1696,9	1,91*
Espaçamento*Idade	35	0,2334	2,07*	60,0	1,09 ^{ns}	58,6	1,08 ^{ns}	977,8	1,10 ^{ns}
Erro b (subparcela)	84	0,1125		55,1		54,4		888,6	
Total	143								
Cve ¹			50,31%		55,51%		235,54%		423,80%
Cve ²			33,95%		9,17%		38,65%		162,68%

LI: percentual de lenho inicial; LT: percentual de lenho tardio; LI/LT: proporção de lenho inicial/lenho tardio; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; Fc = Fcalculado; Cve¹: coeficiente de variação experimental para parcela (%); Cve²: coeficiente de variação experimental para subparcela (%); *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

Para a largura dos anéis de crescimento houve interação significativa dos fatores de espaçamento inicial de plantio e idade cambial. A fim de verificar a dependência dos fatores na largura dos anéis de crescimento foi ajustado o modelo de regressão polinomial de grau 3 por apresentar melhor qualidade de ajuste em todos os espaçamentos de plantio (Tabela 8).

Tabela 8- Estatísticas de qualidade de ajuste para largura do anel e idade – modelo polinômio de 3º grau.

Espaçamento (m)	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2	$S_{xy}(\%)$	MEA	AIC
3,0x 1,5	4,40251*	-2,12754*	0,39549*	-0,02438*	0,77	0,26	28,97	28,97
3,0 x 2,0	4,21131*	-2,11955*	-0,02638*	0,41353*	0,82	0,21	17,02	17,02
3,0 x 2,5	2,48319*	-0,43708	0,00233	0,00257	0,71	0,21	26,35	26,35
3,0 x 3,0	3,13326*	-1,07855	-0,00929	0,165470	0,51	0,33	45,26	45,26
3,0 x 3,5	2,08959*	-0,5102	-0,00420	0,072972	0,62	0,19	10,06	10,06
3,0 x 4,0	5,68090*	0,3782*	0,00696*	0,09488*	0,90	0,18	14,95	14,95

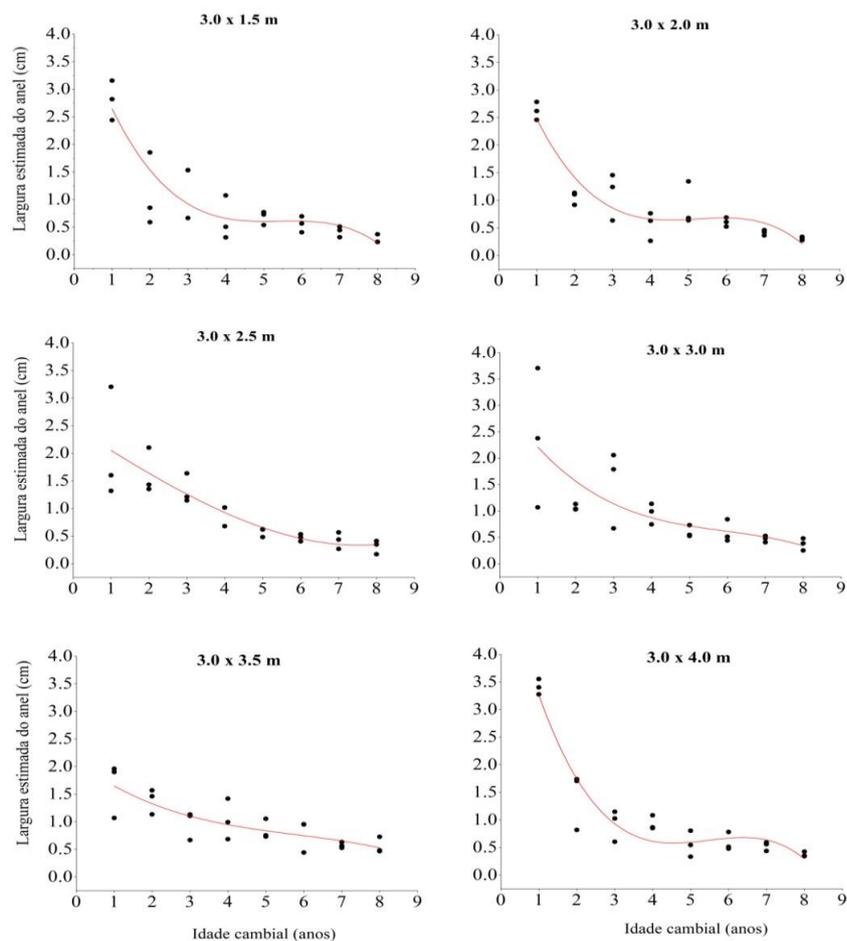
Nota: * significância dos parâmetros a 5%; β_0 : parâmetro da regressão; β_1 : parâmetro da regressão; β_2 : parâmetro da regressão; r_{yy} : coeficiente de correlação; R^2_{aj} : coeficiente de determinação ajustado; $S_{xy}(\%)$: desvio padrão percentual; MEA: média dos erros absolutos; AIC: critério de informação de Akaike.

As curvas ajustadas demonstram uma tendência de redução da largura dos anéis de crescimento em função da idade cambial (Figura 20), independentemente do espaçamento de plantio, com variação de 3,41 cm (medula) a 0,27 cm (casca). Segundo Nicoletti et al., (2022), a redução da largura dos anéis de crescimento, observadas a partir do 2º ano pode indicar o início da competição entre as árvores do plantio. Os espaçamentos de 3,0 x 2,5 m, 3,0 x 3,0 m e 3,0 x 3,5 m, apresentaram curvas menos acentuadas em relação aos demais e semelhantes entre si e anéis com 2,04-0,30 cm; 2,38-0,37cm; 1,64-0,55 cm, respectivamente.

A avaliação da largura do anel é comumente utilizada como um índice para análise de crescimento de árvores (ORTEGA-RODRIGUEZ E TOMAZELLO-FILHO, 2019), estando

diretamente relacionada com o crescimento em diâmetro, nesse sentido, quanto maior a largura dos anéis, maior é o incremento de DAP (NICOLETTI et al., 2022). Dessa forma, conforme foram apresentados no capítulo I, os espaçamentos de 3,0 x 2,5 m, 3,0 x 3,0 m e 3,0 x 3,5 m, apresentaram altas taxas de mortalidade, o que aproximou seus resultados, como o da área de disco. Portanto, o comportamento observado para os ajustes de largura dos anéis é um reflexo da redução da competição por recursos nesses espaçamentos.

Figura 20-Curvas ajustadas pelos modelos para a largura do anel das árvores não bifurcadas dos diferentes espaçamentos de plantio.



A análise de variância demonstrou que não há efeito significativo da interação entre a idade cambial e o espaçamento inicial de plantio para os percentuais de lenho inicial e de lenho tardio dos anéis de crescimento, sendo observados apenas significância para o fator idade cambial. Dessa forma, procederam-se as análises dos efeitos simples de espaçamento e de idade cambial nessas propriedades dos anéis de crescimento.

De modo geral, as árvores não bifurcadas apresentaram maior porcentagem de lenho inicial variando de 67,59% a 88,62% (Figuras 21 e 22) nos diferentes espaçamentos de plantio, exceto o espaçamento de 3,0 x 3,5 m que obteve percentual expressivo de lenho tardio com 63,81% no ano 1, variando de 34,40% a 46,00% nas demais idades cambiais. A relação entre a idade e as características dos anéis de crescimento não são bem definidas em literatura, autores atribuem as variações a fatores ligados a variabilidade genética dos indivíduos, condições de sítio e condições de acesso a recursos como água, luz e nutrientes (IVKOVIĆ et al., 2013). De acordo com o descrito por Benjamin (2006) as espécies de forma geral, podem apresentaram maior porcentagem de lenho inicial devido a taxas elevadas de crescimento, que tendem a diminuir com o passar do tempo.

Figura 21-Porcentagens de lenhos inicial e tardio, por idade cambial, das árvores não bifurcadas de *T. vulgaris* nos espaçamentos iniciais de 3,0 x 1,5 m (A); 3,0 x 2,0 m (B); 3,0 x 2,5 m (C); 3,0 x 3,0 m (D); 3,0 x 3,5 m (E) e 3,0 x 4,0 m (F).

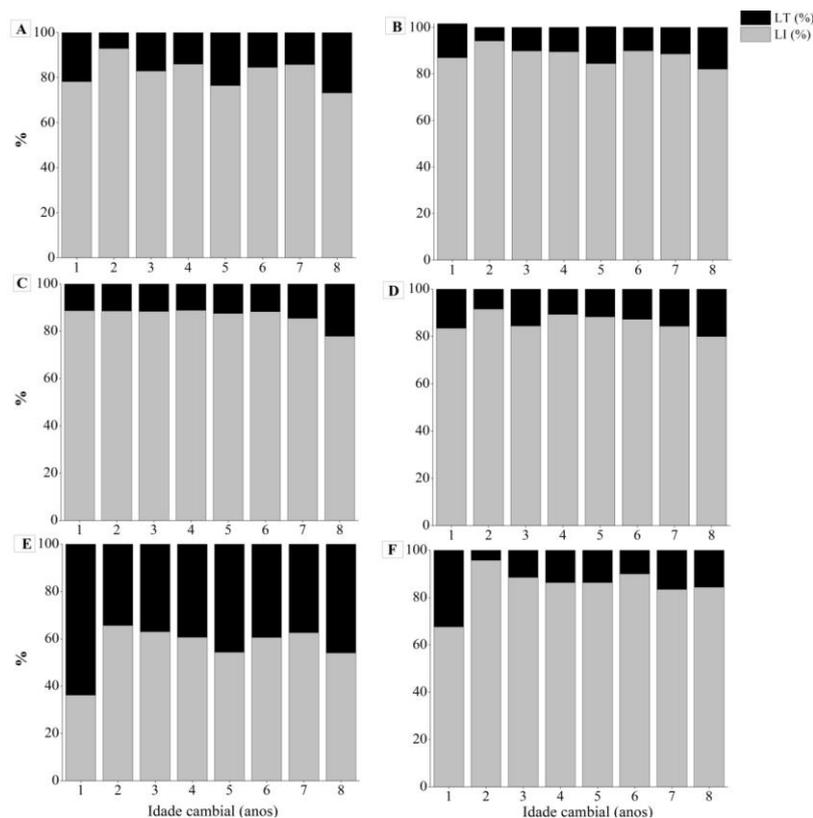
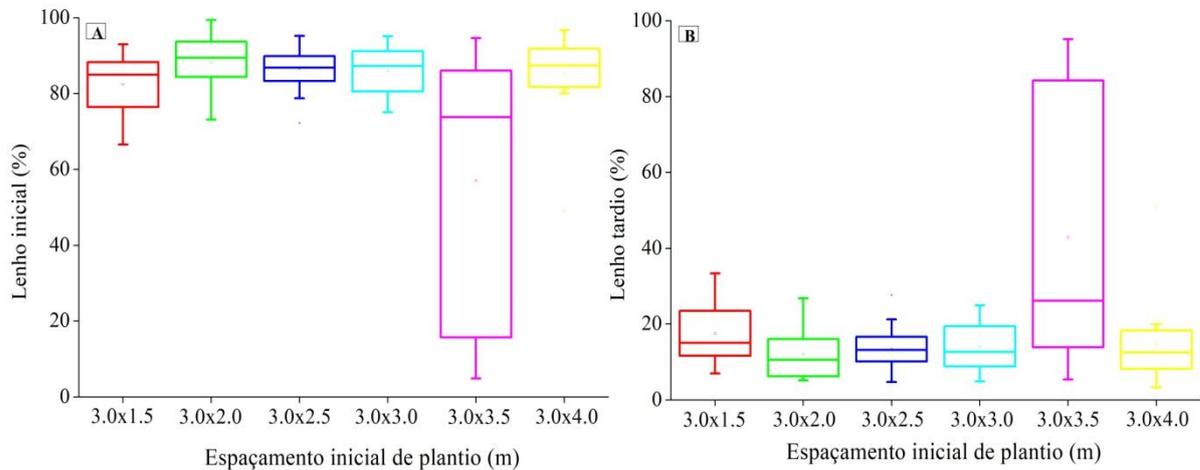


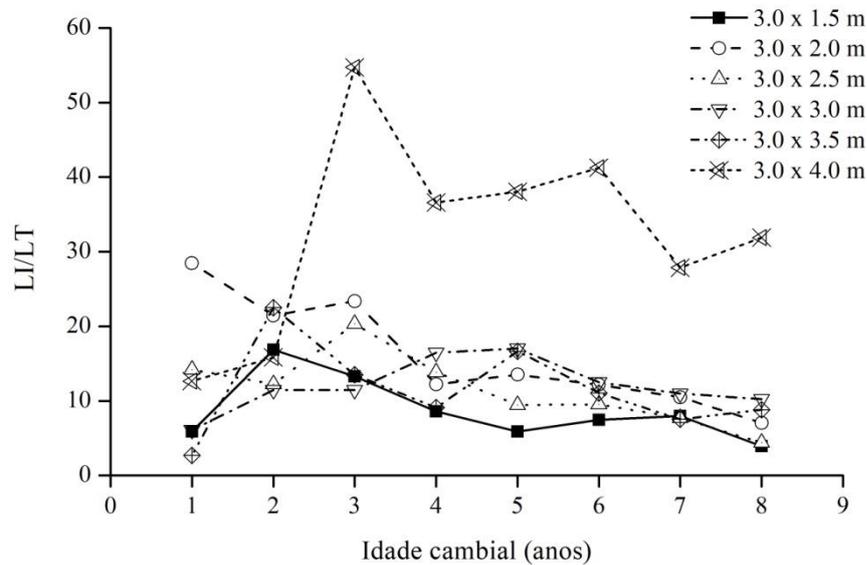
Figura 22-Variações dos percentuais de lenho inicial (A) e tardio (B) de árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*, independentemente da idade cambial.



Para a proporção de lenho inicial/lenho tardio foi observado efeito estatístico significativo apenas da idade cambial (Figura 23). O espaçamento de plantio de 12,0 m²/planta obteve as maiores médias dessa característica chegando a alcançar 54,71%, enquanto que os menores valores foram observados nos espaçamentos de 4,5 m²/planta e 7,5 m²/planta, variando de 3,90% a 16,85%, e 4,39% a 14,17%, respectivamente.

A proporção de lenho inicial/lenho tardio apresentou tendência de aumento dos valores do primeiro ao segundo ano, reduzindo expressivamente com o avanço da idade, em que os maiores valores foram encontrados no ano 2 com 40,44% e os menores no ano 1 (11,66%) e 8 (11,04%). O efeito da idade cambial foi mais pronunciado do que o de espaçamento, no qual não foi possível verificar uma relação clara entre o fator (espaçamento) e a proporção de lenho inicial/lenho tardio, enquanto que para a idade a redução da característica foi observada independentemente do espaçamento adotado. Esse comportamento está em conformidade, quando levados em consideração os resultados obtidos de densidade, em que houve o aumento da densidade do lenho com a idade devido ao maior percentual de lenho tardio (SCHILLING et al., 1998) e redução da largura dos anéis com a idade.

Figura 23- Variações das proporções de lenho inicial/lenho tardio por anel de crescimento, mensuradas em árvores não bifurcadas de *T. vulgaris*.



7.3.3 Efeitos de espaçamento e idade cambial na densidade aparente e características dos anéis de crescimento de árvores bifurcadas de *T. vulgaris*.

A densidade aparente do lenho das árvores bifurcadas de *T. vulgaris* não apresentou interação significativa entre os fatores de idade cambial e espaçamento inicial de plantio (Tabela 9), sendo observada relevância estatística apenas para o fator idade cambial. Assim como para as árvores não bifurcadas, o espaçamento não atuou como um determinante para os valores de densidade, e sim a idade exerceu maior influência nessa propriedade. Esse comportamento foi observado em estudos avaliando *Eucalyptus grandis* submetido à rotação aos 6 anos de idade (CHAMBI-LEGOAS et al., 2021) e *Pinus taeda* até os 26 anos (TOPANOTTI et al., 2021).

Tabela 9- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial na densidade aparente da madeira a 12% de umidade de árvores bifurcadas de *T. vulgaris*.

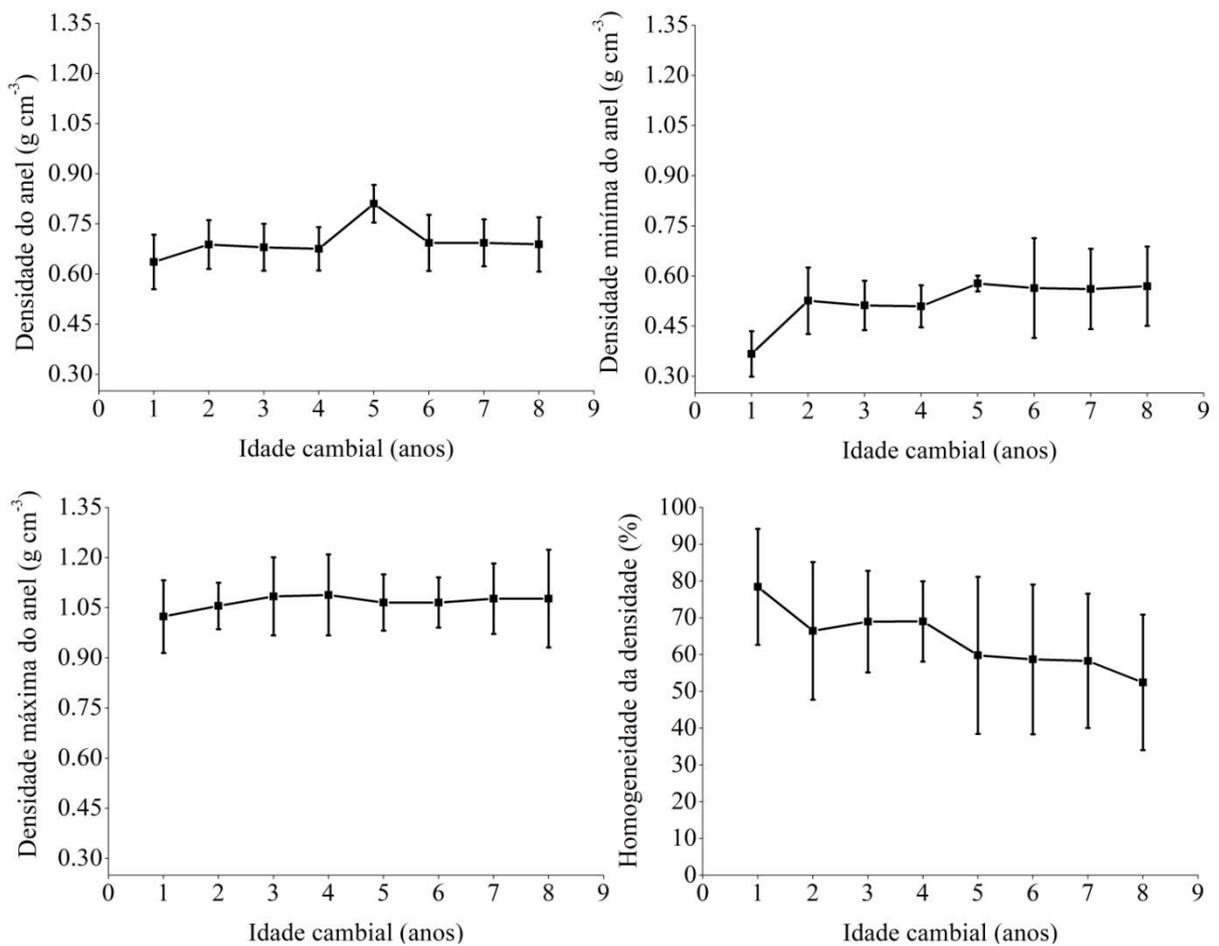
Fonte de Variação	GL	D_{anel}		$D_{\text{mín}}$		$D_{\text{máx}}$		Homo	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espaçamento	5	0,0512	0,66 ^{ns}	0,0456	0,80 ^{ns}	0,1204	4,24*	0,1124	2,28 ^{ns}
Bloco	2	0,2884	3,72*	0,2834	4,95*	0,0637	2,25 ^{ns}	0,0682	1,39 ^{ns}
Erro a (parcela)	10	0,0774		0,0572		0,0284		0,0492	
Idade	7	0,0449	1,17 ^{ns}	0,0845	12,15*	0,0074	1,76 ^{ns}	0,1111	13,82*
Espaçamento*Idade	35	0,0375	0,98 ^{ns}	0,0071	1,03 ^{ns}	0,0048	1,13 ^{ns}	0,0082	1,02 ^{ns}
Erro b (subparcela)	84	0,0381		0,0070		0,0042		0,0080	
Total	143								
Cve ¹		39,99%		45,74%		15,80%		50,54%	
Cve ²		28,07%		15,93%		6,09%		20,42%	

D_{anel} : densidade aparente do anel de crescimento (g cm^{-3}); $D_{\text{mín}}$: densidade aparente mínima do anel de crescimento; $D_{\text{máx}}$: densidade aparente máxima do anel de crescimento; Homo: homogeneidade da densidade aparente do anel de crescimento; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; $F_c = F_{\text{calculado}}$; CVe^1 : coeficiente de variação experimental para parcela (%); CVe^2 : coeficiente de variação experimental para subparcela (%); *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

Os valores da densidade aparente média das árvores bifurcadas de *T. vulgaris*, aos oito anos, variaram de $0,40 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,86 \text{ g cm}^{-3}$, apresentando média de $0,67 \text{ g cm}^{-3}$. O valor médio das densidades mínima e máxima foi de $0,52 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ respectivamente (Figura 24). Os resultados obtidos para a propriedade nesta pesquisa são superiores aos encontrados por Gil et al., (2018) para a espécie de *Tectona grandis* L.f aos 7 anos de idade, com variação média de $0,36 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,44 \text{ g cm}^{-3}$ e por Zanuncio et al., (2018) para clones de *E. grandis* \times *E. urophylla*, que obteve variações de $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ a $0,59 \text{ g cm}^{-3}$. De modo geral, a densidade do lenho dos indivíduos bifurcados tende a ser estável desde o segundo ano, com poucas variações ao longo do tempo. De acordo com Zanuncio et al., (2018), materiais com uma densidade de madeira homogênea ao longo da direção radial têm um comportamento mais uniforme, facilitando a sua utilização. Nesse sentido pode-se inferir que apesar da bifurcação ser um fator indesejável para a condução de povoamentos de *T. vulgaris*, a qualidade do lenho desses fustes, pode resultar na produção de carvão vegetal com qualidade desejável.

Para a densidade média do anel de crescimento foi observado um aumento expressivo no quinto ano do plantio, seguido de redução no ano seguinte. Tal comportamento pode estar associado ao mecanismo de adaptação da espécie frente às modificações do ambiente, uma vez que o referido ano corresponde no calendário civil ao ano de 2015, período em que a região norte do Brasil, passou por um severo período de seca devido à ocorrência do *El Niño* que perdurou de meados de 2014 e perdurou até 2016 (JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2016). De acordo com o relatado em literatura as variações observadas nas propriedades do lenho frente às flutuações climáticas, tendem a seguir uma correlação positiva, em que a maior quantidade de água no solo aumenta as condições favoráveis ao crescimento da planta (BRIENEN E ZUIDEMA, 2005; OLIVEIRA et al., 2011). Portanto, o resultado obtido para *T. vulgaris* deve ser mais bem investigado, a fim de se compreender os seus mecanismos de adaptação.

Figura 24-Efeito da idade cambial na densidade aparente do anel de crescimento, densidade aparente mínima, densidade aparente máxima e homogeneidade da densidade, nas árvores bifurcadas de *T. vulgaris*.



As análises de variância demonstraram que não há efeito significativo da interação entre a idade cambial e o espaçamento inicial de plantio para a largura dos anéis de crescimento das árvores bifurcadas de *T. vulgaris* (Tabela 10). Além disso, não foi detectado efeito significativo de espaçamento de plantio na largura dos anéis de crescimento. Há efeito apenas da idade cambial na largura dos anéis de crescimento do lenho para a espécie.

Tabela 10- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e idade cambial nas características dos anéis de crescimento em árvores bifurcadas de *T. vulgaris*.

Fonte de Variação	GL	Largura (cm)		LI (%)		LT (%)		LI/LT	
		QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Espaçamento	5	0,5582	1,85 ^{ns}	2125,2	0,94 ^{ns}	1903,6	1,05 ^{ns}	50,785	0,45 ^{ns}
Bloco	2	0,0125	0,04 ^{ns}	4476,9	1,99 ^{ns}	3991,9	2,21 ^{ns}	116,412	1,04 ^{ns}
Erro a (parcela)	10	0,3011		2241,4		1805,3		11,835	
Idade	7	10,0401	87,13*	287,2	8,60*	300,0	8,86*	103,769	5,98*
Espaçamento*Idade	35	0,0947	0,82 ^{ns}	63,2	1,89*	63,5	1,87*	21,973	1,26 ^{ns}
Erro b (subparcela)	84	0,1152		33,4		33,8		17,350	
Total	143								
Cve ¹		53,56%				211,21%		146,17%	
Cve ²		33,13%				28,92%		57,57%	

LI: percentual de lenho inicial; LT: percentual de lenho tardio; LI/LT: proporção de lenho inicial/lenho tardio; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; Fc = Fcalculado; CVe¹: coeficiente de variação experimental para parcela (%); CVe²: coeficiente de variação experimental para subparcela (%); *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

Os anéis de crescimento das árvores bifurcadas apresentaram a mesma tendência de redução da largura em função da idade cambial observada nas árvores não bifurcadas (Figura 25). As estatísticas geradas do ajuste do modelo de regressão estão presentes na Tabela 11. O maior valor médio foi encontrado no primeiro ano (2,64 cm) e os menores valores nos anos de 7 e 8 (0,12 e 0,10 cm, respectivamente).

Tabela 11- Estatísticas de qualidade de ajuste para largura do anel e idade de árvores bifurcadas – modelo polinômio de 3º grau.

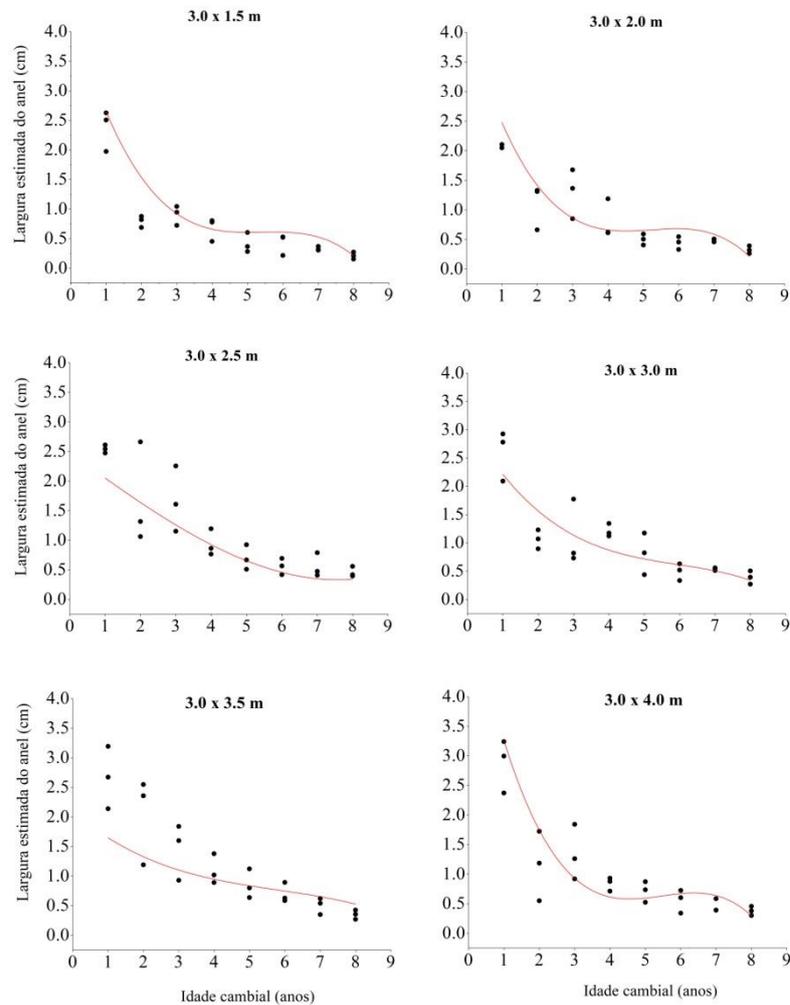
Espaçamento (m)	β_0	β_1	β_2	β_3	r_{yy}	R^2	R^2_{adj}	$S_{xy}(\%)$	MEA	AIC
3,0 x 1,5	3,735*	-1,868*	0,3514*	-0,0217*	-0,78	0,86	0,84	0,26	0,19	10,74
3,0 x 2,0	4,198*	-1,873*	0,323*	-0,018*	-0,73	0,70	0,66	0,51	0,28	41,98
3,0 x 2,5	3,215*	-0,789	0,065	-0,001	-0,84	0,80	0,77	0,37	0,23	26,81
3,0 x 3,0	3,712*	-1,602*	0,295*	-0,018*	-0,78	0,75	0,71	0,38	0,29	27,65
3,0 x 3,5	3,606*	-1,047*	0,132	-0,006	-0,88	0,84	0,82	0,35	0,24	23,37
3,0 x 4,0	4,272*	-1,910*	0,339*	-0,020*	-0,88	0,81	0,78	0,38	0,29	23,37

Nota: * significância dos parâmetros a 5%; β_0 : parâmetro da regressão; β_1 : parâmetro da regressão; β_2 : parâmetro da regressão; r_{yy} : coeficiente de correlação; R^2_{aj} : coeficiente de determinação ajustado; $S_{xy}(\%)$: desvio padrão percentual; MEA: média dos erros absolutos; AIC: critério de informação de Akaike.

A largura dos anéis de crescimento está intimamente relacionada com as condições de crescimento das árvores, tais como práticas silviculturais de poda e desbaste; condições climáticas, a exemplo da pluviosidade e temperatura; condições do solo e nutrição (TOPANOTTI et al., 2021). Além dos fatores supracitados a redução da largura dos anéis ocorre como um reflexo do amadurecimento das células cambiais, em que nos primeiros anos são formados anéis mais largos e, posteriormente, mais estreitos devido à redução da atividade cambial e produção de lenho tardio (DIAO et al., 2022).

A variabilidade da largura dos anéis pode ser utilizada como parâmetro para avaliação da qualidade da madeira, em razão da sua relação com os índices de crescimento das árvores e resistência da madeira (SCHILLING et al, 1998; ORTEGA-RODRIGUES e TOMAZELLO-FILHO, 2019). De acordo com o relatado por Dobner et al (2018), as espessuras de anéis compreendidas entre 0,4 e 0,6 cm possibilitam uma série de potenciais aplicações.

Figura 25-Variação da largura do anel de crescimento das árvores bifurcadas de *T. vulgaris*, em diferentes espaçamentos de plantio.



Houve efeito estatístico significativo da interação entre os fatores de idade cambial e espaçamento do plantio para as porcentagens de lenho inicial e tardio das árvores bifurcadas (Figuras 26 e 27). O efeito significativo da interação indica a existência de dependência entre a idade e espaçamento para os percentuais das características avaliadas no experimento com o *T.vulgaris*. A média encontrada de lenho inicial foi de 79,44% e a de lenho tardio foi de 20,11%. Na figura 29, é possível observar que os maiores percentuais de lenho tardio estão concentrados no primeiro ano (28,32%), apesar de se identificar a predominância das porcentagens de lenho inicial, em todos os espaçamentos. Os resultados encontrados nesta pesquisa foram opostos ao relatado por Schilling et al. (1998) em que nos primeiros anos de plantio as faixas de lenho tardio tendem a ser mais estreitas, tornando-se mais evidentes com o amadurecimento da árvore.

Os espaçamentos mais adensados de 3,0 x 1,5 m, 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,5 m, tenderam a apresentar maior percentagem de lenho inicial com médias de 82,19%, 83,73% e 86,58%, respectivamente. Com o incremento da área útil por planta observou-se um ligeiro aumento das percentagens lenho tardio com médias 21,70%, 37,32% e 15,24%, nos espaçamentos de 3,0 x 3,0 m, 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m, respectivamente. A redução da competição intraespecífica entre os indivíduos do povoamento devido o aumento da área útil pode ter favorecido o desenvolvimento das árvores, fazendo com que estas produzissem maior percentagem de lenho tardio em relação aos demais espaçamentos. Em estudo realizado com *S. tzumu*, verificou-se que com a redução da densidade povoamento, a espécie passou a produzir maior percentagem de lenho tardio, o que promoveu melhorias na qualidade da madeira (DIAO et al., 2022).

Figura 26-Porcentagens de lenhos inicial e tardio, por idade cambial, das árvores bifurcadas de *T. vulgaris* nos espaçamentos iniciais de 3,0 x 1,5 m (A); 3,0 x 3,0 m (B); 3,0 x 2,5 m (C); 3,0 x 3,0 m (D); 3,0 x 3,5 m (E) e 3,0 x 4,0 m (F).

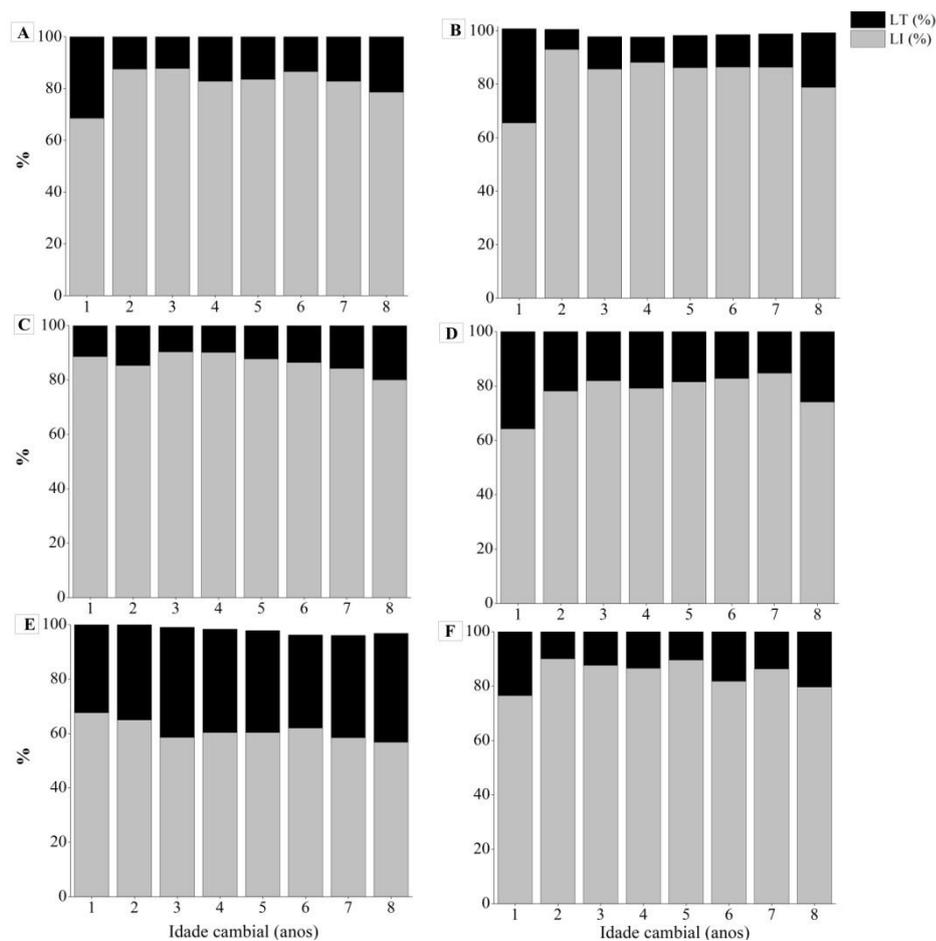
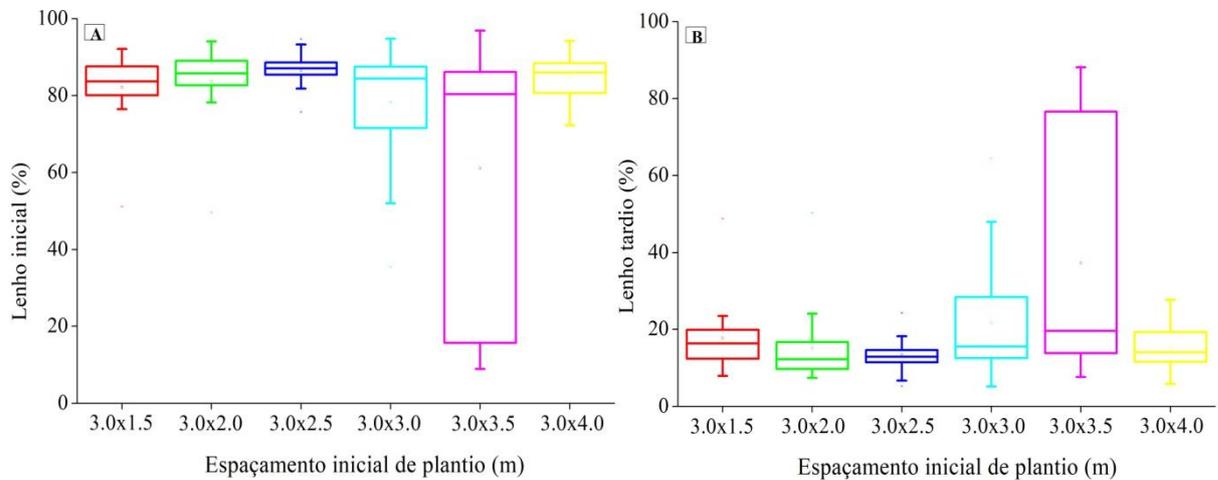
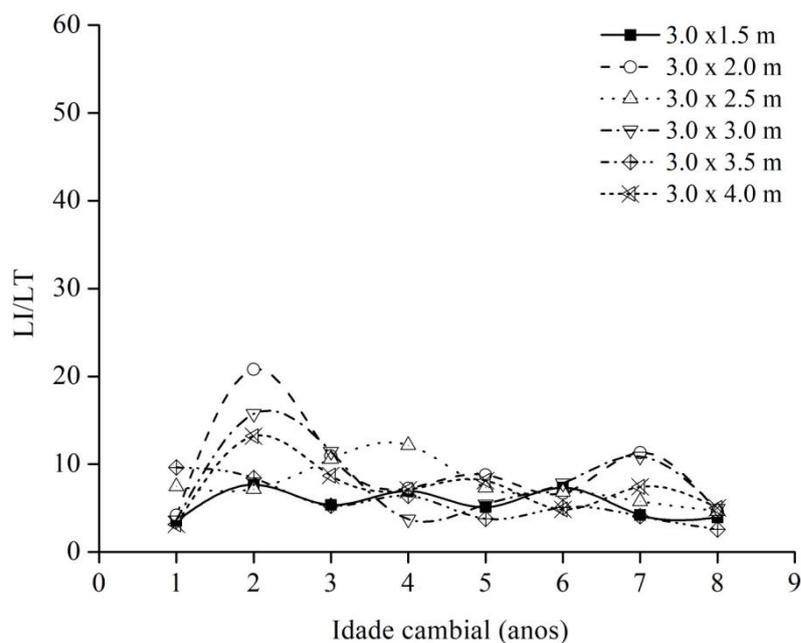


Figura 27-Variações dos percentuais de lenho inicial (A) e tardio (B) de árvores bifurcadas de *T. vulgaris*, independentemente da idade cambial.



Não houve efeito estatístico da interação entre a proporção de lenho inicial e lenho tardio (LI/LT) para as árvores bifurcadas de *T.vulgaris*, foi observado apenas efeito significativo da idade, em que há uma tendência de redução da característica em função do avanço desse fator (Figura 28). O espaçamento de plantio de 9,0 m²/planta obteve as maiores médias dessa característica com 10,44, enquanto que a menor média foi observada no espaçamento de 4,5 m²/planta com 7,79%. De forma geral, a proporção de LI/LT para as árvores bifurcadas foi menor aos valores obtidos para as árvores não bifurcadas.

Figura 28-Variações das proporções de lenho inicial/lenho tardio por anel de crescimento, mensuradas em árvores bifurcadas de *T. vulgaris*.



7.3.4 Efeitos de espaçamento e tipo de fuste na densidade aparente de *T. vulgaris*.

A análise de variância indicou que não há efeito da interação do espaçamento inicial de plantio e o tipo de fuste para a densidade aparente de *T. vulgaris* (Tabela 12). Para esta variável, foi verificada apenas a influência significativa do fator espaçamento (Figura 29). Os espaçamentos de 3,0 x 1,5 m; 3,0 x 2,0 m; 3,0 x 2,5 m e 3,0 x 3,0 m apresentaram valores aproximados de densidade. Nos espaçamentos de 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m ocorreu redução dos valores, que pode ser um reflexo dos altos índices de mortalidade que ocorreram na plantação. O espaçamento de 3,0 x 3,0 m apresentou a maior média para variável de 0,67 g cm⁻³ e os de 3,0 x 3,5 m e 3,0 x 4,0 m os menores com 0,60 g cm⁻³ e 0,63 g cm⁻³, respectivamente.

Tabela 12- Resumo das análises de variância realizadas para verificar os efeitos de espaçamento e tipo de fuste na densidade aparente de *T. vulgaris*.

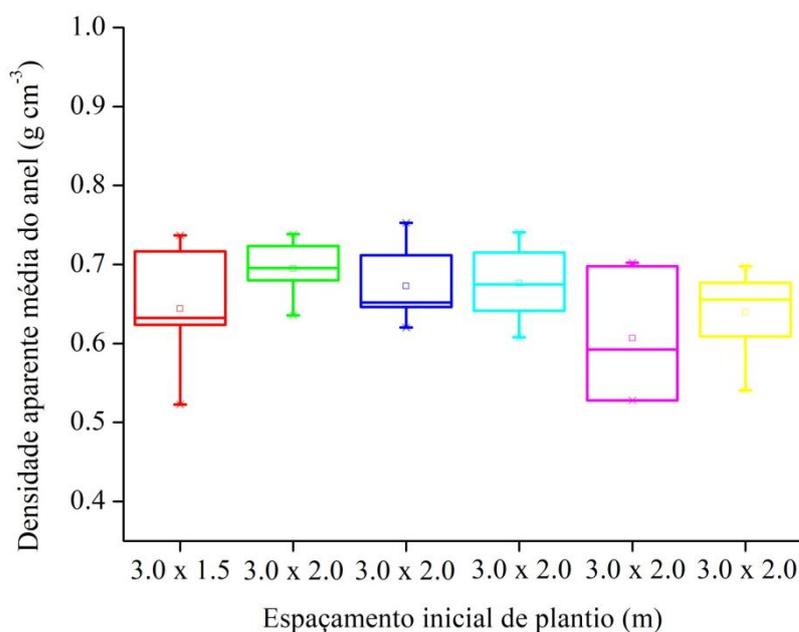
Fonte de Variação	GL	D _{anel}	
		QM	Fc
Espaçamento	5	0,0051	2,56*
Bloco	2	0,0196	9,74*
Erro a (parcela)	10	0,0020	
Tipo de fuste	1	0,0001	0,04 ^{ns}
Espaçamento*Tipo de fuste	5	0,0057	1,49 ^{ns}
Erro b (subparcela)	12	0,0038	
Total	35		
Cve ¹			6,86%
Cve ²			9,43%

D_{anel}: Densidade média do anel; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; Fc = Fcalculado; Cve¹: coeficiente de variação experimental para parcela (%); Cve²: coeficiente de variação experimental para subparcela (%); *: significativo a 5% de significância; ^{ns}: não significativo a 5% de significância.

O aumento dos valores de densidade em função do espaçamento é comumente percebido na densidade básica da madeira conforme o exposto por Feuchard (2015) ao avaliar *E. urophylla* x *E. grandis* aos quatro e cinco anos de idade e Gomes et al., 2021 em estudo com clones de *E. urophylla* x *E. brassiana* aos 4,5 anos. Para a densidade aparente o espaçamento de plantio não costuma ser um fator significativo no comportamento da variável, sendo a influência da idade mais pronunciada. Apesar disso, Soranso et al (2016) ao conduzir estudo com *Khaya ivorensis* A. Chev em diferentes espaçamentos, verificou que em espaçamentos mais amplos como de 10x10 m, há uma correlação inversa entre a densidade aparente e o DAP, em que essa relação é apontada como desvantagem por proporcionar o aumento da variabilidade da madeira.

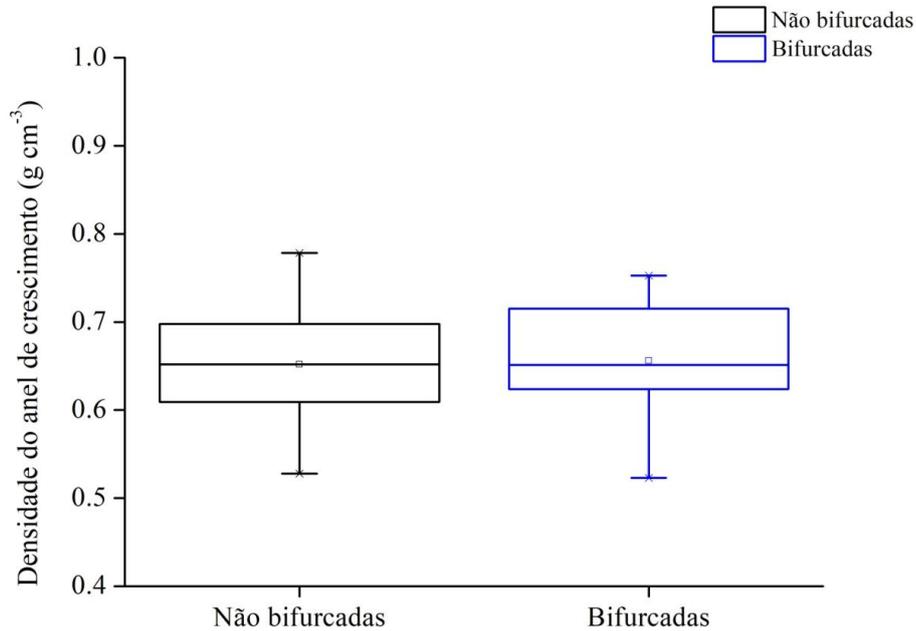
Do ponto de vista de estocagem de energia, os espaçamentos intermediários de 6,0 m², 7,5 m² e 9,0 m²/planta, representam para o experimento de *T. vulgaris* uma vantagem econômica, uma vez que detém maior densidade do lenho, o que pode ser entendido como uma maior quantidade de energia estocada por unidade de volume (LIMA et al., 2022), o que reflete nos custos gerados para a implantação, colheita e transporte, quando comparados com povoamentos implantados e, espaçamentos mais amplos (MOULIN et al., 2017). Lima et al., 2022, em seu estudo avaliando *T. vulgaris* aos 87 meses e aos 102 meses indica que o espaçamento de 9,0 m²/planta possui um melhor crescimento individual e por hectare sem alterar a qualidade da madeira, em relação aos espaçamentos de 10,5 m² e 12,0 m²/planta (SILVA et al., 2021; LIMA et al., 2022).

Figura 29-Densidade média aparente das árvores de *T.vulgaris* de plantação experimental.



As árvores não bifurcadas e bifurcadas apresentaram valores de densidade aparente média de 0,65 g cm⁻³ (Figura 30). De modo geral, os valores de densidade aparente das árvores não bifurcadas variaram de 0,52 g cm⁻³ a 0,77 g cm⁻³, enquanto que as variações observadas para as árvores com bifurcações foram de 0,52 g cm⁻³ a 0,75 g cm⁻³, sendo esses valores próximos aos encontrados por Arantes et al (2016) para clones de *E. grandis* x *E.urophylla* (0,517 a 0, 589 g cm⁻³). A densidade da madeira é um importante índice para avaliação da qualidade e aplicação da madeira. As árvores bifurcadas avaliadas nesta pesquisa apresentam potencial para utilização bioenergética, capaz de produzir carvão vegetal com qualidade semelhante ao originado das árvores sem bifurcações.

Figura 30-Densidade aparente média do anel de crescimento para os diferentes tipos de fuste de *T. vulgaris* de plantação experimental.



7.4 Conclusão

Este estudo revelou que o perfil densitométrico dos fustes principais apresentam maior densidade aparente e todos os anéis (8) referentes à idade da plantação, enquanto que os fustes secundários têm menor densidade e menor quantidade de anéis. A idade cambial influenciou as características de porcentagem de lenho inicial, tardio e proporção de LI/LT nas árvores não bifurcadas e as de largura do anel e proporção de LI/LT para as bifurcadas. O efeito da interação entre as condições de plantio inicial e idade cambial foi percebido para a largura dos anéis das árvores não bifurcadas e porcentagem de lenho inicial e tardio nas árvores bifurcadas. O tipo de fuste não demonstrou influenciar nos valores de densidade média aparente, para esta propriedade o espaçamento teve maior atuação.

Em todas as variáveis estudadas o *T. vulgaris* obteve desempenho satisfatório em relação aos parâmetros desejáveis para destinação a produção de carvão vegetal e potencial para implantação em larga escala, mesmo contendo índices expressivos de bifurcações.

8 CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa é possível concluir que:

As condições atuais dos espaçamentos iniciais de plantio atuam sobre as propriedades da madeira de *T. vulgaris* de densidade básica e aparente, percentual de cerne e alborno, relação C/A e área do disco. Entre os espaçamentos avaliados, o de 9,0 m²/planta apresenta-se como o mais promissor para utilização em futuras implantações da espécie.

O tipo de fuste demonstrou maior influência sobre a densidade básica da espécie, contribuindo tanto para a redução dos valores de densidade como provocando maior variabilidade desta dentro do fuste. Para a densidade aparente o tipo de fuste não foi um fator significativo para esta propriedade.

A idade demonstrou ser um fator significativo para condução de povoamentos de *T. vulgaris*, em que, com base nos resultados apresentados a colheita em idades mais avançadas pode minimizar os problemas relacionados às variações de propriedades como a redução da densidade básica nas árvores bifurcadas.

Apesar de não ter sido o foco deste trabalho o lenho de *T. vulgaris* apresentou potencial para avaliações sobre as variabilidades ambientais na formação do lenho e suas propriedades por meio da análise dos anéis de crescimento, sendo, portanto, uma área a ser explorada em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, P. *et al.* Diagnóstico econômico-ambiental no município de Almeirim, Pará. – Belém, PA: Instituto Floresta Tropical. Fundação Floresta Tropical; Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (Imaflora), 2010.
- BARROS-JÚNIOR, U. O. *et al.* Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali Vulgaris* for energy in Amazonia. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 34, n. 1, p. 11-23, 2022.
- BENJAMIN, C. A. Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis*. 2006.
- BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P. A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. **Oecologia**, v. 146, n. 1, p. 1-12, 2005.
- CÂMARA, A. P. *et al.* Physiological disorders affecting dendrometric parameters and eucalyptus wood quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, p. 27-34, 2018.
- CASTRO, V. R. *et al.* 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, p. 1017-1027, 2017.
- CASTRO, V. R. *et al.* The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis* (Retraction of Vol 10, art no 2530, 2020). 2021.
- CHAMBI-LEGOAS, R. *et al.* Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of *Eucalyptus grandis* trees over a full rotation. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 1-10, 2021.
- DIAO, S. *et al.* Variation in growth, wood density, and stem taper along the stem in self-thinning stands of *Sassafras tzumu*. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022.
- DOBNER, 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.
- FARIAS, J. *et al.* Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016.
- FARIAS, J. *et al.* Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016.
- FEUCHARD, L. D. **Influência do espaçamento de plantio e idade de colheita na qualidade da madeira de eucalipto para celulose**. 2015. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

GAITAN-ALVAREZ, J. et al. The use of X-ray densitometry to evaluate the wood density profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. **Dendrochronologia**, v. 55, p. 71-79, 2019.

GIL, J. L. R. A. et al. Características físicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Lf aos 7 anos de idade. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 529-538, 2018.

GOMES, I. R. F. et al. Does spacing affect the production of clones for wood energy planted in the state of Rio Grande do Norte, Brazil. *Scientia Forestalis*, n. 49, 2021.

GULLER, B.; ISIK, K.; CETINAY, S. Variations in the radial growth and wood density components in relation to cambial age in 30-year-old *Pinus brutia* Ten. at two test sites. **Trees**, v. 26, n. 3, p. 975-986, 2012.

IBGE. Mapa de Aptidão Agrícola do Estado do Pará. Disponível em: <https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/pa_pedologia.pdf>. Acesso em: 05/11/2020.

INGA, J. G.; DEL VALLE, J. I. Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and *Juglans neotropica*, Central Forest, Peru. **Dendrochronologia**, v. 44, p. 117-129, 2017.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos, Almeirim-PA. 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 09/11/2020.

IVKOVIĆ, M. et al. Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 5, p. 525-534, 2013.

JACQUIN, P. et al. X-ray microdensitometry of wood: A review of existing principles and devices. **Dendrochronologia**, v. 42, p. 42-50, 2017.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. et al. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of *El Niño* 2015–2016. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016.

LIMA, M. D. R. et al. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020.

LIMA, M.D.R. et al. *Tachigali vulgaris* energy forests: understanding spacing, age, and stem type effects on tree growth patterns and wood density. **New Forests**. 2022.

MELO, J. T.; HARIDASAN, M. Resposta de mudas de carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vog. Leguminosae) a doses de N, P, K, Ca e Mg. 2010.

MÖRLING, T. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 1, p. 29-40, 2002.

NARDUCCI, R. et al. Mechanical properties of anion exchange membranes by combination of tensile stress–strain tests and dynamic mechanical analysis. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**, v. 54, n. 12, p. 1180-1187, 2016.

NICOLETTI, M. F. *et al.* Influência do primeiro desbaste no crescimento de quatro espécies do gênero *Pinus*. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 1, p. 1-9, 2022.

OLIVEIRA, B. R. U. *et al.* 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, 2012.

OLIVEIRA, B.R.U. *et al.* Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 499-508, 2011.

OLIVEIRA, L.R. *et al.* Wood volumetry of *Tachigali vulgaris* pure plantations in different planting spacings. **FLORESTA**, v. 51, n. 4, p. 962-970, 2021.

ORELLANA, B. B. M. *et al.* Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na amazônia. **Nativa**, v. 6, n. 2009, p. 773, 2018.

ORTEGA-RODRIGUEZ, D. R. *et al.* 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.

PEREIRA, A. A. *et al.* Grouping of wood residues from sustainable forest management aiming at bioenergy generation. **Scientia Forestalis**, n. 127, 2020.

PROTÁSIO, T.P. *et al.* Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-45, 2021.

RODRIGUES, R. P. *et al.* Crescimento e mortalidade de *Tachigali vulgaris* LG Silva & HC Lima em diferentes espaçamentos de plantio para a produção de biomassa. **Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2020.

ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. Silvicultura e tecnologia de espécies da mata atlântica. **Belo Horizonte: Editora Rona**, 2018.

SCHILLING, A. C. *et al.* Influência de diferentes intensidades de desrama sobre a porcentagem de lenho tardio e quantidade de nós da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelman. **Ciência Florestal**, v. 8, p. 115-127, 1998.

SILVA, M. O. S. S. *et al.* Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi-branco trees planted at different spacings for bioenergy purposes. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 1, p. 211-224, 2021.

SORANSO, D. R. *et al.* Variabilidade física e anatômica da madeira de *Khaya ivorensis* A. Chev. em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 519-526, 2016.

SOUSA, V. B.; LOUZADA, J.L.; PEREIRA, H. Age trends and within-site effects in wood density and radial growth in *Quercus faginea* mature trees. **Forest Systems**, v. 25, n. 1, p. e053-e053, 2016.

SOUSA, V. G. *et al.* Taxi-branco (*Tachigali vulgaris* LF Gomes da Silva & HC Lima): botânica, ecologia e silvicultura. 2016.

TEIXEIRA, R.A.C. **Dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima em resposta à adubação e textura de solo.** 2021. Dissertação. (Mestrado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia. 79 p.

TOMASELLI, I. *et al.* Caracterização da madeira de Taxi-branco-da-terra-firme (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) para energia. 1983.

TOMAZELLO-FILHO, M. *et al.* Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v.10, n. 2, p.139-149, 2008.

TONINI, H. *et al.* Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

TOPANOTTI, L. R. *et al.* Growth and wood density of *Pinus taeda* L. as affected by shelterwood harvest in a two-aged stand in Southern Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, n. 4, p. 869-881, 2021.

UGULINO, B. *et al.* Tree-ring growth response of teak (*Tectona grandis* Lf) to climatic variables in central-west region of Brazil. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 473-482, 2014.

ZANUNCIO, A. J.V. *et al.* Anatomical, ultrastructural, physical and mechanical wood properties of two-year-old *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones. **Revista Árvore**, v. 42, 2018.