



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

JEAN CARLOS LOPES DE OLIVEIRA

**EFEITO DA SAZONALIDADE HÍDRICA NA QUALIDADE DO LENHO DE ÁRVORES
DE EUCALIPTOS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2021

JEAN CARLOS LOPES DE OLIVEIRA

**EFEITO DA SAZONALIDADE HÍDRICA NA QUALIDADE DO LENHO DE ÁRVORES
DE EUCALIPTOS**

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

Orientadora: Graziela B. Vidaurre Dambroz

Coorientador: Jordão Cabral Moulin

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

O48e Oliveira, Jean Carlos Lopes de, 1989-
Efeito da sazonalidade hídrica na qualidade do lenho de
árvores de eucaliptos / Jean Carlos Lopes de Oliveira. - 2021.
84 f. : il.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientador: Jordão Cabral Moulin.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Anéis de crescimento. 2. Densidade da madeira. 3. Lenho
inicial. 4. Lenho tardio. 5. Sazonalidade de chuvas. I. Vidaurre,
Graziela Baptista. II. Moulin, Jordão Cabral. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias. IV. Título.

CDU: 630*38

**EFEITO DA SAZONALIDADE HÍDRICA NA QUALIDADE
DO LENHO DE ÁRVORES DE EUCALIPTOS**

Jean Carlos Lopes de Oliveira

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

Aprovada em 26 de fevereiro de 2021.



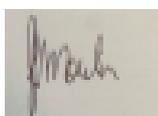
Prof. Dr. Matheus Peres Chagas (Examinador externo)
Universidade Federal de Goiás



Prof. Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca (Examinador externo)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Vinicius Resende de Castro (Examinador externo)
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Jordão Cabral Moulin (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo



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

*As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu.
Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos
e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os
pensamentos.*

Paulo Belike

À Ana Paula, pelo amor
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo dom da vida. Aos meus pais, Nelson Alves de Oliveira Filho (*in memoriam*) e Evanir Lopes de Oliveira, pelo amor, incentivo e apoio incondicionais.

Agradeço a minha esposa Ana Paula Câmara da Silva, por todo carinho, amor e companheirismo nos momentos de dificuldade.

Ao meus amigos Ananias Dias e Tamires Partelli por sempre me apoiarem em assuntos alheios à Universidade.

Ao professor Mário Tommasiello Filho por abrir as portas do laboratório de Anatomia e Identificação da Madeira – ESALQ e auxiliar nas análises.

Aos companheiros de laboratório José Geraldo, Gabriela Amorim, Daniel Ribeiro, Ramon Ferreira, Maria Naruna e João Gabriel pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores Graziela Baptista Vidaurre e Jordão Moulin, pela orientação e confiança em mim para a realização desse projeto.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições e sugestões para melhoria do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF pela parceria e fornecimento da madeira.

À Universidade Federal do Espírito Santo e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES pela concessão de bolsa, sem a qual não seria possível a realização da pesquisa.

RESUMO

OLIVEIRA, Jean Carlos Lopes de. **Efeito da sazonalidade hídrica na qualidade do lenho de árvores de eucaliptos**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES. Orientadora: D. Sc. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz. Coorientador: D. Sc. Jordão Cabral Moulin.

A interação árvore e clima influencia o crescimento anual, densidade da madeira e na morfologia de vasos e fibras. Entretanto, essa complexa relação ainda tem questionamentos a serem respondidos, principalmente para espécies amplamente cultivadas no Brasil como *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. O objetivo do estudo foi avaliar o crescimento anual, densidade da madeira e morfologia de vasos e fibras nos lenhos inicial e tardio, caracterizar comportamentos de dois clones de eucalipto em um gradiente de sazonalidade de chuvas, identificando as relações entre as propriedades da madeira e por fim, indicar a amostragem mais representativa do perfil radial dessas propriedades. A largura dos anéis de crescimento, densidade aparente e morfologia de vasos e de fibras foram estudadas no sentido radial (medula à casca) de *Eucalyptus urophylla* (G7) e *Eucalyptus grandis* (Q8), em cinco sítios com diferentes sazonalidades climática no Brasil. O lenho tardio dos sítios mais contrastantes na sazonalidade de chuva apresentou menores densidades. O lenho inicial teve 2 vezes mais condutividade hidráulica que o lenho tardio. O maior incremento nos anéis de crescimento mostrou ter efeito de diminuição na densidade da madeira de ambos os clones. Além da espessura de parede das fibras, a densidade pode ser explicada pela largura dos anéis de crescimento e condutividade hidráulica potencial. A amostragem na faixa de 33 a 66% do raio representou de forma satisfatória a média geral da densidade aparente, comprimento e espessura da parede das fibras e diâmetro dos vasos da madeira de *E. urophylla* e *E. grandis*.

Palavras-chave: Anéis de crescimento, Densidade da madeira, Lenho inicial, Lenho tardio, Sazonalidade de chuvas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Jean Carlos Lopes de. **Effect of water seasonality on the wood quality of eucalyptus trees**. 2021. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz. Co-advisor: D.Sc. Jordão Cabral Moulin

The interaction between tree and climate influences the annual growth, wood density, and vessels and fibers morphology. However, this complex relationship still has questions to be answered, mainly for species widely cultivated in Brazil, such as *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. The objective was to evaluate the annual growth, wood density and vessels and fibers morphology in earlywood and latewood, to characterize the behavior of two eucalyptus clones in a rainfall seasonality gradient, identifying the relationships with wood properties and, finally, to indicate the most representative sample of the radial profile of these properties. Growth ring width, apparent density and, vessel and fiber morphology were studied radial direction (pith to bark) of *Eucalyptus urophylla* (G7) and *Eucalyptus grandis* (Q8), in five sites with different climatic seasonality in Brazil. The latewood of the most contrasting sites in the rainfall seasonality showed lower densities. The earlywood had twice more hydraulic conductivity than the latewood. The greatest increment in the growth rings was shown to have a decreasing effect on the wood density of both clones. In addition to the fibers wall thickness, the density can be explained by growth ring width and potential hydraulic conductivity. Sampling in the range of 33 to 66% of the radius represented satisfactorily the general average of the apparent density, length and fiber thickness wall and vessels diameter of *E. urophylla* and *E. grandis* wood.

Keywords: Growth ring, Wood density, Earlywood, Latewood, Rainfall seasonality.

Sumário

INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1 Objetivos	12
1.2 Estrutura da tese	12
CAPÍTULO I - Variação anual de crescimento e densidade da madeira de eucalipto em gradiente de disponibilidade de água	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3. RESULTADOS	22
4. DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÃO	33
6. REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO II - Impacto da sazonalidade de chuvas na densidade e anatomia da madeira do lenho inicial e tardio de eucalipto no Brasil	37
1. INTRODUÇÃO	38
2. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3. RESULTADOS	45
4. DISCUSSÃO	56
5. CONCLUSÃO	59
6. REFERÊNCIAS	59
CAPÍTULO III - Qual a amostragem radial é mais representativa da densidade aparente, morfologia de vasos e fibras na madeira jovem de Eucalyptus? ..	63
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAIS E MÉTODOS	66
3. RESULTADOS	69
4. DISCUSSÃO	74
5. CONCLUSÃO	76
6. REFERÊNCIAS	76
7. APÊNDICE	80
CONCLUSÕES GERAIS	84

INTRODUÇÃO GERAL

A precipitação tem influência na distribuição terrestre e desenvolvimento das árvores, com impacto na formação de madeira. Essa variável meteorológica possui, no entanto, variabilidade em escala temporal e espacial, a citar: o ciclo diário, oscilações intrasazonais, sazonalidade e tendência interanual, além dos efeitos de continentalidade, ou seja, os efeitos sobre as espécies são irregulares. Por isso, identificar os padrões de variabilidade temporal e espacial é importante para o planejamento das atividades e dos impactos silviculturais, considerando a formação de madeira como resultado deste processo e geração da matéria prima florestal. Além disso, o Brasil caracteriza-se possuir regiões distintas formadas pelo conjunto de solo e clima específicos, que abrigam plantações florestais promissoras.

A sazonalidade de chuvas promove em árvores tropicais alterações nas condições de crescimento que variam temporalmente, onde o xilema secundário expressa condições favoráveis (lenho inicial) e desfavoráveis (lenho tardio), produzindo regiões de tecidos contrastantes na formação de um anel anual de crescimento. No caso do eucalipto, que possui porosidade difusa, a identificação do lenho tardio é realizada com auxílio de marcadores anatômicos: células com paredes espessas e / ou achatadas radialmente; zonas fibrosas e raios estendidos (RUFFINATTO; CRIVELLARO; WIEDENHOEFT, 2015). Essas características anatômicas também estão intrínsecas ao ritmo de crescimento de cada lenho, aliado a isso, a demanda de transporte de água interfere nos diâmetros e frequência dos elementos de vasos.

Diante das diferentes configurações anatômicas da madeira alguns questionamentos são levantados, e podem servir como auxílio em tomadas de decisão em plantios de eucalipto e sanar dúvidas sobre a interação madeira e clima: Qual período do ano uma intervenção silvicultural pode maximizar a produtividade e qualidade da madeira? Entre uma seca no período chuvoso e uma sequência de chuvas no período seco, qual fenômeno afeta mais a formação da madeira e seu crescimento? Qual melhor faixa do perfil radial para representativa das variações anatômicas e densidade da madeira?

A interação madeira e clima é complexa e depende de um ampla gama de fatores endógenos e exógenos à formação da madeira. Além disso, madeiras tropicais, como é o caso da maioria do gênero *Eucalyptus*, apresentam variações

dentro de um gradiente climático. Estudos de multiespécies plantados em sítios diferentes servem de banco de dados para o entendimento e indicativo de propriedades alteráveis ainda a serem exploradas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar os lenhos inicial e tardio, caracterizar comportamentos de dois clones de eucalipto em um gradiente de sazonalidade de chuvas, identificar as relações entre as propriedades da madeira e indicar um ponto de amostragem com maior representatividade propriedades no perfil radial.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar o crescimento anual e dos lenhos com a densidade da madeira em dois clones de eucalipto em ambientes contrastantes.
- 2) Determinar o comportamento anatômico das fibras e do transporte de água do lenho inicial versus lenho tardio em *Eucalyptus* em sítios com distintas sazonalidades de chuva. Identificar as relações entre largura de anéis de crescimento, densidade e anatomia de fibra e vaso. Explicar a densidade da madeira por largura de anel de crescimento e anatomia da madeira de dois clones de eucaliptos.
- 3) Definir o melhor ponto de amostragem para determinação da densidade aparente, elementos de vasos e fibras da madeira.

1.2 Estrutura da tese

Para atingir aos objetivos, o estudo foi dividido em três capítulos, cujos temas são:

Capítulo I – Variação anual de crescimento e densidade da madeira de eucalipto em gradiente de disponibilidade de água.

Capítulo II – Impacto da sazonalidade de chuvas na densidade e anatomia da madeira do lenho inicial e tardio de eucalipto no Brasil.

Capítulo III – Qual a amostragem radial é mais representativa da densidade aparente, morfologia de vasos e fibras na madeira jovem de *Eucalyptus*?

CAPÍTULO I

Variação anual de crescimento e densidade da madeira de eucalipto em gradiente de disponibilidade de água

RESUMO

A largura do anel e a densidade da madeira foram estudadas em perfis radiais de *Eucalyptus urophylla* (G7) e *Eucalyptus grandis* (Q8), em cinco sítios com diferentes sazonalidades no Brasil. Os perfis de madeira foram analisados para demarcação dos lenhos inicial e tardio. Zonas fibrosas que correspondem as maiores densidades no final do anel foram consideradas como parâmetro para a demarcação da largura do lenho tardio e utilizada como limite para o anel seguinte. A sazonalidade de precipitação foi atributo de distinção dos períodos secos e úmidos entre os sítios, tendo como análise de avaliação o agrupamento pela distância de Ward. Regressões entre largura do anel aos 3 e 6 anos e a biomassa do caule foram ajustadas. A largura do anel foi significativamente diferente entre os sítios, em ambos os clones. O lenho inicial teve maior crescimento e variação dos valores de densidade que o lenho tardio. A densidade dos lenhos foi mais heterogênea entre os anos de crescimento que entre os sítios. A densidade da madeira mostrou uniformidade no clone G7 no sítio de menor sazonalidade da precipitação. Observou-se relação entre a largura total dos anéis de crescimento e a biomassa final do caule, aos 6 anos, sendo a explicação de 98% da biomassa no sítio de menor sazonalidade, pelas larguras totais, e 76% pela largura do lenho inicial neste mesmo sítio.

Palavras chave: Sazonalidade; Anéis de crescimento, Densidade, *Eucalyptus*

Highlights

- A densidade do lenho inicial e tardio foi mais heterogênea entre anos de crescimento que entre os sítios.
- A sazonalidade dos sítios promove maior amplitude entre as densidades dos lenhos de eucalipto.
- A largura do lenho inicial explica 76% da biomassa do caule em sítio com menor sazonalidade de precipitação.

1. INTRODUÇÃO

A xilogênese ocorre pela produção de células e seus respectivos estágios da divisão celular até a maturação, com intuito de manutenção da integridade fisiológica da árvore e maximização no aproveitamento dos recursos disponíveis (COCOZZA et al., 2016; ROSSI; GIRARD; MORIN, 2014). A madeira produzida circunda o tronco e distingue-se anatomicamente, em alguns casos, através da coloração. A demarcação geralmente escura (lenho tardio) delimita a fronteira de um ano para o outro e, são mais evidentes em espécies com distribuição de vaso dos tipos anel poroso e semiporoso (DE MICCO et al., 2016), enquanto em espécies com porosidade difusa são menos distinguíveis (DE MICCO et al., 2019).

A distinção dos lenhos ocorre em resposta aos eventos contrastantes e extremos, de temperatura e precipitação (FRITTS, 1974). Muitos estudos relacionam as propriedades da madeira apenas as médias anuais de chuva, isso pode desconsiderar o efeito de sazonalidade local. A alternância e amplitude nos períodos, caracterizam a sazonalidade, que resulta em alterações na estrutura anatômica da madeira (ALBUQUERQUE et al., 2016). Espécies de porosidade difusa, como o eucalipto e outras espécies de clima tropical, quando submetidas a períodos secos bem definidos, podem apresentar anéis de crescimento distinguíveis por zonas fibrosas (ANDRADE et al., 2017), demarcando o lenho tardio, de maior densidade quando comparado ao lenho inicial.

A formação da madeira ocorre por meio do câmbio vascular, que tem sua atividade fisiológica condicionada, entre outros fatores, pelo clima (RAMAGE et al., 2017). Grande parte do Brasil é caracterizado por períodos definidos de precipitação (RAO et al., 2016), o que corresponde às sazonalidades de período chuvoso e seco. O período chuvoso pode abranger as estações de primavera e verão, no qual a atividade cambial é alta, resultando em maior incremento das árvores (CASTRO et al., 2020). A madeira de folhosa é também composta pelo lenho inicial que tem como característica elementos de vasos com maiores diâmetros e menor frequência, e fibras com paredes delgadas e lúmens maiores (GODOY-VEIGA et al., 2019). O período caracterizado como seco pode abranger as estações de outono e inverno, onde as chuvas são menos intensas e pouco frequentes (RAO et al., 2016). A atividade do câmbio vascular é diminuída, podendo até cessar em intervalos entre chuvas muito extensos (CASTRO et al., 2020).

Espécies de rápido crescimento como o eucalipto, o incremento é contínuo durante o ano, entretanto, são desconhecidas as influências e relações diretas dos lenhos inicial (período chuvoso) e lenho tardio (período seco) na biomassa do caule e densidade da madeira. Neste contexto, a escolha de clones de eucalipto sensíveis as condições do clima (SCOLFORO et al., 2019) se faz necessários para estudos intra-anuais na madeira. A variação intra-anel da densidade da madeira é também indicativo para a finalidade da madeira, uma vez que, o contraste entre lenhos afeta a uniformidade do material (BOUSLIMI; KOUBAA; BERGERON, 2019). Dessa forma, o estudo das proporções de lenho inicial e tardio tem importância para aplicações industriais, de modo que a homogeneidade das características de madeira seja desejável.

Assim, o presente estudo objetivou avaliar o crescimento anual e determinar a proporção entre os lenhos inicial e tardio através da densidade da madeira em dois clones de eucalipto crescendo em ambientes contrastantes. As hipóteses testadas foram: i) O estudo intra-anual do crescimento e densidade descreve de forma mais específica as variações na madeira. ii) Considerar a sazonalidade na variação do crescimento e densidade é uma alternativa para descrever a relação fisiológica-temporal da madeira de forma precisa. iii) A variação do crescimento e densidade da madeira é maior nos anos iniciais (até 3 anos), sendo responsável pela maior heterogeneidade radial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Projeto TECHS (Tolerância de Clones de Eucalipto a Estresses Hídricos, Térmicos e Bióticos)

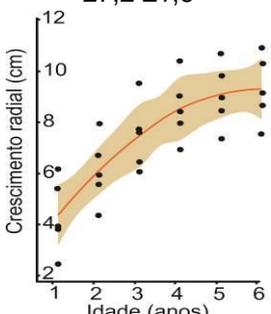
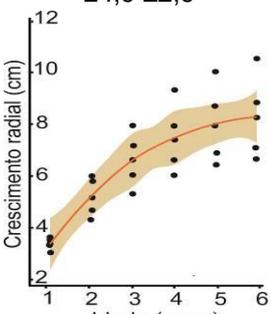
O projeto TECHS teve sua instalação no período entre o final de 2011 a início de 2012, e a colheita realizada em 2018 quando as árvores atingiram 6 anos de idade. Os plantios foram realizados em 36 sítios, do norte do Brasil ao Uruguai (BINKLEY et al. 2017), com 18 materiais genéticos diferentes, sendo: 7 clones para os sítios tropicais), 7 clones para sítios subtropicais e 4 clones considerados plásticos que foram implantados em todos os sítios . A escolha dos clones foi baseada na utilização operacional de acordo com clima. Cada sítio tinha uma réplica de 11 clones do TECHS, mais um clone adicional escolhido por uma das 26

empresas parceiras (não incluído nesta análise). O projeto TECHS teve por objetivo investigar o padrão de crescimento do eucalipto em diferentes condições climáticas.

2.2 Clones e sítios experimentais

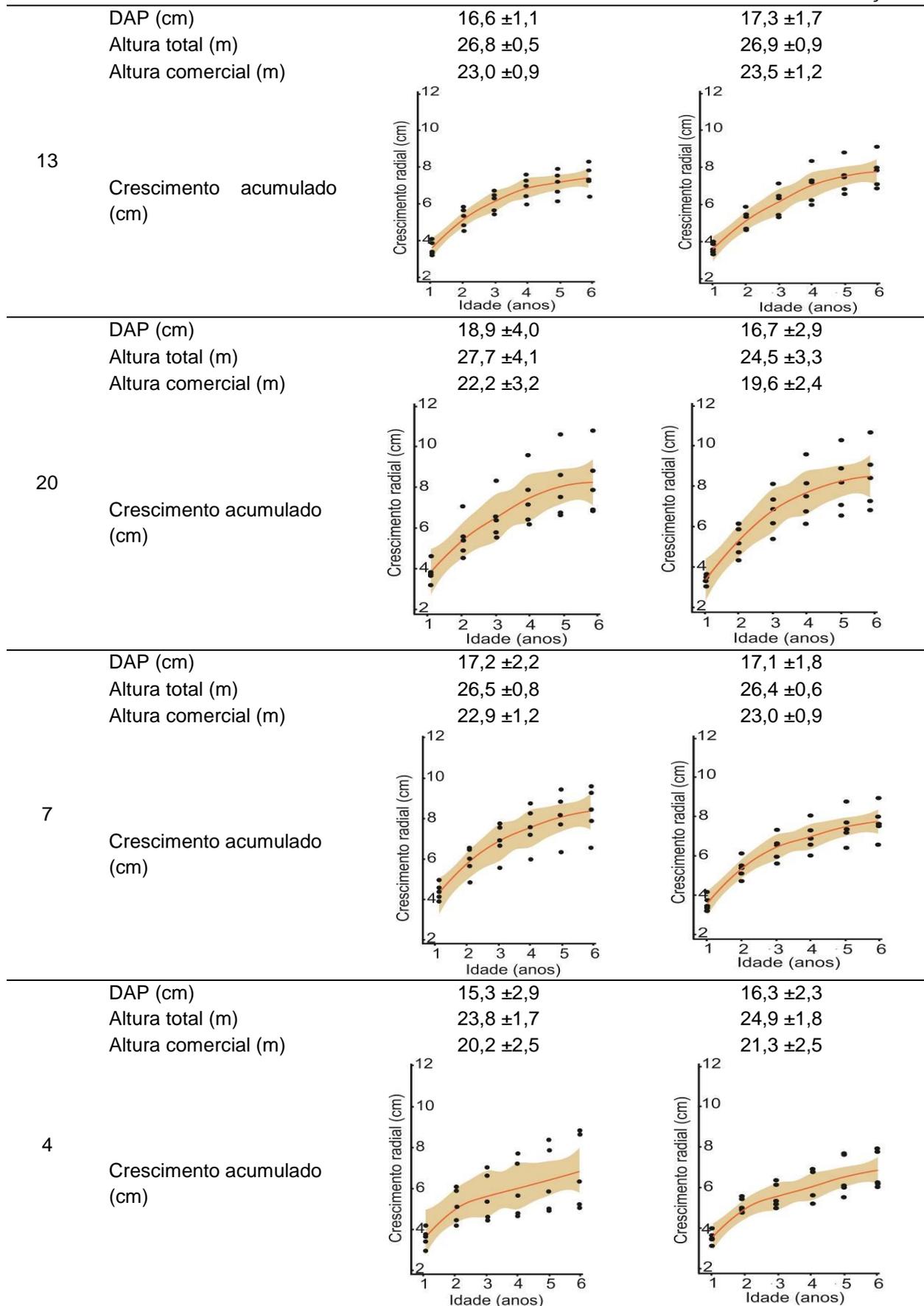
Os dois materiais do gênero *Eucalyptus* utilizados neste estudo foram classificados como sensíveis ao clima (SCOLFORO et al., 2019), sendo: *E. urophylla* (G7 - IPBH15, tropical, clima de origem Cwa) e *E. grandis* (Q8 - VER 361, “plástico” ou seja, há interação genótipo-ambiente e produção de fenótipos alternativos com produtividade (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2011), clima de origem Af). Cada clone foi plantado em uma única parcela por sítio (24 × 45 m) com 8 linhas x 15 árvores e espaçamento de 3 x 3 m. Todas as árvores dentro de cada parcela tiveram o diâmetro na altura do peito (DAP) medido a 1,3 metros do solo. Após a medição da parcela, cinco árvores com troncos retos e sem sinais de doença foram selecionadas. As árvores foram cortadas e as alturas total e comercial foram determinadas (Tabela 1). O diâmetro mínimo de 6 cm foi considerado para a determinação da altura comercial. Posteriormente, cortes transversais de 4 cm de espessura foram realizados no DAP para obtenção dos discos.

Tabela 1. Variáveis dendrométricas das árvores selecionadas nos 5 sítios de crescimento, aos 6 anos.

Sítio*	Variáveis dendrométricas	<i>Eucalyptus</i>	
		<i>E. urophylla</i> (G7)	<i>E. grandis</i> (Q8)
	DAP (cm)	20,7 ±2,4**	18,2 ±2,9
	Altura total (m)	31,1 ±1,2	28,4 ±2,4
	Altura comercial (m)	27,2 ±1,6	24,9 ±2,9
2	Crescimento acumulado (cm)		

Contiua...

Continuação



* Os sítios foram apresentados de acordo com a sazonalidade de precipitação.

** Média é representada pela linha vermelha e desvio padrão pela sombra marrom, n=5 árvores. DAP= diâmetro a altura de 1,30m do solo.

Cinco sítios experimentais distribuídos ao longo do Brasil foram escolhidos (2, 4, 7, 13 e 20 (Figura 1) para o desenvolvimento do estudo, com diferentes sazonalidades de precipitação.

Sítios ¹	Local (Cidade/Estado)	Coordenadas geográficas		Altitude m	Ordem de solo ²
		Lat	Long		
2	Arapoti - PR	24.2 S	50.0 O	770	Latossolo
4	Belo Oriente – MG	19.3 S	42.4 O	243	Latossolo
7	Rio Verde – GO	18.0 S	50.9 O	681	Neossolo
13	Três Lagoas – MS	20.9 S	51.9 O	361	Latossolo
20	Mogi Guaçu – SP	22.3 S	46.9 O	633	Latossolo

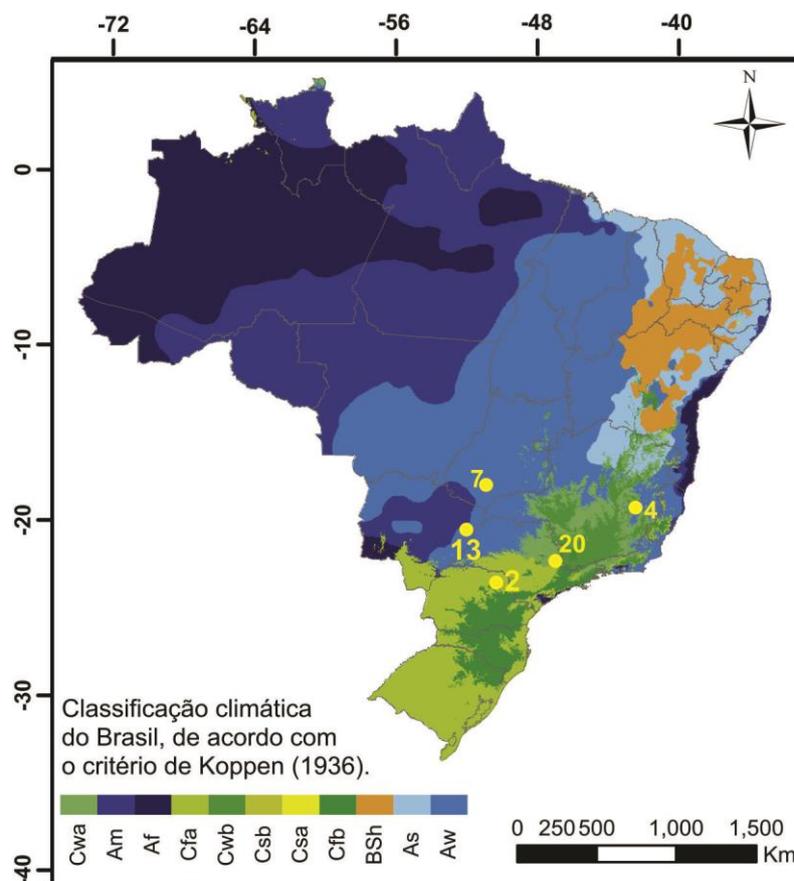


Figura 1. Localização dos 5 sítios do TECHS avaliados, coordenadas geográficas e de altitude. ¹ Numeração dos sítios adotada pelo programa TECHS. ² De acordo com a Soil Survey Staff, (2014).

2.3 Obtenção de dados meteorológicos

O déficit hídrico do solo (DEF) foi realizado a partir do balanço hídrico sequencial em escala mensal proposto por Thornthwaite e Mather em 1955 (CAMARGO, 1962). Dados meteorológicos de temperatura do ar média, máxima e

mínima, umidade relativa média, velocidade do vento a 10 metros, radiação solar global e precipitação, para o período de 2012 a 2018, foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) seguindo a metodologia de preenchimento de falhas utilizada por Elli et al., (2019); Rocha et al., (2020) e estação meteorológica privada – 04 Belo Oriente.

2.4 Amostragem, densidade da madeira e largura dos anéis de crescimento

Os discos do DAP foram lixados (grã 50, 80, 120, 180, 220, 400, 800 e 1200) para a correta delimitação do limite dos anéis anuais de crescimento (Figura 2a), realizada com lupa de lente de aumento de 10x e sistema de iluminação independente. Uma varredura visual na seção transversal dos discos foi realizada, identificando-se zonas fibrosas, associadas ao limite dos anéis de crescimento. Quatro raios foram traçados, afim de representar de forma mais precisa o crescimento anual da madeira com o cuidado de não incluir defeitos (nós e disco com medida excêntrica) que pudessem gerar valores discrepantes.

Os discos foram digitalizados pelo scanner Epson Perfection v750 pro/1200 dpi. As imagens foram analisadas pelo software Axio Vision SE64 para a medição das larguras dos anéis de crescimento. A inclinação da reta que mede os lenhos formadores do anel de crescimento foi similar a inclinação do raio formado no ano correspondente.

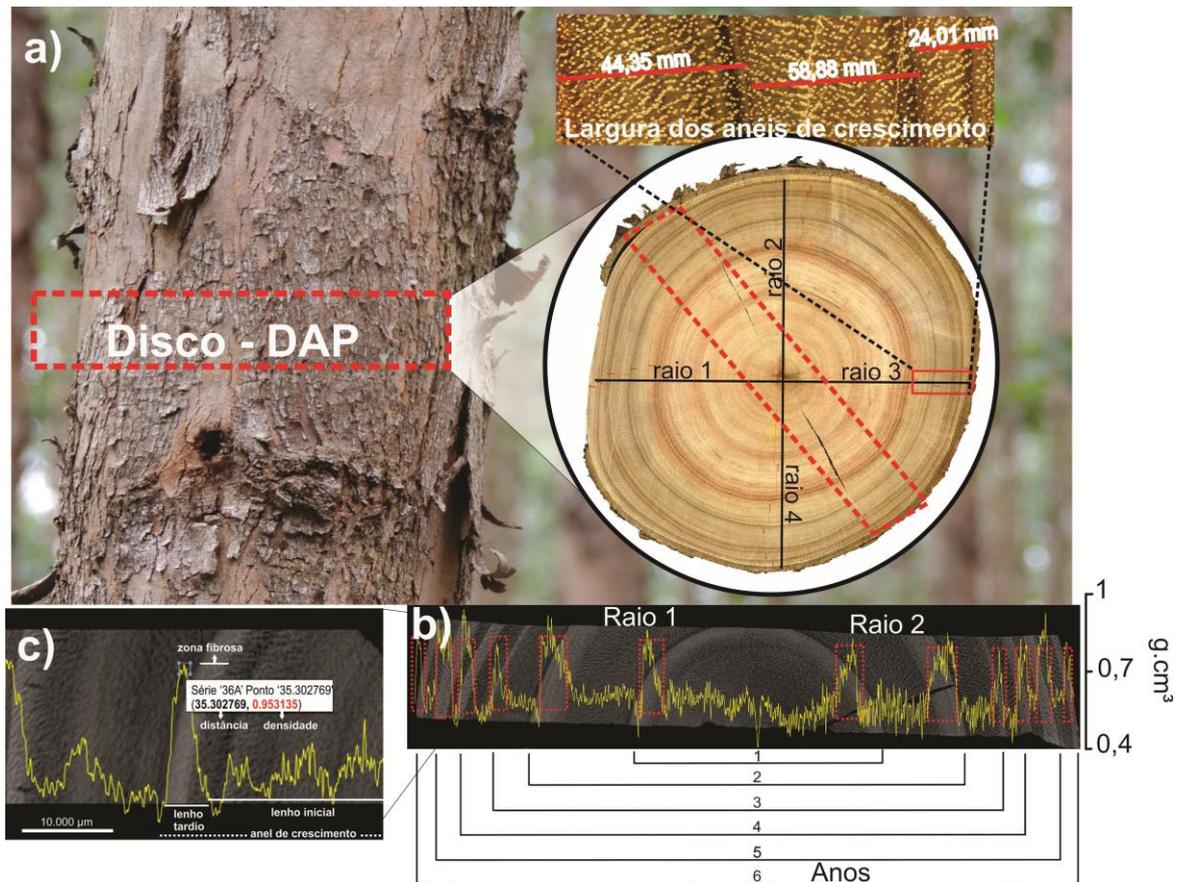


Figura 2. Amostragem e medição da largura dos anéis de crescimento da madeira e densidade aparente da madeira. a) A área pontilhada de cor vermelha representa o disco de madeira retirado no DAP (diâmetro a altura do peito, 1,30m do solo). Disco, com 5 cm de espessura, lixado com os quatro raios demonstrando a direção das quatro medições por anéis. Área pontilhada de cor vermelha representando a amostra retirada para análise de densidade aparente da madeira. Representação da medição da largura de anéis de crescimento. b) Perfil radial de densidade aparente da madeira (amarelo) de eucalipto Identificação do limite dos anéis de crescimento e dos lenhos inicial e tardio. As caixas pontilhadas em vermelho indicam o lenho tardio que delimita os anéis de crescimento que na parte inferior da imagem que indica os seis anos de crescimento. c) As informações descritas no quadro representam a distância (μm) do ponto dentro do quadro azul em relação a medula, também indica a densidade nesse ponto. Os tons de cinza mais escuros e mais claros correspondem respectivamente, a menores e maiores valores de densidade.

Seis larguras de anéis correspondente a cada ano de crescimento foram obtidas nos respectivos raios analisados, na metodologia de imagem digitalizadas (Figura 2) e por perfis de densitometria de raios X. Os valores dos anéis de crescimento foram exportados para uma planilha de excel e foi realizado ajuste da cronologia e validação da largura. Nesta fase, amostras com problemas de demarcação ou de mensuração dos anéis de crescimento foram identificadas.

A densidade aparente da madeira foi determinada pela técnica de densitometria de raios X em seções radiais de 2 cm de largura e 1 mm de

espessura, climatizadas à 20 ° C, 60% de umidade relativa, 24 h até atingirem 12% de umidade. O lenho e a escala de calibração de acetato de celulose foram inseridas no equipamento de raios X digital Faxitron modelo LX-60 previamente calibrado para a leitura automática (30 Kv, 19 segundos). Imagens digitais, em escala de cinza, foram geradas na montagem do perfil radial de densidade aparente, com valores radiais a cada 50 µm.

Os perfis foram analisados para demarcação dos lenhos inicial e tardio. As faixas com maior densidade (destaque em vermelho na Figura 2b), localizadas no final de cada anel, correspondem a zona fibrosa formada na estação seca. Essas faixas foram consideradas como a largura do lenho tardio e utilizada como limite para o anel seguinte (SHIMAMOTO et al., 2016).

Os pontos de leitura, a cada 50 µm, do perfil de densidade aparente foram convertidos em distância, identificaram a largura do anel e conseqüentemente dos lenhos inicial e tardio, em mm (Figura 2c). Assim, os valores de densidade foram separados por lenho em seus respectivos anos de formação. A precisão de leitura do perfil densitométrico permitiu melhor distinção dos lenhos, dessa forma, foram utilizados na representação da largura.

2.5 Análise dos dados

A análise de agrupamento foi aplicada na verificação detalhada da distribuição da precipitação e as estações seca e chuvosa em cada sítio. Dados mensais dos 6 anos foram utilizados para agrupar os meses com média semelhante, pela técnica de análise de agrupamentos. Utilizou-se o algoritmo hierárquico aglomerado de Ward (WARD, 1963) e como medida de dissimilaridade usando a distância euclidiana (EVERITT; DUNN 1991).

$$d_e = \left[\sum_{j=1}^n (P_{p,j} - P_{k,j})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde d_e é a distância euclidiana, e $P_{p,j}$ e $P_{k,j}$ são variáveis quantitativas j dos indivíduos p e k , respectivamente.

O algoritmo de Ward (1963) cria grupos, minimizando a dissimilaridade ou minimizando a soma total de quadrados dentro dos grupos, também conhecida como soma dos desvios quadrados. Os valores médios da precipitação mensal foram organizados em uma matriz $P_{n \times p}$, onde o elemento P_{ij} representa o valor da i -

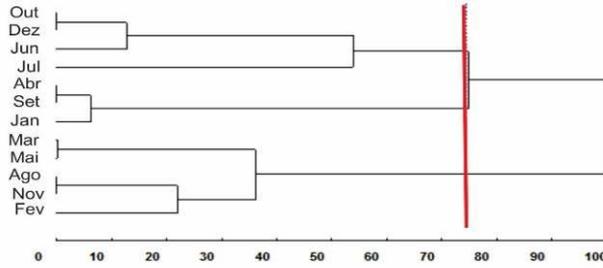
ésima variável (ano de crescimento) do j -ésimo indivíduo (mês). Assim, cada vetor de linha representava um ano de crescimento e cada vetor de coluna representava um mês. O corte foi determinado pelo critério global de $k = 1,25$ (MOJENA, 1977), a significância. As análises estatísticas foram realizadas com os aplicativos GENES (CRUZ, 2013). De acordo com os grupos foi possível distinguir os meses secos e chuvosos. Os meses foram plotados com a média correspondente ao volume de chuva acumulado de chuva mensal durante os 6 anos. Assim, os locais puderam ser classificados de acordo com o volume de chuva dos meses secos, em chuvosos, intermediários e secos.

Os dados de largura dos lenhos (%) foram apresentados de forma descritiva, tanto como cumulativo quanto por médias. O cálculo de proporção dos lenhos foi realizado pelo somatório das larguras dos 6 anos de crescimento individualmente para cada lenho. Os dados foram processados com a linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2020) usando estatísticas descritivas. Para ajuste das equações foi utilizada análise de regressão linear simples (pacote nlme e lme4). As larguras dos lenhos e total ao final dos 6 anos e aos 3 anos de crescimento foram utilizadas como variáveis independentes nas equações para estimativa da biomassa do caule ao final de rotação. A biomassa do caule foi calculada multiplicando os valores de volume de madeira verde pelos valores de densidade básica da madeira aos 6 anos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), para cada clone em cada sítio. As regressões foram realizadas nos sítios de menor (2) e maior (4) sazonalidade de chuvas, para os dois clones.

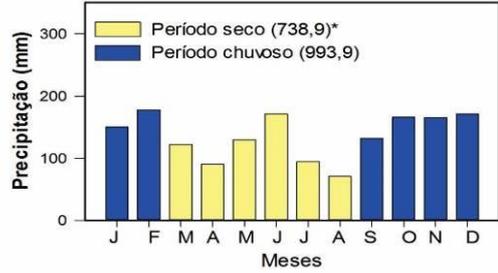
3. RESULTADOS

O agrupamento dos meses sugere que os sítios apresentam características particulares de regime de chuva, no volume e distribuição (Figura 3). O sítio 2 apresentou a menor sazonalidade e formou grupos com desconexão temporal, inviabilizando a formação de grupos contínuos de meses do período seco e chuvoso. Nesse caso, os períodos foram determinados levando em consideração o volume de chuvas e conexão cronológica entre os meses.

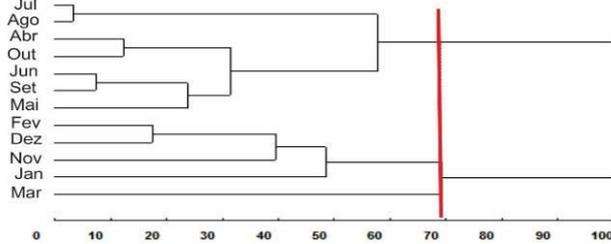
Sítio 2



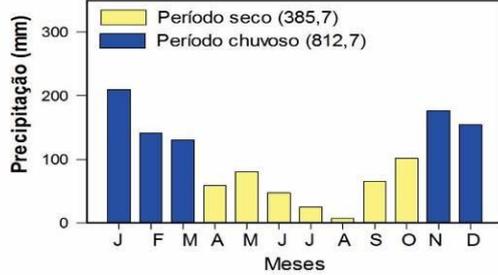
2 Arapoti - PR



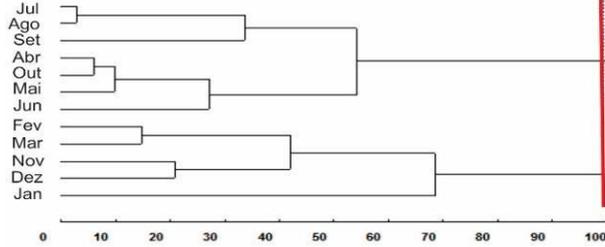
Sítio 13



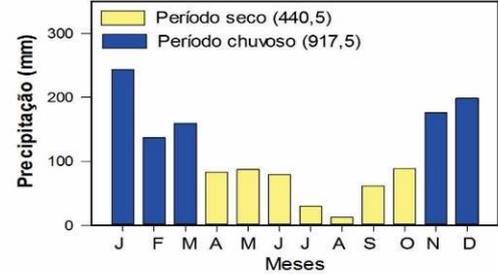
13 Três Lagoas - MS



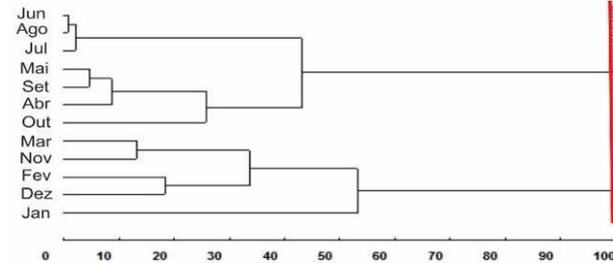
Sítio 20



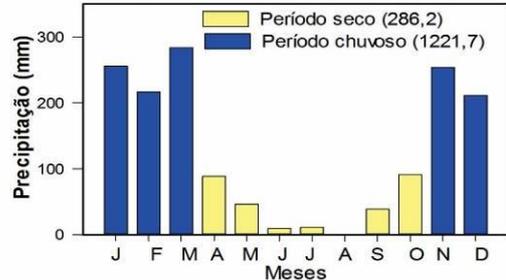
20 Mogi Guaçu - SP



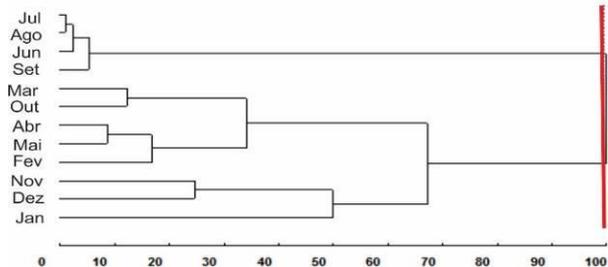
Sítio 7



7 Rio Verde - GO



Sítio 4



4 Belo Oriente - MG

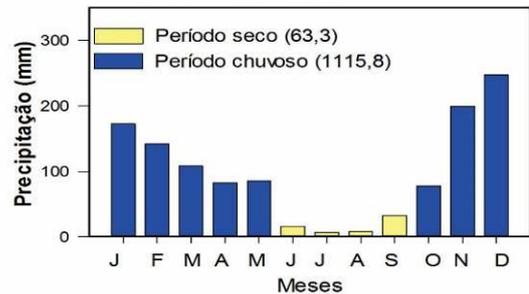


Figura 3. Agrupamento dos meses componentes dos períodos chuvoso e seco de cinco sítios em diferentes regiões do Brasil. *Média mensal acumulada de precipitação (mm). Linhas vermelhas indicam o ponto de corte pelo critério de Mojena, onde há diferença significativa e $k=1,25$.

No geral, o período seco variou de quatro a sete meses. O sítio 4 apresentou a maior amplitude entre os períodos chuvoso e seco, sendo o de maior sazonalidade. O sítio 7 apresentou a segunda maior amplitude, porém o volume de chuvas dos meses secos assemelha-se aos sítios 13 e 20.

Os sítios 7, 13 e 20 (sazonalidades intermediárias) têm o período seco de abril a outubro, os mais longos entre os sítios. O sítio 13 formou 3 grupos, 1 seco e 2 chuvosos. Esse fato ocorreu porque o mês de março, formador de 1 grupo possui menor precipitação que os demais chuvosos e se encontra no meio dos períodos, como intermediário.

As modificações causadas no crescimento da árvore pela idade são mais intensas no lenho inicial, formado na estação chuvosa, por isso apresentou maiores variações de largura que o lenho tardio (Figuras 4 e 5). O crescimento radial no DAP diminui com o aumento da idade das árvores de ambos os clones. A porcentagem mínima e máxima de lenho inicial para os dois clones é de 74,1 a 83,3% e de lenho tardio 16,5% a 25,9%, respectivamente.

Os clones apresentaram comportamentos similares de crescimento, com maiores incrementos nos anos iniciais. O crescimento radial em média nos primeiros 3 anos de cultivo é responsável por 80 a 85% do incremento em largura no clone G7 (Figura 4) e de 76 a 85% no clone Q8 (Figura 5). O sítio 4, com menor, porém intenso período de seca (sítio 4), proporcionou maior crescimento do lenho inicial do clone G7 (Figura 4). O clone Q8 teve seu maior crescimento do lenho inicial no sítio 7 (sítio com maior precipitação acumulada no período chuvoso) e menor crescimento no sítio 20 (Figura 5). O lenho tardio de ambos os clones foi menor no sítio 4. No geral, o clone G7 apresentou porcentagens de lenho inicial maiores que o Q8. O clone G7 teve seu maior crescimento no sítio 13 e o clone Q8 no sítio 20.

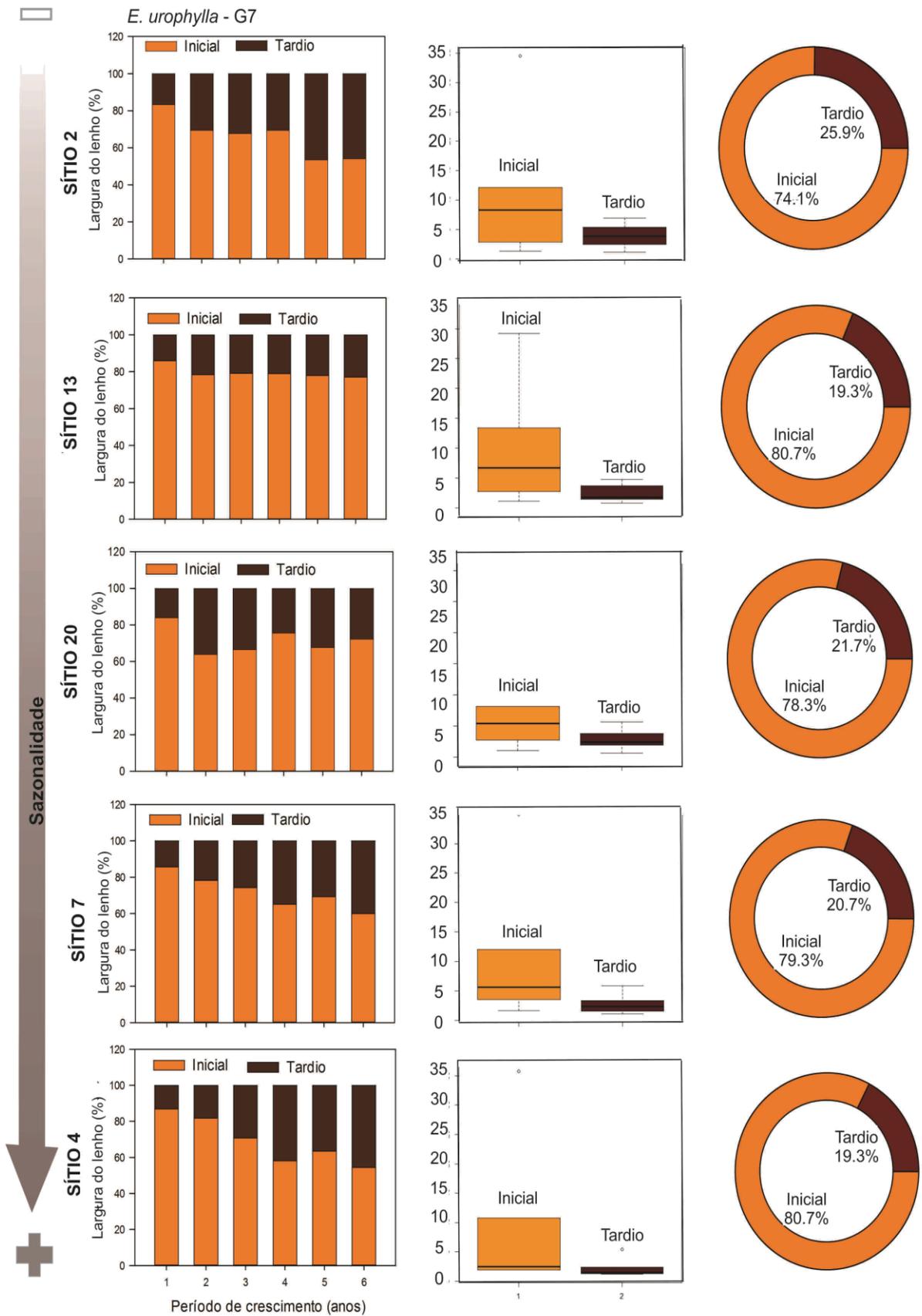


Figura 4. Formação do lenho do *E. urophylla* - G7 dividido em lenho inicial e tardio em cinco sítios. Gráfico de barras empilhadas (largura de lenhos em cada ano), Boxplot (distribuição geral dos valores do lenho inicial e tardio) e Donut Chart (% dos lenhos componentes da madeira).

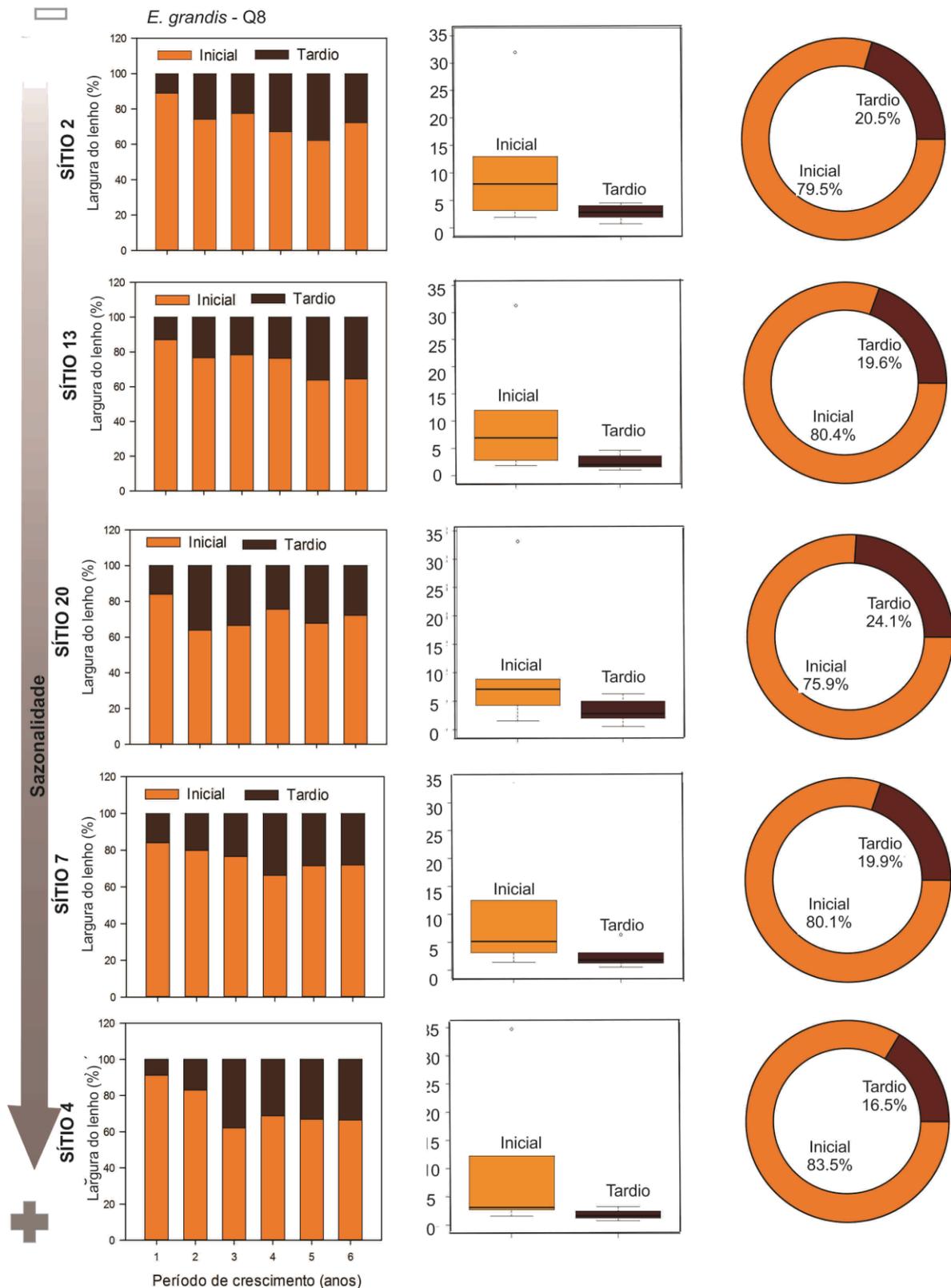


Figura 5. Formação do lenho do *E. grandis* - Q8 dividido em lenho inicial e tardio em cinco sítios. Gráfico de barras empilhadas (largura de lenhos em cada ano), Boxplot (distribuição geral dos valores do lenho inicial e tardio) e Donut Chart (% dos lenhos componentes da madeira).

Os sítios 2 (menor sazonalidade) e 20 (sazonalidade intermediária) proporcionaram maiores incrementos nas árvores, isso porque além do crescimento

do lenho inicial, apresentaram maior porcentagem de lenho tardio (23,2% e 22,9%), respectivamente para o clone G7 e Q8. Os sítios 7 e 13 (sazonalidades intermediárias) possibilitaram às árvores maior amplitude da largura do lenho inicial entre os anos de crescimento. Contudo, no sítio 4 (maior sazonalidade) foi mais intensa a diminuição da largura do lenho inicial com o aumento da idade, com efetiva redução de crescimento deste lenho já no terceiro ano. Os valores do lenho tardio foram mais homogêneos e de menor proporção para os clones em todos os sítios.

A densidade aparente da madeira das duas espécies variou de 0,560 a 0,630 g.cm⁻³ (Figura 6). O sítio 20 (sazonalidade intermediária) foi responsável pelos maiores valores de densidade aparente com média de 0,625 g.cm³, seguido dos sítios 4 e 7 (maior sazonalidade) para ambos os clones. Estes últimos, obtiveram a maior amplitude de densidade entre o lenho formado na estação chuvosa (lenho inicial) e na seca (lenho tardio).

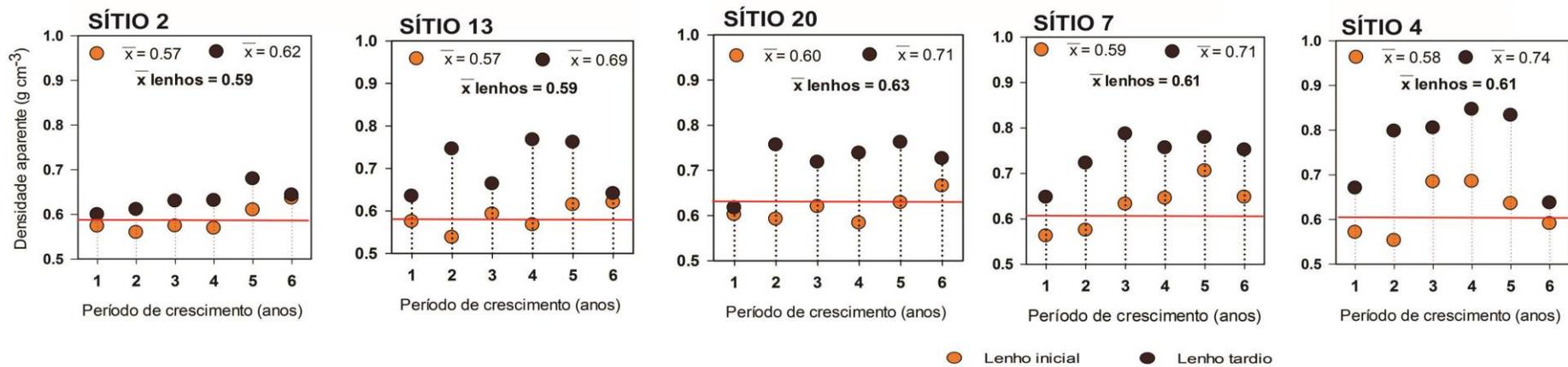
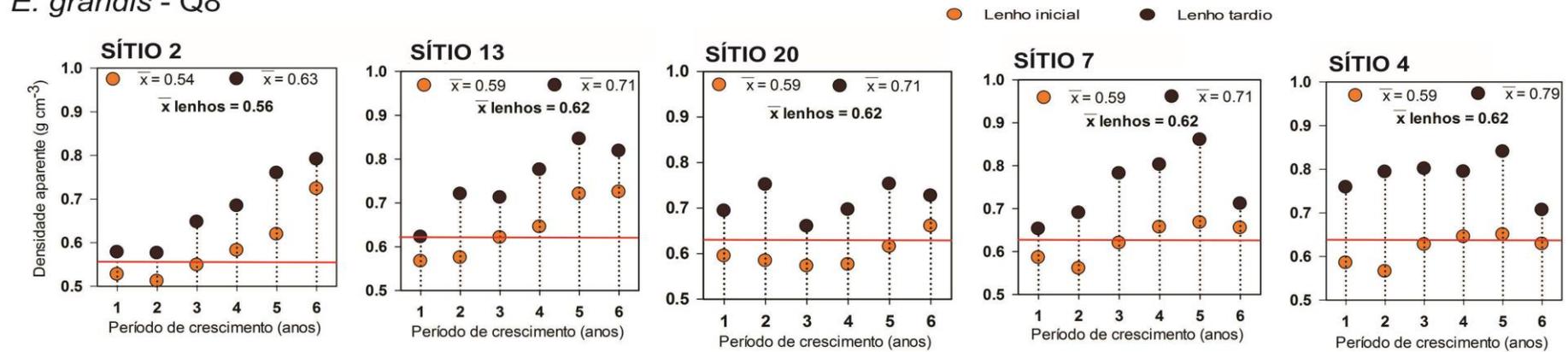
E. urophylla - G7*E. grandis* - Q8

Figura 7. Médias de densidade por lenhos nos dois clones de *Eucalyptus*, cultivados em cinco sítios de diferentes regiões do Brasil. Linha vermelha corresponde à média dos lenhos no sítio.

O sítio 2 (menor sazonalidade) produziu as madeiras de menores médias e variações de densidade entre os lenhos anuais de crescimento, tendo as menores variações nos anos 1 e 6. Entretanto, a diferença média entre os clones foi de $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$, sendo uma das maiores encontradas neste estudo.

O sítio 20 (sazonalidade intermediária) proporcionou a maior média de densidade do lenho inicial para o clone G7 ($0,60 \text{ g.cm}^{-3}$), tendo os maiores valores nos anos iniciais, comportamento também observado para o clone Q8. Árvores do sítio 4 (maior sazonalidade) foram as únicas a atingir média de densidade de $0,74 \text{ g.cm}^{-3}$ e a $0,79 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente, para o clone G7 e Q8. O 5º ano de crescimento do eucalipto produziu madeiras mais densas no lenho tardio.

O clone Q8 (plástico) apresenta uma tendência de aumento progressivo aritmético de densidade entre os anos nos sítios de menor sazonalidade (2 e 13). O clone G7 (tropical) tem variações de densidade descontínuas entre os anos para todos os sítios, embora no sítio 2 (menor sazonalidade) a densidade entre os lenhos seja estável, tanto entre os anos de crescimento, quanto entre o lenho inicial e tardio.

A regressão aos 6 anos entre larguras dos lenhos: inicial, tardio e total (inicial + tardio) com a biomassa do caule apresenta comportamentos distintos para os sítios 2 e 4 (Figura 7a). O sítio 2 (menor sazonalidade) com maior largura total no DAP, explicou $0,98$ da biomassa total do caule. Quando os lenhos dos clones foram testados separadamente, apenas o lenho inicial foi significativo com um r^2 de $0,86$, na idade de 6 anos. Para o sítio 4 (maior sazonalidade) não houveram regressões significativas, sendo o maior r^2 de $0,21$ para a largura total. A largura do lenho tardio explica aproximadamente 50% da biomassa total do caule aos 3 anos, no sítio 2.

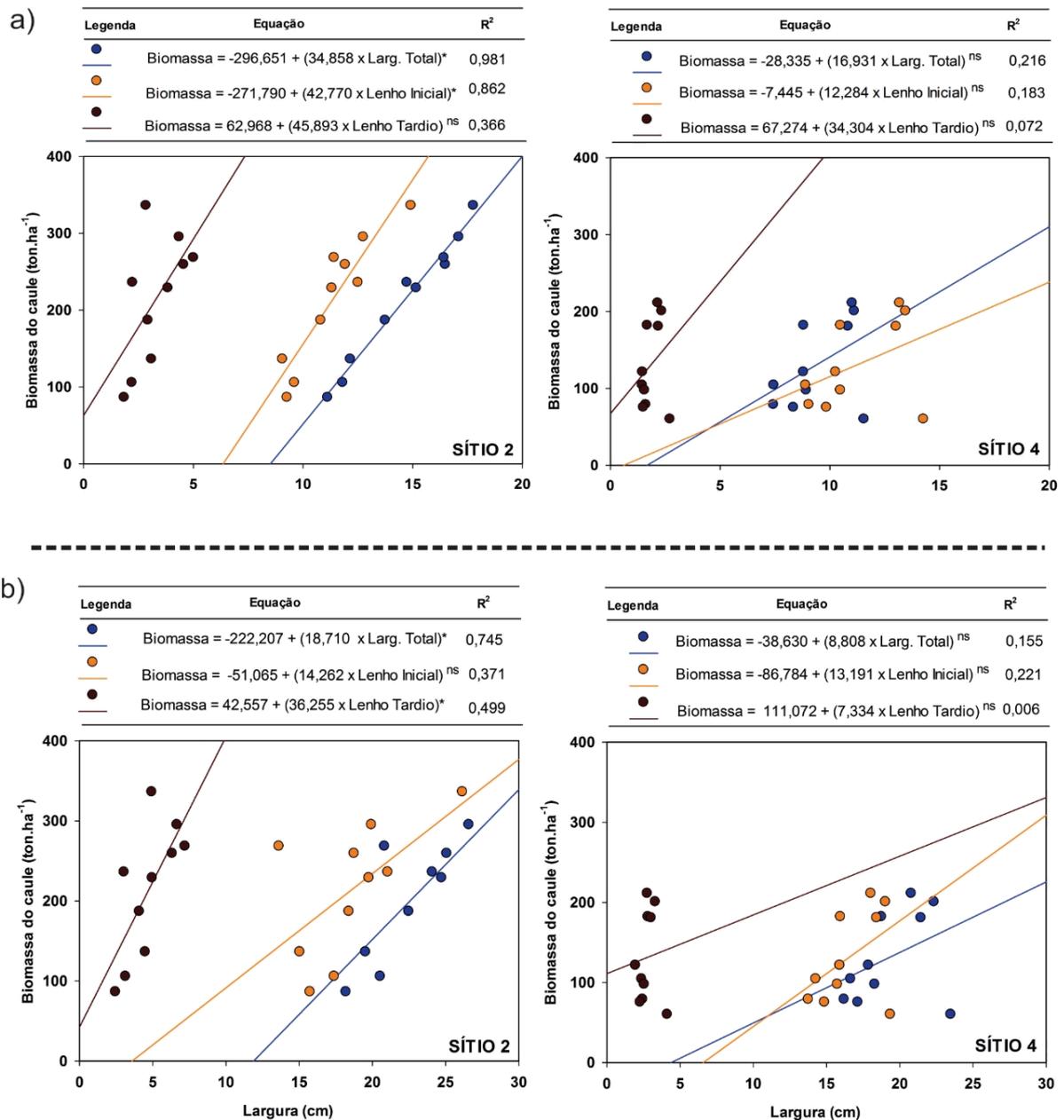


Figura 7. Regressões entre a biomassa do caule e a largura dos lenhos inicial, tardio e total (inicial + tardio) nos sítios 2 e 4 para *E. urophylla* - G7 e *E. grandis* - Q8 a) Regressão com valores médios da largura dos lenhos dos 6 anos de crescimento. b) Regressão com valores médios da largura dos lenho dos 3 anos de crescimento. Círculo azul representa a largura total do disco no DAP; círculo laranja: largura do lenho inicial; círculo marrom: largura do lenho tardio.

4. DISCUSSÃO

O lenho inicial é o lenho que cresce nas estações do ano de maior disponibilidade de recursos (CUNY; RATHGEBER, 2016), por isso foi o lenho que apresentou as maiores variações dos valores de crescimento radial (Figuras 4 e 5),

resultado da irregularidade de chuvas de um ano para outro. Essa maior amplitude entre o crescimento de um ano com chuvas regulares (LINGER et al., 2020) e outro não, condiciona fisiologicamente algumas árvores a se adaptarem a mudanças meteorológicas decorrentes das estações do ano, refletida nas características dos anéis de crescimento (RAMAGE et al., 2017) e afeta a anatomia e o tamanho das células (DE MICCO et al., 2016).

As maiores porcentagens de lenho tardio nos sítios (2 e 20) sugere influência das maiores médias de chuva no período seco (Figura 3), ou seja, com mais chuva houve maior crescimento do lenho tardio. Fatores como: ritmo de crescimento e status fisiológico da árvore também são importantes influenciadores na formação do lenho tardio (CHRISTINA et al., 2017), e provavelmente influenciaram na formação no sítios 2 e 20. Outro fato é que a maior porcentagem de lenho tardio, geralmente associada a alta densidade da madeira, apresenta herdabilidade de 0,25 a 0,90 (BUIJTENEN, 2004), tendência de maior média do clone Q8.

No sítio 4 (maior sazonalidade) houve menor crescimento do lenho tardio possivelmente em resposta ao período seco mais curto, porém intenso (4 meses com acumulado de 63,3 mm, Figura 4) e interação de outros fatores ambientais. O crescimento de árvores de *Eucalyptus grandis* pode ser diminuído ou até mesmo cessado sobre condições de seca extrema, com períodos sem chuvas superiores a 15 dias (CHAMBI-LEGOAS; CHAIX; TOMAZELLO-FILHO, 2019).

Há grande representatividade dos 3 primeiros anos no crescimento final da madeira em todos os sítios (Figuras 3, 4 e 7), fato atribuído ao arranque inicial do eucalipto, mesmo tendo crescimento radial influência da disponibilidade hídrica (BARTHOLOMÉ et al., 2013). A forte correlação entre crescimento radial inicial e final da madeira foi verificada em híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* e atingiram correlações de até 0,8 (BARTHOLOMÉ et al., 2013). O melhoramento genético que considera o arranque inicial e cumulativo no crescimento radial da madeira pode elevar a capacidade das árvores em produzir biomassa (BARTHOLOMÉ et al., 2013).

A plasticidade na dinâmica de crescimento primário e secundário em híbridos de eucalipto também tem sido abordada por uma perspectiva genética (BARTHOLOMÉ et al., 2013). Ou seja, há presença de regiões genômicas estáveis e instáveis responsáveis pela produção de biomassa, com interação genótipo x ambiente, dessa forma, não somente a densidade da madeira possui resposta hereditária (TAN et al., 2018) como também o crescimento. Os arranques iniciais do

crescimento, em resposta a disponibilidade de água, determinam posteriores desenvolvimentos na fase adulta e destacam a importância de considerar o crescimento como uma característica composta. Esses fatores melhoram o entendimento das bases genéticas e explicam os comportamentos dos clones G7 e Q8, mesmo descritos como menos produtivos (ARAUJO et al., 2019; PEREIRA et al., 2020).

Os clones G7 e Q8 são sensíveis ao clima (SCOLFORO et al., 2019), por isso as características desejáveis na produção do clone, como densidade, largura de lenhos e biomassa são influenciadas pela interação genótipo x ambiente. O clone G7 é considerado especialista, ou seja, melhorado geneticamente para clima tropical (BINKLEY et al., 2017). O clone Q8 é “plástico” com melhor adaptação ao ambiente em variada disponibilidade de recursos essenciais (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2011), por isso, a densidade média entre sítios de menor e maior sazonalidade foi de $0,62 \text{ g.cm}^{-3}$ (Figura 6). A relação entre as características dos clones com a condição ambiental influencia a densidade dos lenhos inicial e tardio, distintamente.

A densidade do lenho dos clones é influenciada pela distribuição de chuvas, variável no espaço temporal de um ano, embora tenha um limiar de incremento específico de cada clone (COSTA et al., 2020; ROCHA et al., 2020). Confirma-se assim, que diferentes materiais genéticos plantados nos mesmos sítios, apresentam especificidades em suas respostas quanto aos valores de densidade da madeira. Destaca-se o clone G7 no sítio 2 (Figura 6), que apresentou a menor variabilidade da densidade entre os anos e nos dois lenhos. Essa menor variação da densidade favorece aplicações industriais pela estabilidade da matéria prima para formação de produto mais homogêneo.

A tendência de incremento de densidade com o avançar da idade e entre os lenhos foi observada para o clone Q8 (Figura 6), com exceção no sítio 20. Além disso, nos anos iniciais, a alocação de carbono é direcionada para o crescimento do tronco, da copa e das raízes (ELOY et al., 2018), com menor investimento em lignificação da lamela média das células (CHEN et al., 2018).

Para este estudo, o clone Q8 apresentou menores variações em densidade, independente da sazonalidade do sítio. Em pesquisa com o clone Q8, Rocha et al., (2020) encontraram as menores variações quanto ao volume, densidade da madeira e biomassa do caule de ambientes úmido para o seco, embora houvessem perdas em volume e biomassa, e ganho em densidade da madeira de clones “plásticos”. Isso mostra que, apesar da classificação de “plástico”, esse clone possui adaptabilidade

e estabilidade menores, tornando-o menos produtivo nos sítios (ARAUJO et al., 2019; SCOLFORO et al., 2019, 2020)

A relação entre biomassa total do caule e largura total dos lenhos foi significativa no sítio de maior crescimento acumulado, sítio 2 (Figura 7), nos períodos de 6 e 3 anos. Isso pode ser explicado pelo incremento em biomassa e o diâmetro da árvore serem contínuos (FORRESTER, 2021), embora em menores proporções com o passar do tempo. Fato corroborado pela representatividade dos 3 anos e da contribuição do lenho tardio na biomassa do caule neste sítio. Assim, os clones G7 e Q8 têm a biomassa melhor relacionada ao crescimento radial do caule em sítios com melhores condições de crescimento. Essa relação é intensificada nos anos iniciais devido o arranque inicial de crescimento do eucalipto (WANG et al., 2019) tendo suas maiores taxas de crescimento concentradas nos 3 primeiros anos.

Compreender a contribuição de fatores genéticos e ambientais, bem como sua interação no crescimento e densidade da madeira é um quesito essencial para melhoramento genético das árvores para atender à crescente demanda por madeira. Por isso, as respostas iniciais de crescimento primário e secundário à disponibilidade de água no solo moldam parcialmente respostas posteriores com a interação ambiental, isso porque o crescimento é cumulativo e resulta da capacidade das árvores de produzir biomassa eficientemente.

5. CONCLUSÃO

O crescimento radial e densidade da madeira demonstram diferenças de valores entre os lenhos inicial e tardio, não detectáveis por meio de análise da média anual. Sítios com menor volume de chuvas no período seco tendem a aumentar a densidade do lenho tardio, e em casos extremos, diminuir o crescimento radial desse lenho.

A amplitude entre as densidades dos clones de eucalipto aumenta conforme a elevação sazonalidade dos sítios. Entretanto, com a ponderação da densidade da madeira obtida na densitometria de raios x, as médias anuais são similares. Nesse contexto, o estudo da sazonalidade é importante na predição temporal de avaliação para elucidar questões da interação genótipo x ambiente.

O uso da largura dos lenhos e do crescimento radial anual permite explicar a biomassa do caule para os dois clones avaliados. Entretanto, a explicação da

variável dependente foi melhor em sítio com melhor distribuição de chuvas no período seco.

6. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. – **NBR 11941: madeira – determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: 2003.

ALBUQUERQUE, A. R. et al. Comparative analysis of anatomy and micro-densitometry of the growth rings of hardwoods and conifers , with emphasis on dendrochronology. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 111, p. 595–610, 2016.

ARAUJO, M. J. et al. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 454, p. 117631, 2019.

BARTHOLOMÉ, J. et al. Plasticity of primary and secondary growth dynamics in Eucalyptus hybrids: A quantitative genetics and QTL mapping perspective. **BMC Plant Biology**, v. 13, n. 120, p. 1–14, 2013.

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

BOUSLIMI, B.; KOUBAA, A.; BERGERON, Y. Intra-ring variations and interrelationships for selected wood anatomical and physical properties of Thuja occidentalis L. **Forests**, v. 10, n. 339, p. 1–18, 2019.

BUIJTENEN, J. P. VAN. Tree breeding, practices. In: BURLEY, J. (Ed.). **Genetics and Improvement of wood properties**. 2004. p. 1466–1472.

CAMARGO, A. P. DE. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, 1962.

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, n. 1, p. 1–9, 2020.

CHAMBI-LEGOAS, R.; CHAIX, G.; TOMAZELLO-FILHO, M. Effects of potassium/sodium fertilization and throughfall exclusion on growth patterns of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden during extreme drought periods. **New Forests**, v. 51, n. 1, p. 21–40, 2019.

CHEN, W. J. et al. Structural Features of Alkaline Dioxane Lignin and Residual Lignin from *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, n. 3, p. 968–974, 2018.

CHRISTINA, M. et al. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509–519, 2017.

COCOZZA, C. et al. Monitoring intra-annual dynamics of wood formation with microcores and dendrometers in *Picea abies* at two different altitudes. **Tree Physiology**, v. 36, n. 7, p. 832–846, 2016.

- COSTA, S. E. DE L. 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. 117807, p. 1–12, 2020.
- CRUZ, C. D. GENES - a Software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**, v. 35, n. 3, p. 271–276, 2013.
- CUNY, H. E.; RATHGEBER, C. B. K. Xylogenesis: Coniferous trees of temperate forests are listening to the climate tale during the growing season but only remember the last words! **Plant Physiology**, v. 171, n. 1, p. 306–317, 2016.
- DE MICCO, V. et al. Intra-annual density fluctuations in tree rings: How, when, where, and why? **IAWA Journal**, v. 37, n. 2, p. 232–259, 2016.
- 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.
- ELLI, E. F. et al. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, 2019.
- ELOY, E. et al. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, v. 42, n. 2, p. e420214, 2018.
- FORRESTER, D. I. Does individual-tree biomass growth increase continuously with tree size? **Forest Ecology and Management**, v. 481, n. 118717, p. 1–10, 2021.
- FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Viçosa: Editora UFV: 2011.
- FRITTS, H. C. Relationships of ring widths in arid-site conifers to variations in monthly temperature and precipitation. **Ecological Monographs**, v. 44, n. 4, p. 411–440, 1974.
- GODOY-VEIGA, M. et al. Improved tree-ring visualization using autofluorescence. **Dendrochronologia**, v. 55, p. 33–42, 2019.
- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Brasília - DF, 2019
- LINGER, E. et al. Precipitation influences on the net primary productivity of a tropical seasonal rainforest in Southwest China: A 9-year case study. **Forest Ecology and Management**, v. 467, p. 118153, 2020.
- MOJENA, R. Hierarchical grouping method and stopping rules: an evaluation. **Computer Journal**, v. 20, n. 4, p. 359–363, 1977.
- MONTGOMER, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introdução à Análise de Regressão Linear**. Wiley: Wiley-Interscience. 641 p
- PEREIRA, W. J. et al. Patterns of DNA methylation changes in elite *Eucalyptus* clones across contrasting environments. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118319, 2020.
- RAMAGE, M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333–359, 2017.
- RAO, V. B. et al. An update on the rainfall characteristics of Brazil: Seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 291–302, 2016.

- RATHGEBER, C. B. K.; CUNY, H. E.; FONTI, P. Biological basis of tree-ring formation: A crash course. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 734, p. 1–7, 2016.
- ROCHA, S. M. G. et al. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020.
- ROSSI, S.; GIRARD, M. J.; MORIN, H. Lengthening of the duration of xylogenesis engenders disproportionate increases in xylem production. **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2261–2271, 2014.
- SCOLFORO, H. F. et al. Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: A modeling approach refined by environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 466, n. 118079, p. 1–12, 2020.
- SHIMAMOTO, C. Y. et al. Stem growth rhythms in trees of a tropical rainforest in Southern Brazil. **Trees - Structure and Function**, v. 30, n. 1, p. 99–111, 2016.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service**, 2014.
- TAN, B. et al. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid *Eucalyptus*. **Plant Science**, v. 267, p. 84–93, 2018.
- R TEAM, R. C. **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: 2019.
- TOMAZELLO, M. et al. Application of x-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139–149, 2008.
- WANG, Z. et al. Factors limiting the growth of eucalyptus and the characteristics of growth and water use under water and fertilizer management in the dry season of Leizhou Peninsula, China. **Agronomy**, v. 9, n. 10, 2019.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963.

CAPÍTULO II

Impacto da sazonalidade de chuvas na densidade e anatomia da madeira do lenho inicial e tardio de eucalipto no Brasil

RESUMO

A distribuição irregular das chuvas pode intensificar alterações no crescimento, na densidade e na anatomia da madeira de clones de eucaliptos mais sensíveis ao clima. O objetivo deste trabalho foi estudar o lenho inicial e tardio da madeira de clones de eucaliptos desenvolvidos em ambientes de diferentes sazonalidades climáticas, por meio das análises do crescimento radial, da anatomia e densidade da madeira. Cinco sítios no Brasil foram avaliados, distinguindo-os pela sazonalidade de chuva. Variáveis como largura dos anéis de crescimento, densidade da madeira, vasos (diâmetro tangencial, frequência, área ocupada, condutividade hidráulica potencial (KS) e vulnerabilidade à cavitação) e fibras (comprimento; largura e espessura da parede) foram analisadas nos lenhos inicial e tardio, previamente delimitados por densitometria de raios X, de *E. urophylla* (G7) e *E. grandis* (Q8). Os principais resultados indicam que (i) a menor sazonalidade de chuva induz a formação de madeiras de menor densidade, (ii) o lenho inicial tem 2 vezes mais condutividade hidráulica potencial que o lenho tardio, (iii) a frequência de vasos apresenta para ambos os clones, independente da sazonalidade, faixa até 25 vasos por mm². Para os dois clones, o sítio com maior sazonalidade de chuva promoveu menor vulnerabilidade a cavitação. O maior incremento nos anéis de crescimento mostrou ter efeito de diminuição na densidade da madeira de ambos os clones, sendo a espessura de parede das fibras (causa principal na densidade), a variável mais influenciada pelo clima. Além da espessura de parede das fibras, a densidade pode ser explicada pela largura do anel de crescimento e condutividade hidráulica potencial.

Palavras chave: condutividade hidráulica, anéis anuais de crescimento, *E. grandis*, *E. urophylla*.

Highlights

- A baixa sazonalidade induz a produção de madeiras mais vulneráveis à cavitação.

- O lenho inicial tem 2 vezes mais condutividade hidráulica potencial (K_s) que o lenho tardio.
- A K_s e a largura dos anéis de crescimento são as variáveis que melhor explicaram a densidade aparente da madeira.

1. INTRODUÇÃO

A relação entre as condições ecológicas e as características do xilema secundário tem sido foco de pesquisas (ALMEIDA, 2020; CÂMARA et al., 2020; ROCHA et al., 2020), principalmente ligadas às espécies de interesse comercial, a fim de compreender o comportamento de clones de eucalipto frente as variações ambientais (COSTA et al., 2020). No Brasil, a expansão de plantios do gênero *Eucalyptus* é em principal para atender a demanda da indústria de papel e celulose e suprir a demanda energética no Brasil (LENZ et al., 2019). Os sistemas de plantio florestal do Brasil são considerados um dos mais produtivos do mundo (MCMAHON; JACKSON, 2019). Entretanto, trata-se de um país de grande extensão territorial, com diferentes regimes hídricos, onde a disponibilidade sazonal de água pode afetar a formação da madeira (MARCATI et al., 2014), com impactos em sua qualidade, em novas fronteiras florestais com restrita disponibilidade de água.

Duas zonas distintas de crescimento existem dentro de um anel de crescimento da árvore: lenho inicial e lenho tardio. O primeiro, produzido em períodos chuvosos, é responsável por 40-80% do crescimento de um anel em largura por ano (DOMEK; GARTNER, 2002). A mudança nos padrões de crescimento do lenho inicial/tardio reflete, em parte, no aumento da heterogeneidade de propriedades da madeira como a densidade, em folhosas os vasos se destacam pela forte relação com a disponibilidade de água (PFAUTSCH et al., 2016; CÂMARA et al., 2020), pois tem a capacidade de se moldar de acordo as condições do ambiente, afim manutenção do transporte de água. O comportamento do mecanismo de transporte de água frente aos diferentes ambientes auxilia na identificação e seleção de variáveis explicativas de crescimento e densidade da madeira (OLSON et al., 2018), além de evidenciar interações dentre as variáveis envolvidas no transporte de água na árvore.

A interação de fatores como precipitação e temperatura, como as regiões úmidas e quentes favorece a variação nos diâmetros dos vasos das espécies tropicais, associado também ao crescimento em altura da planta e vulnerabilidade à

embolia. O diâmetro máximo do vaso em sítios secos e frios é menor que em ambientes mais úmidos e quentes (PFAUTSCH et al., 2016; OLSON et al., 2018). As estratégias de resistência à embolia de árvores de florestas tropicais são abordadas em sua maioria em sítios contrastantes (PINEDA-GARCÍA; PAZ; MEINZER, 2013; GLEASON et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2019). Entretanto, o contraste entre os períodos anuais de formação dos lenhos é pouco abordado.

Os lenhos possuem diferenças anatômicas relacionadas à condutividade hidráulica e vulnerabilidade à embolia (ZIMMERMANN, 1983), sendo que vasos maiores conduzem mais água, contudo são mais vulneráveis ao preenchimento por ar (HACKE et al., 2006; CRANG; LYONS-SOBASKI; WISE, 2018), em condições de seca. Com o aumento da seca, os vasos grandes, presentes no lenho inicial, podem perder sua funcionalidade precocemente, enquanto vasos menores do lenho tardio conduzem, às vezes por anos, estabelecendo desta forma uma associação entre diâmetro tangencial de vasos e vulnerabilidade. Essas associações podem ser intensificadas pela variação entre períodos secos e chuvosos, que é regida pela sazonalidade das chuvas e dita o crescimento cambial (RAHMAN et al., 2019).

Desse modo, estudar a madeira em períodos de maior (lenho inicial) e menor (lenho tardio) crescimento é uma forma de seccionar informações retidas ao longo dos anéis de crescimento para evidenciar as mudanças no diâmetro e frequência de vasos, que caracteriza cada lenho. Os objetivos foram: i) determinar o comportamento anatômico para o transporte de água do lenho inicial versus lenho tardio em *Eucalyptus* em sítios com distintas sazonalidades de chuva; ii) identificar as relações entre largura de anéis, densidade e anatomia de vaso iii) explicar a densidade da madeira por largura de anel de crescimento e anatomia da madeira de dois clones de eucaliptos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleção de sítios e clones do estudo

Plantios experimentais foram conduzidos em diferentes regiões do Brasil, com o objetivo de investigar as interações ambientais com a produção e ecofisiologia de eucalipto, idealizado pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), Brasil, e que integram o projeto Tolerância de Clones de Eucalipto a Estresses Hídricos, Térmicos e Bióticos (TECHS). Os cinco sítios avaliados neste estudo estão distribuídos em 5 estados brasileiros: 2 Arapotí (clima Cfb), 4 Belo Oriente (clima

Aw), 7 Rio Verde (clima Aw), 13 Três Lagoas (clima Aw) e 20 Mogi Guaçu (clima Cwa), com diferentes condições climáticas. As informações meteorológicas (precipitação e temperatura) de cada sítio foram plotadas mensalmente durante o período experimental de 2012 a 2018 (Figura 1). Os dados meteorológicos precipitação e temperatura do ar média, máxima e mínima foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os sítios foram ordenados por sazonalidade, cujos períodos seco e chuvoso (anuais) foram utilizados para entender a distribuição de chuva e as estações em cada sítio. A ordem dos sítios apresentados seguiu o critério de menor e maior sazonalidade das precipitações. A sazonalidade foi calculada pela diferença entre as médias de precipitação do período seco e chuvoso e ordenadas de forma crescente e os períodos seco e chuvoso determinados por análise de agrupamento.

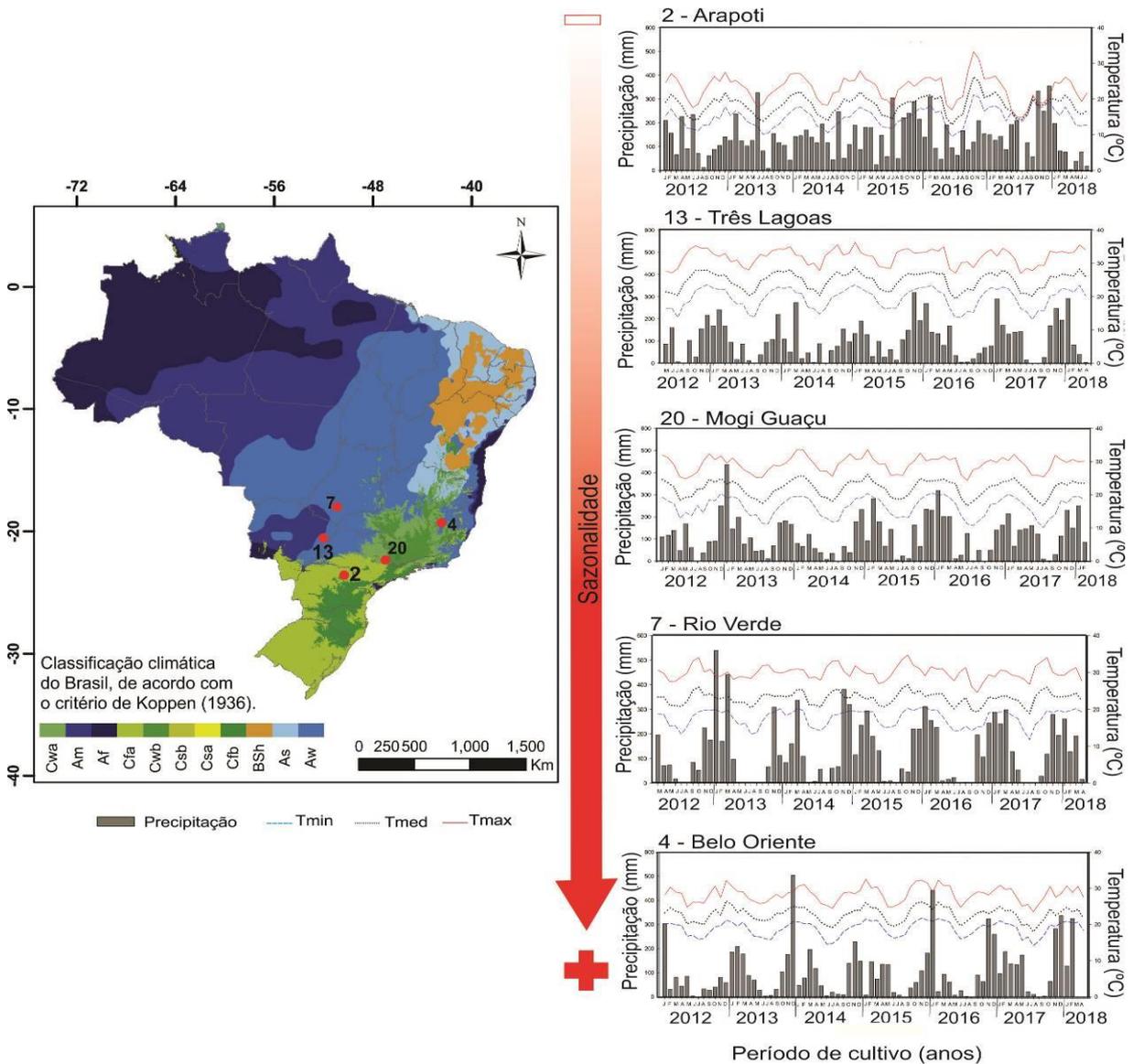


Figura 1. Localização geográfica dos sítios experimentais avaliados, com classificação climática e perfil mensal de precipitação e temperaturas (mínima,

média e máxima) dos sítios. Fontes: mapa (ALVARES et al., 2013), dados meteorológicos (INMET, 2018).

Dois materiais de *Eucalyptus* foram utilizados: *E. urophylla* (G7 - IPBH15, tropical, clima de origem Cwa) e *E. grandis* (Q8 - VER 361, “plástico”, clima de origem Af). Os materiais possuem aptidões climáticas diferenciadas (FLORES et al., 2016) e demonstram também a sensibilidade ao clima (SCOLFORO et al., 2019). Cada clone foi plantado em uma única parcela de 120 árvores por sítio (24 x 45 m) com 8 linhas x 15 árvores e espaçamento de 3 x 3 m. Onde, 80 árvores permanentes foram usadas em inventários semestrais e 40 e para amostragem destrutiva. Por meio do diâmetro na altura do peito (DAP) medido a 1,3 m do solo, foram definidas sete classes diamétricas, considerando a diferença entre o maior e menor diâmetro, dividido por 7. Das sete classes diamétricas, as cinco maiores classes foram utilizadas para esse estudo, com a seleção de árvores com troncos retos, sem sinais de doença.

2.2 Amostragem, largura e anatomia dos lenhos

Discos das cinco árvores foram retirados na altura do DAP, lixados (grão 50, 80, 120, 180, 220, 400, 800 e 1200) para preparo da superfície, identificação e marcação dos anéis de crescimento (Figura 2).



Figura 2. Esquema das etapas de preparo dos disco do DAP para a medição das larguras de anéis de crescimento em dois clones de eucalipto em 5 sítios no Brasil.

Os anéis anuais de crescimento foram demarcados por meio de análise macroscópica de varredura visual, com lupa de lente de aumento de 10x e sistema de iluminação independente. Quatro retas no sentido medula-casca foram traçadas. Os anéis de crescimento foram identificados e marcados com grafite nas quatro retas. Posteriormente, as amostras foram digitalizadas em scanner (Perfection v750 pro/600 dpi) e analisadas pelo software Axio Vision SE64 para obtenção da largura.

Os valores das larguras dos anéis de crescimento foram exportados para uma planilha de Excel e foi realizado o ajuste da cronologia e validação da largura. As zonas fibrosas do lenho foram utilizadas na delimitação dos anéis de crescimento, sendo determinadas visualmente e por picos de densidade (zonas fibrosas) obtidos na análise de densitometria de raios X.

A densidade aparente foi determinada pela técnica de densitometria de raios X, sendo o preparo das amostras realizado de acordo com as metodologias de Castro et al. (2017) e Surdi et al. (2014). Utilizou-se o equipamento de raios X digital Faxitron, modelo LX-60, com valores de densidade determinados a cada 50 μm de distância no sentido radial (Figura 3a).

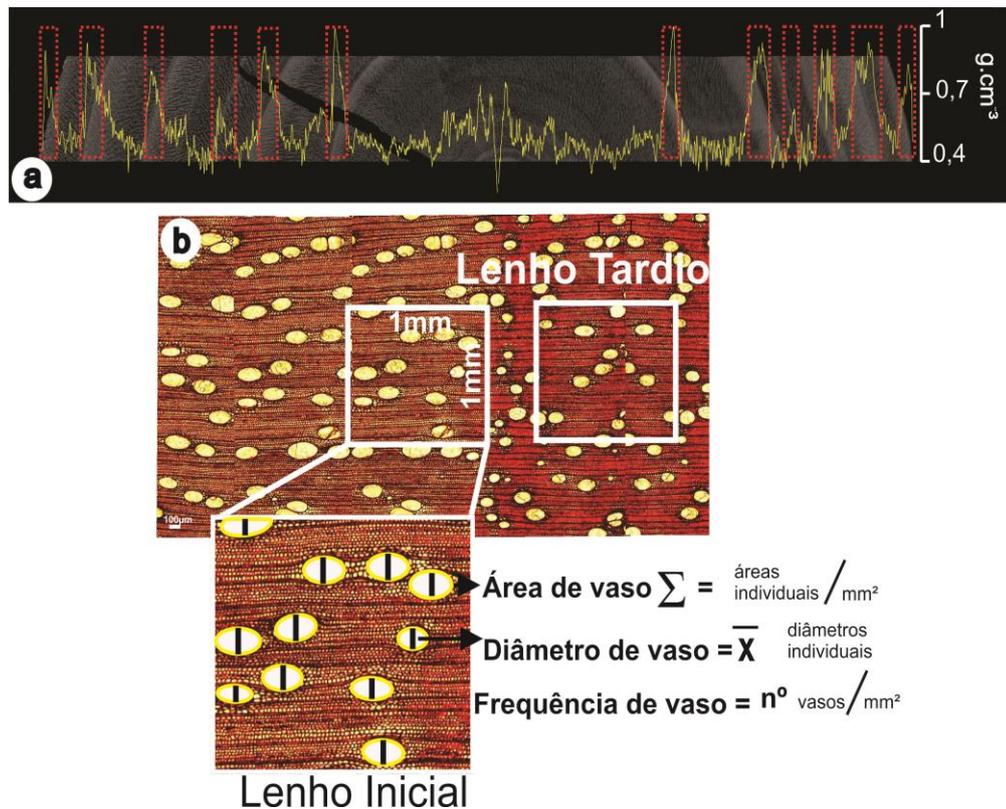


Figura 3. a) Perfil radial de densidade aparente da madeira (amarelo) de eucalipto. As caixas em vermelho indicam o lenho tardio que delimita os anéis de crescimento. b) Imagem microscópica da seção transversal da madeira de eucalipto com demarcação de lenhos e quadrantes para medições de vasos.

Os elementos de vasos foram analisados por meio da confecção de lâminas histológicas, obtidas de seções radiais do lenho a cada 1 cm com 20 μm de espessura, cortadas com o micrótomo de deslize (Leica SM2000R, Heidelberg, Alemanha) na face transversal, após fervura em água. As lâminas foram desidratadas em etanol e coradas com safranina. A porosidade do lenho foi observada em aumento de 5x em microscópio digital automatizado (Zeiss Axio Scope. A1), com câmera acoplada.

As lâminas histológicas sequenciais da medula à casca foram analisadas quanto a porosidade do lenho (observado em aumento de 20x em microscópio estereoscópio estéreo (SZT, BEL Photonics), assim, foram identificados demarcando os limites dos seis anéis de crescimento e imagens das lâminas histológicas foram obtidas por meio de software acoplado ao microscópio digital automatizado (Zeiss Axio Scope. A1) (Figura 3b).

A partir dos anos identificados, foram visualizados e diferenciados os lenhos inicial e tardio, com 2 repetições de medições por lenho ao ano, sendo 6 anos, totalizou-se 24 “quadrantes” por árvore. O número de vasos medidos variou de acordo com a sua frequência nos quadrantes de área fixa de 1mm^2 , feitos manualmente (Figura 3b). Medições de área, frequência e diâmetro de vasos foram realizadas. As áreas individuais dos vasos foram obtidas pela ferramenta Outline do software Axio Vision SE64 e a área ocupada por vasos determinada pelo somatório dos vasos individuais, medidos. O diâmetro tangencial de todos os elementos de vaso presentes na área fixa foram medidos perpendicularmente aos raios e a frequência de vasos determinada na mesma área fixa, pela contagem unitária.

Após a obtenção dos valores dos elementos de vasos, o índice de vulnerabilidade à cavitação foi determinado pela divisão de diâmetro pela frequência de vaso (CARLQUIST, 1977). A condutividade hidráulica potencial (K_s), foi determinada pela multiplicação de fração de vaso F (somatório das áreas em mm^2 multiplicado pela frequência de vasos) elevado a 1,5, por S (razão de área individual de vasos e frequência de vasos) elevado a 0,5 (ZANNE et al, 2010).

Parâmetros morfométricos de fibras (comprimento, largura e espessura de parede) foram realizadas a cada 1,5 cm, da medula a casca, devido à dificuldade de obtenção de amostras longitudinalmente a amostra anual e dentro dos lenhos inicial e tardio. A técnica de maceração foi utilizada para determinar a morfologia da fibra (DADSWELL, 1972). As amostras foram imersas na solução de 25 mL de ácido acético e peróxido de hidrogênio na proporção de 1:1 a 60°C por 24h (FRANKLIN,

1945). Com a solução decantada, as células suspensas foram lavadas com água destilada e coradas com safranina. Vinte e cinco medições para cada ano foram realizadas no microscópio Zeiss, modelo Axio Scope.A1 como software Axio Vision SE64, totalizando 150 leituras por árvore e 750 para cada clone e sítio (5 árvores de repetição).

2.3 Análise de dados

Dados mensais de precipitação por sítio, do período de 6 anos, foram utilizados para agrupar os meses com média semelhante pela técnica de análise de agrupamentos. Utilizou-se o algoritmo hierárquico aglomerado de Ward (WARD, 1963) e como medida de dissimilaridade usando a distância euclidiana (EVERITT; DUNN 1991). Assim, os locais puderam ser ranqueados e classificados de acordo com o volume de chuva, em chuvosos, intermediários e secos.

O estudo de vasos e densidade da madeira foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com fatorial 5 x 2, combinando os 5 sítios e os 2 lenhos (inicial e tardio) com cinco árvores (repetições). Os dados de condutividade hidráulica, diâmetro e densidade de lenhos foram transformados por log. (Steel, Torrie & Dickey; 1980). Os dados foram submetidos à análise de variância conjunta - ANOVA (efeitos fixos: sítios e lenhos) e para os efeitos significativos, os desdobramentos foram calculados e as médias de sítios comparadas pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) e dos lenhos teste F ($p \leq 0,05$). A análise conjunta foi realizada em função da não repetição de cada sítio. Os desdobramentos, resultados de interação significativa, foram plotados em tabela e análises individuais dos efeitos não significativos da interação foram plotadas separadamente para os fatores (sítio e lenho).

As fibras foram analisadas por delineamento inteiramente casualizado, tendo os sítios como fonte de variação. A comparação dos clones foi realizada pelo teste de médias de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Por clone e lenho (inicial e tardio), a correlação de Pearson (α 5%, $n=25$) foi aplicada aos dados com distribuição normal, e para a variável com distribuição não normal foi aplicada a correlação de Spearman. As variáveis de área ocupada pelos vasos (mm^2) e frequência ($n^{\circ}.\text{mm}^2$) foram expressas gráfica e descritivamente a fim de entender a interação delas nos sítios, por clone avaliado.

A análise de variáveis canônicas foi utilizada para estudar a inter-relação entre os sítios e os dados dos elementos de vasos, condutividade hidráulica, área, frequência e vulnerabilidade, utilizando o software Rbio (BHERING, 2017). Essas variáveis foram selecionadas por relacionar-se a condução de água nas plantas.

A fim de obter valores de influência direta e indireta das variáveis relacionadas com a densidade da madeira foi realizada a análise de trilha, com correlação de Pearson (α 5%). Foi realizado um diagnóstico de multicolinearidade (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2001). A análise de trilha considerou a densidade da madeira como a variável endógena e as demais como exógenas (preditores). Para tal, foram utilizadas as médias por árvore de cada variável, sem haver distinção de lenho inicial e tardio, assim, gerando 5 amostras de cada sítio, totalizando 25 amostras por clone. O software utilizado foi o Genes (CRUZ, 2016).

3. RESULTADOS

A interação sítios x lenhos foi maior em características da madeira do clone G7, onde apenas o diâmetro de vasos não apresentou valor significativo e, para o clone Q8 apenas a densidade da madeira foi significativa (Tabela 1).

Tabela 1. Quadrados médios da ANOVA conjunta para a madeira de dois clones de *Eucalyptus*.

Variáveis	Sítios	Lenhos	Interação	CV (%)
<i>E. urophylla</i> - G7				
Área ocupada por vasos (mm ²)	0,00743	0,04332	0,00178**	8,25
Diâmetro de vaso (μ m)	2341,1	3270	359,9 ^{ns}	7,04
Frequência de vasos (n ^o .mm ²)	39,491	12,954	8,338**	7,34
Condutividade hidráulica	0,03998	0,43745	0,02665**	19,13
Vulnerabilidade	154,01	27,54	97,94**	13,83
Densidade do lenho (g.cm ⁻³)	0,9425	2,9415	0,2666**	18,12
<i>E. grandis</i> - Q8				
Área ocupada por vasos (mm ²)	0,00427	0,02906	0,00143 ^{ns}	9,38
Diâmetro de vaso (μ m)	1097,8	1667,3	251,7 ^{ns}	5,6
Frequência de vasos (n ^o .mm ²)	38,746	7,450	2,767 ^{ns}	11,61
Condutividade hidráulica	0,3292	2,3548	0,1110 ^{ns}	16,96
Vulnerabilidade	38,499	0,359	3,599 ^{ns}	17,37
Densidade do lenho (g.cm ⁻³)	0,0206	0,0318	0,0102**	11,37

ns: não significativo ($p > 0,05$); ** significativo (5% pelo teste F). CV: coeficiente de variação

Para o clone tropical (G7), as maiores áreas ocupadas por vasos foram dos sítios com menor (2) e intermediária (20) sazonalidade (Tabela 2), sendo o sítio de menor sazonalidade com maior frequência de vasos. O comportamento da condutividade hidráulica do clone G7 foi diferente para os lenhos em relação aos sítios. O sítio (20) intermediário apresentou maior condutividade no lenho inicial, já as maiores médias no lenho tardio foram dos sítios de menor (2) e intermediária (7) sazonalidade.

O sítio de menor sazonalidade apresentou a maior vulnerabilidade à cavitação em ambos os lenhos. A menor vulnerabilidade à cavitação foi encontrada para o lenho tardio no sítio de maior sazonalidade, sendo 5 vezes menor que o sítio de menor sazonalidade. A densidade da madeira no lenho inicial foi maior nos sítios de intermediária e maior sazonalidade (20, 7 e 4) e no lenho tardio apenas os sítios 7 e 4 foram os de maior densidade. O clone Q8 apresentou os menores valores de densidade da madeira para ambos os lenhos, no sítio com menor sazonalidade. O lenho tardio dos sítios mais contrastantes na sazonalidade de chuva, 2 e 4, foram os que apresentaram as menores densidades, em média 0,64 g.cm⁻³.

Tabela 2. Desdobramento das variáveis anatômicas da interação sítio x lenho da madeira de dois clones de eucalipto em cinco sítios do Brasil com diferentes sazonalidades de chuvas.

Variável	Sítio	Lenho		F
		Inicial	Tardio	
<i>E. urophylla - G7</i>				
Área ocupada por vasos (mm²)	02 – Arapoti	0,1636 aA	0,1177 bA	4,33*
	13 – Três Lagoas	0,1379 aB	0,0778 bC	
	20 – Mogi Guaçu	0,1698 aA	0,0891 bC	
	07 – Rio Verde	0,1508 aB	0,0993 bB	
	04 – Belo Oriente	0,1385 aB	0,0824 bC	
	Média	0,1521	0,0932	
Frequência de vasos (nº.mm⁻²)	02 – Arapoti	11 aB	9 bC	2,84*
	13 – Três Lagoas	12 aA	11 bB	
	20 – Mogi Guaçu	12 aA	10 bB	
	07 – Rio Verde	13 aA	13 aA	
	04 – Belo Oriente	12 aA	12 aA	
	Média	12	11	
Condutividade hidráulica	02 – Arapoti	0,3092 aB	0,1402 bA	4,47*
	13 – Três Lagoas	0,2508 aC	0,0792 bB	
	20 – Mogi Guaçu	0,3676 aA	0,0893 bB	
	07 – Rio Verde	0,3035 aB	0,1385 bA	
	04 – Belo Oriente	0,2452 aC	0,0938 bB	
	Média	0,2952	0,1082	

Vulnerabilidade à cavitação	02 – Arapoti	10,54 aA	11,74 aA	18,18
	13 – Três Lagoas	8,15 aB	7,52 aB	*
	20 – Mogi Guaçu	9,47 aA	8,87 aB	
	07 – Rio Verde	8,27 aB	7,58 aB	
	04 – Belo Oriente	9,24 aA	2,33 bC	
	Média	9,13	7,61	
Densidade de lenho (g.cm⁻³)	02 – Arapoti	0,596bB	0,635aC	
	13 – Três Lagoas	0,585bB	0,707aB	2,97*
	20 – Mogi Guaçu	0,612bA	0,708aB	
	07 – Rio Verde	0,632bA	0,741aA	
	04 – Belo Oriente	0,625bA	0,789aA	
	Média	0,610	0,716	
<i>E. grandis</i> - Q8				
Densidade de lenho (g.cm⁻³)	02 – Arapoti	0,586bB	0,644aB	
	13 – Três Lagoas	0,643bA	0,740aA	
	20 – Mogi Guaçu	0,605bB	0,708aA	5,81*
	07 – Rio Verde	0,626bA	0,757aA	
	04 – Belo Oriente	0,629aA	0,628aB	
	Média	0,618	0,695	

Médias seguidas da mesma letra, minúscula na linha (lenhos) e maiúscula na coluna (sítios), para cada variável, não diferem pelo teste F e pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$), respectivamente. A seta em vermelho indica o sentido dos sítios da menor “-” para a maior “+” sazonalidade na chuva.

O sítio 2, de menor sazonalidade da chuva, apresentou maior diâmetro de vasos para o clone G7, cerca de 15% maior que o sítio 4, de maior sazonalidade, que apresentou uma das menores médias de diâmetro de vasos (Figura 5). O sítio 13, com intermediária sazonalidade, apresentou a menor média. O diâmetro do vaso foi aproximadamente 15% maior no lenho inicial quando comparado com o lenho tardio para o G7.

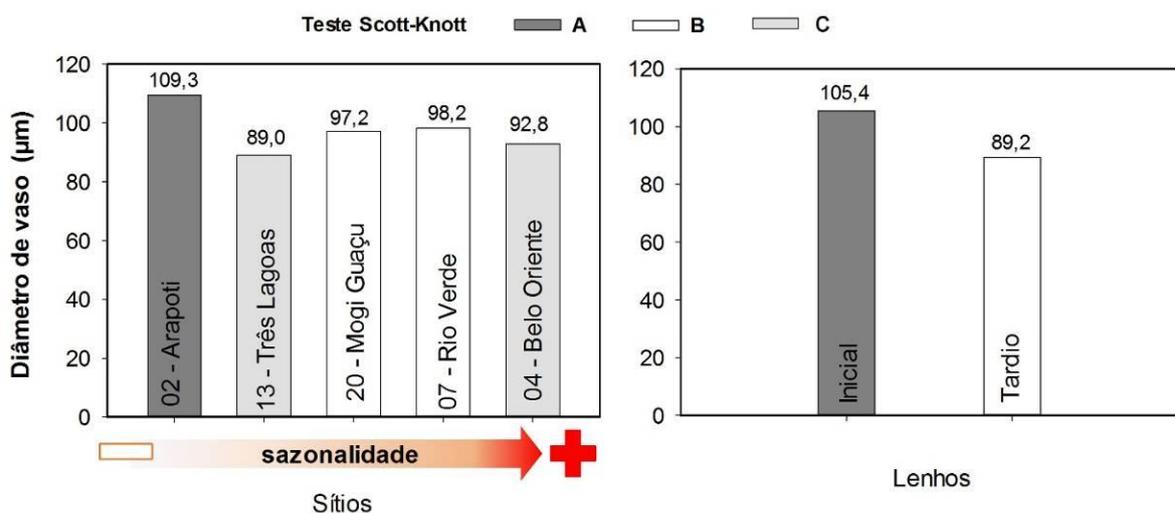


Figura 5. Teste de médias das variáveis que não apresentaram interação sítio x lenho da madeira do *E. urophylla* - G7 em cinco sítios do Brasil com diferentes sazonalidades de chuvas. Onde, as médias seguidas de cores diferentes se diferem pelo teste de Scott-Knott para os sítios e F para os lenhos, respectivamente ($p < 0,05$).

As maiores médias de diâmetro de vaso e área de vaso na madeira do clone Q8 foram provenientes do sítio 2 (Figura 6), semelhante ao clone G7. O sítio 4, com maior sazonalidade, apresentou o menor diâmetro de vasos e com vasos mais frequentes. Dentre as variáveis analisadas, o diâmetro de vasos foi o que formou mais grupos de médias (3 para ambos clones, Figura 5 e 6). Entretanto, para o clone Q8, os maiores diâmetros foram do sítio de menor sazonalidade, diâmetros médios nos sítios intermediários e menores diâmetros no sítio 4, de maior sazonalidade. A condutividade hidráulica foi maior nos sítios 2 e 4, não possuindo relação com a sazonalidade para o clone Q8 e o sítio 4 foi o menos vulnerável a cavitação.

O lenho inicial teve aproximadamente 2 vezes mais condução de água quando comparado ao lenho tardio. A frequência dos vasos e vulnerabilidade a cavitação não se diferem entre os lenhos do clone Q8, mas diferenças na área de vaso, diâmetro de vasos e condutividade hidráulica foram observadas. A área de vaso do lenho inicial é 28% maior que a área de vaso do lenho tardio e para o diâmetro de vaso essa diferença entre lenhos é de 11%. A condutividade hidráulica é a variável de maior amplitude entre os lenhos e as de menor, são frequência de vasos e vulnerabilidade à cavitação.

As correlações entre largura dos lenhos e densidade da madeira foram negativas e mais fortes no lenho inicial da madeira de ambos os clones (Figura 7). No lenho inicial, o diâmetro apresentou as maiores correlações com a vulnerabilidade do vaso a cavitação (0,81 a 0,87). A relação significativa de diâmetro de vaso com densidade da madeira (-0,20), só ocorreu no lenho tardio do clone G7 (Figura 7c). As correlações significativas com a densidade da madeira com a condutividade hidráulica e área de vaso, foram negativas e presentes em todas as combinações.

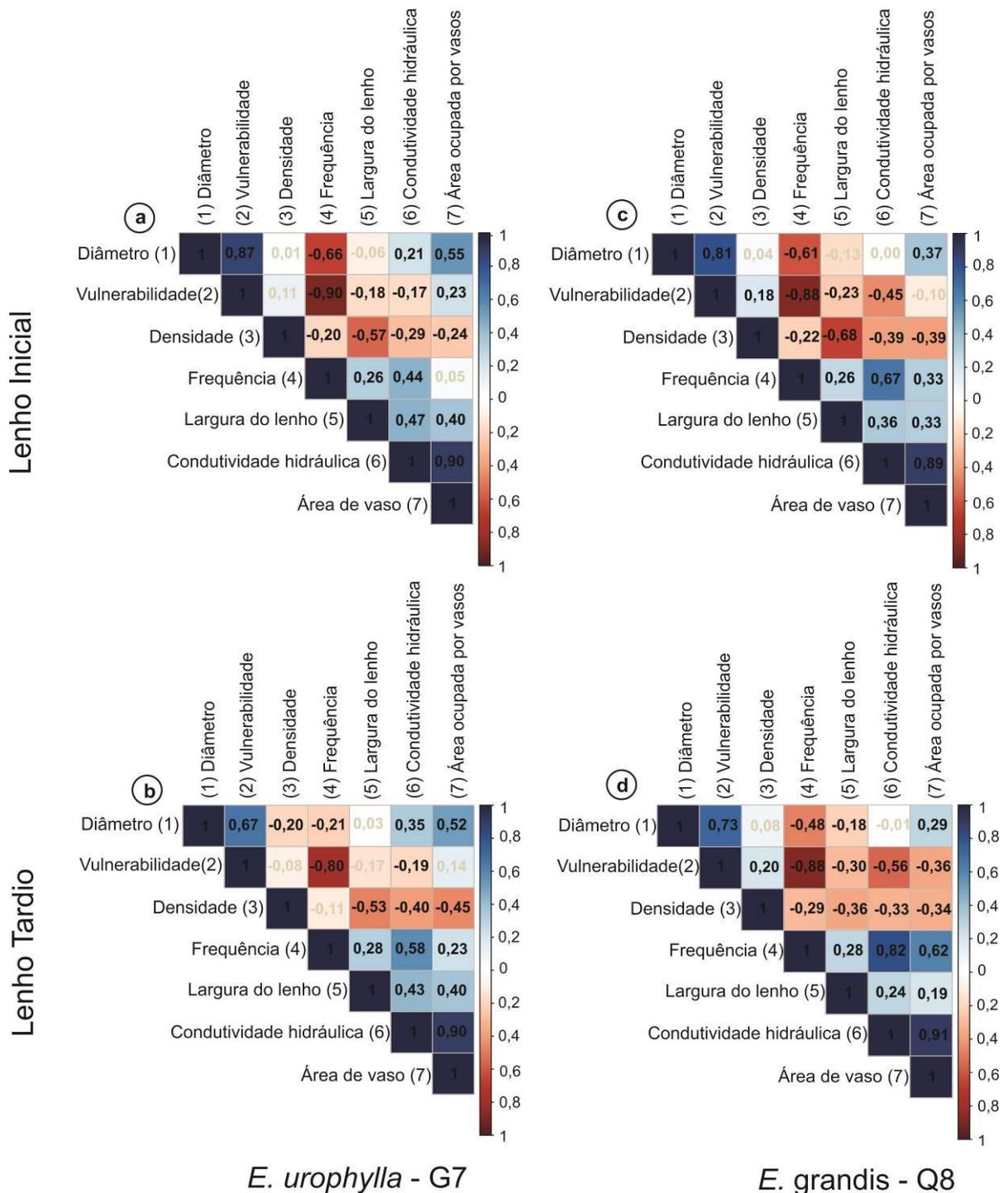


Figura 7. Correlações entre variáveis da madeira de *E. urophylla* – G7 e *E. grandis*, lenho inicial (a; b) e lenho tardio (c; d), aos 6 anos de idade. A correlação de Pearson foi aplicada aos dados com distribuição normal: 1 (diâmetro de vaso), 2 (vulnerabilidade a cavitação), 3 (densidade aparente do lenho), 4 (frequência de vasos), 6 (condutividade hidráulica), 7 (área ocupada por vasos). Para a variável com distribuição não normal foi aplicada a correlação de Spearman: 5 (largura do lenho). Correlações significativas ($\alpha= 0.05$) são indicadas em cor preta, não significativas em cinza.

A área ocupada por vasos (eixo x) e frequência (eixo y) foram analisadas descritivamente para entender o comportamento dos clones nos sítios (Figura 8)

para determinar uma faixa de tamanho de vasos sobre gradiente de sazonalidade de chuvas. Os vasos distribuíram-se nas faixas de 10 a 15 vasos/mm² para os dois clones. O clone G7 tem sua segunda maior faixa de frequência em 5 a 10 vasos/mm². O clone Q8 tem a distribuição de vasos mais dividida entre as faixas 5 a 10 e 15 a 20 vasos/mm². A área delimitada em vermelho mostra que em sua maioria os vasos mais frequentes compõe a faixa 0,1 a 0,2 mm².

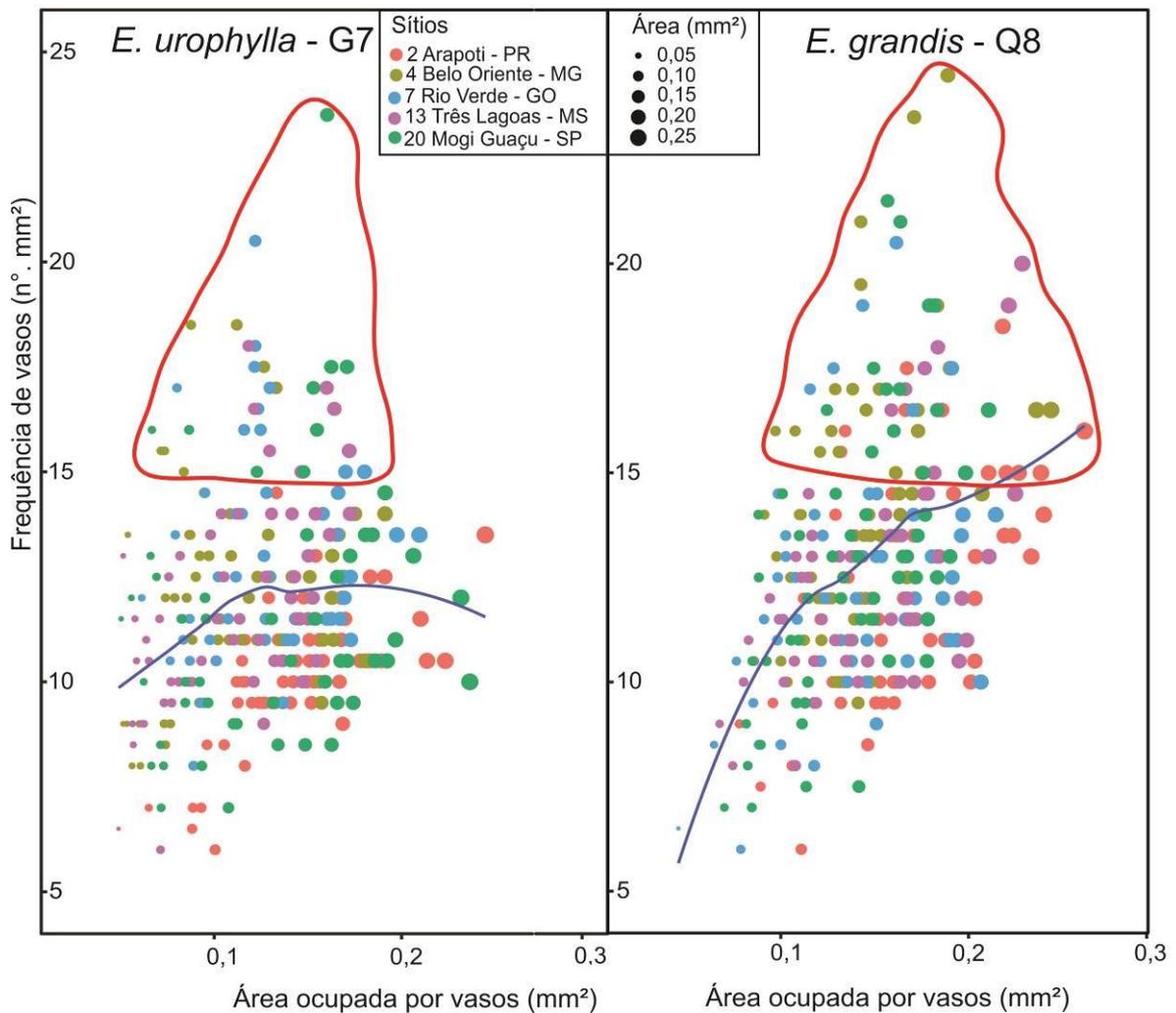


Figura 8. Comportamento de frequência e área ocupada por vasos amostrados nos lenhos inicial e tardio de dois clones de eucalipto G7 – *E. urophylla* e Q8 – *E. grandis*, aos 6 anos de idade, em cinco sítios contrastantes. A linha da cor vermelha delimita a área de frequência de vasos com distribuição igual ou superior a 15 vasos por mm². A linha em azul mostra a tendência de distribuição dos dados.

A linha de tendência de comportamento, em azul, mostra a distinção entre os clones. Entretanto, ambos os clones tem as maiores frequências na faixa 0,1 a 0,2 mm². Os clones apresentaram crescimento de que em diâmetro gradativo,

acentuado, conforme aumenta a área individual dos vasos há elevação na frequência que vai de 0 até 0,1 mm² e diminui a partir desse ponto.

O sítio 2, de menor sazonalidade de chuvas, possui o comportamento mais distinto entre os clones, sendo no G7 caracterizado pela frequência inferior a 15 vasos/mm² e o Q8 com maiores áreas e maiores frequências (destaque em vermelho). Em outras palavras, apenas o clone Q8 apresentou vasos mais numerosos que 15 (dentro do destaque em vermelho) e maiores no sítio 2.

A análise de variáveis canônicas foi utilizada para verificar a contribuição de cada variável na diferença de sazonalidade entre os sítios (Figura 9) e cada variável canônica é uma combinação linear das variáveis usadas. Para representar os escores em um gráfico bidimensional, a porcentagem de variância acumulada nas duas primeiras variáveis canônicas deve ser maior que 80% (MINGOTI, 2007). Neste trabalho, as variâncias acumuladas nas duas primeiras variáveis canônicas foram de 93,3 % (G7) e 90,3 (Q8).

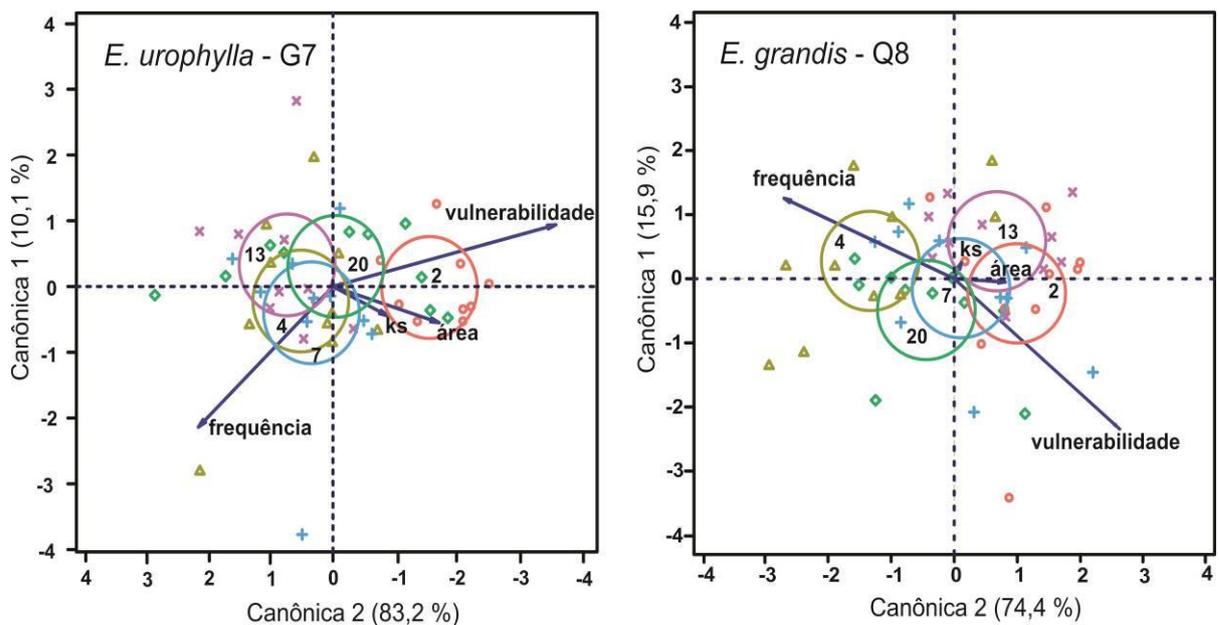


Figura 9. Biplot da contribuição de cada variável (Área = área ocupada por vasos; frequência = frequência de vasos; Ks = Condutividade hidráulica potencial e Vulnerabilidade = vulnerabilidade à cavitação) para a diferença entre os sítios de dois clones de *Eucalyptus*. O número correspondente ao sítio é acompanhado pelas letras "i" lenho inicial e "t" lenho tardio. Os círculos correspondem ao autovetores, associados aos sítios e as setas (vetores) indicam as cargas de resposta nas primeiras duas canônicas. As cruzes, círculos e triângulos correspondem à dispersão dos lenhos.

Os autovetores plotados na Figura 9 mostram que a vulnerabilidade dos vasos à cavitação foi a variável que mais contribuiu para a diferença entre o sítio 2 dos demais sítios (4, 7, 13 e 20) para o G7. O sítio 4 apresenta afinidade em

produzir madeiras com vasos mais frequentes, característica mais destacada no clone Q8, sendo não similar aos sítios 2 e 13. Árvores dos sítios 2 e 13 são propensas a produção de maior área de vaso/mm² e condutividade hidráulica para o clone Q8, para o clone G7, árvores dos sítios 2 e 20 são mais propensos.

A espessura de parede foi o único parâmetro das fibras que apresentou influência das condições climáticas para ambos os clones (Tabela 3) e não relação direta com a sazonalidade de chuva.

Tabela 3. Variáveis de fibras da madeira de dois clones de eucalipto em cinco sítios do Brasil com diferentes sazonalidades de chuvas.

<i>E. urophylla</i> - G7			
Sítio	Comprimento	Largura	Espessura
02 – Arapoti (PR)	933,9	7,98	4,97 b
13 – Três Lagoas (MS)	911,5	7,61	5,41 a
20 – Mogi Guaçu (SP)	902,4	7,01	5,48 a
07 – Rio Verde (GO)	900,5	7,32	5,33 ab
04 – Belo Oriente (MG)	863,9	7,73	5,25 ab
CV (%)	3,95	10,53	4,14
<i>E. grandis</i> - Q8			
02 – Arapoti (PR)	877,8	8,61 a	4,82 c
13 – Três Lagoas (MS)	910,1	7,60 ab	5,36 ab
20 – Mogi Guaçu (SP)	900,9	7,50 ab	5,43 a
07 – Rio Verde (GO)	912,4	7,35 b	5,26 ab
04 – Belo Oriente (MG)	905,9	8,36 ab	4,96 bc
CV (%)	4,56	7,69	4,41

¹Coeficiente de Variação (%). Médias seguidas da mesma letra na coluna (sítios), para cada variável, não diferem pelo teste de Scott Knott (p <0,05). A seta em vermelho indica o sentido dos sítios da menor “-” para a maior “+” sazonalidade na chuva.

Na análise de trilha, a densidade da madeira dos clones G7 e Q8 tiveram um coeficiente de determinação de 0,52 e 0,54, respectivamente, ou seja, os dois clones tiveram mais de 50 % da variação de densidade explicada pelas variáveis usadas na análise (Figura 10). Entretanto, as variáveis com influência direta acima de 0,7 não são iguais para os clones. A variação da densidade da madeira do clone G7 *E. urophylla*, teve maior influência dos índices relacionados ao transporte de água (condutividade hidráulica potencial - K_s e índice de vulnerabilidade a cavitação), sendo ambos com comportamento inverso ao da densidade. Já a frequência de vasos e espessura de parede de fibra, tem menor poder de explicação, embora com sentido de variação similar.

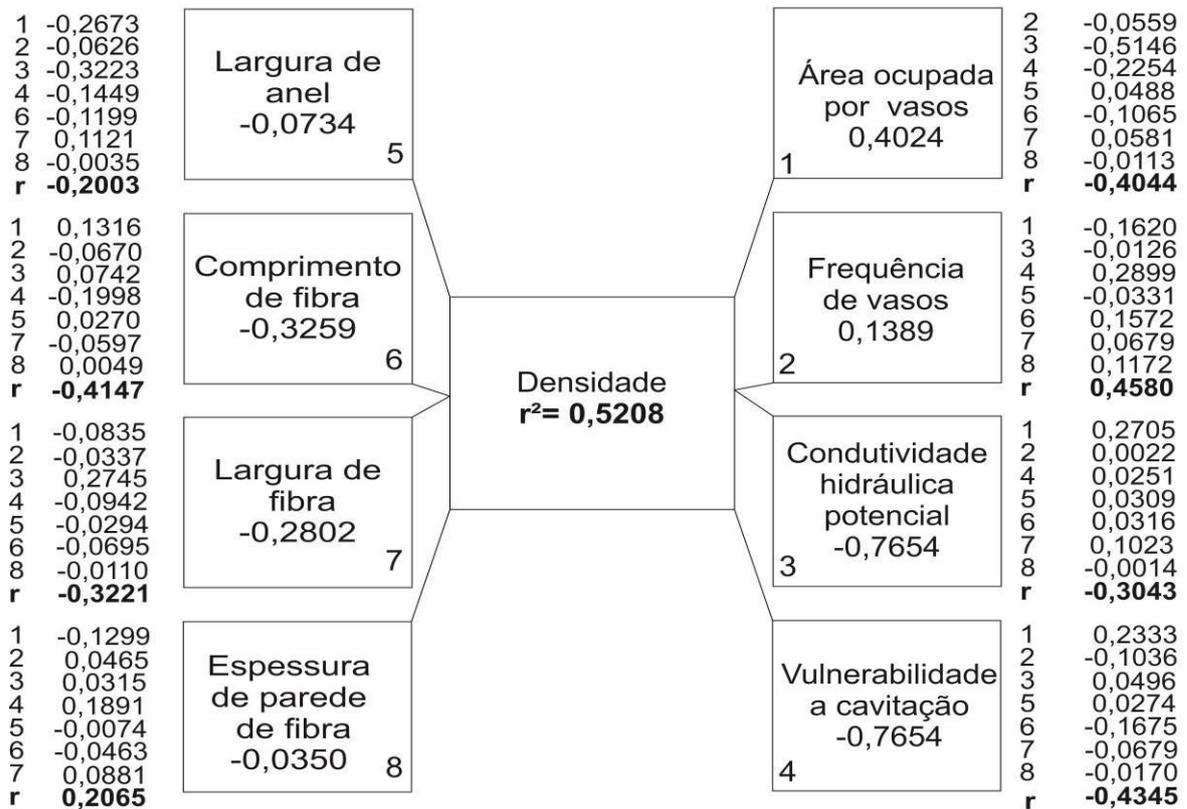
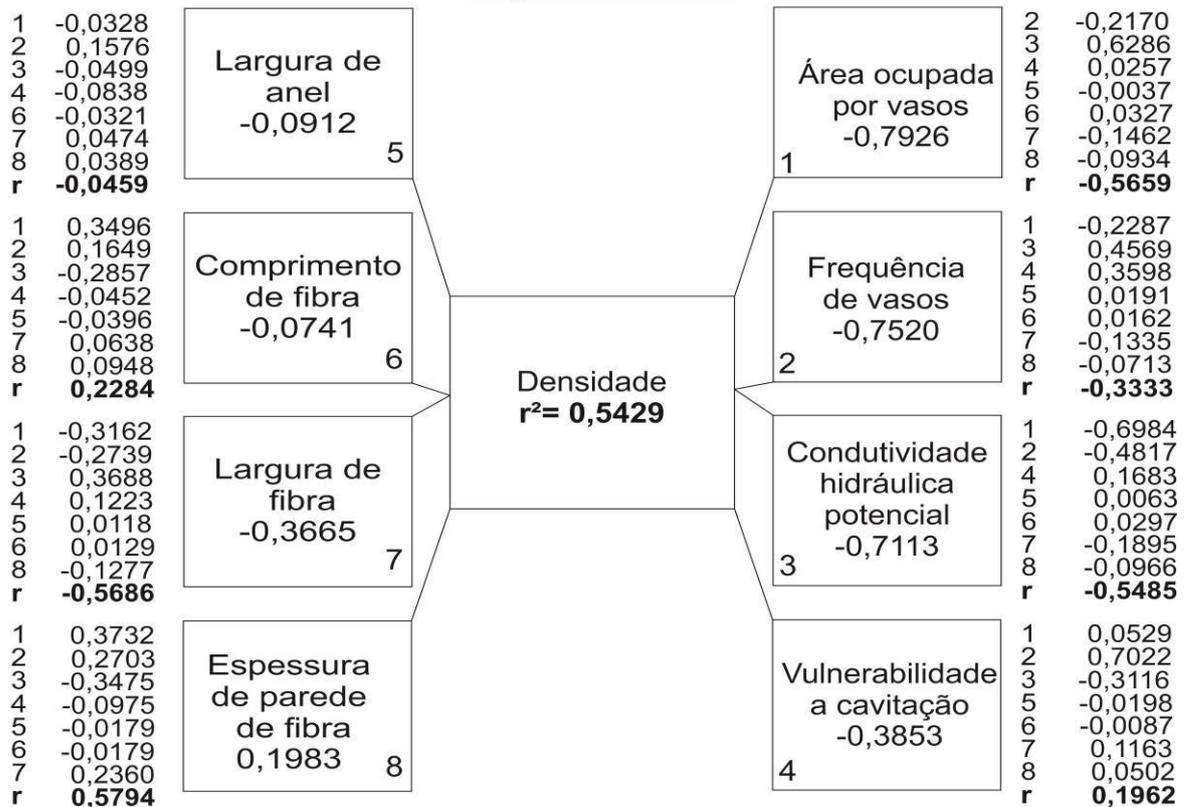
E. urophylla - G7*E. grandis* - Q8

Figura 10. Análise de trilha para explicar a densidade da madeira de 2 clones de eucalipto plantados em 5 sítios do Brasil, com correlações de efeitos diretos (quadrados numerados de 1 a 8) e indiretos das variáveis (em colunas com identificação numeral).

Para o clone Q8, a K_s , área e frequência de vasos foram mais determinantes na variação da densidade. Apenas espessura de parede de fibra mostrou comportamento de aumento junto a densidade da madeira. O maior incremento nos anéis de crescimento mostrou ter efeito de diminuição na densidade da madeira de ambos os clones.

4. DISCUSSÃO

O diâmetro de vaso não apresentou modificações significativas entre os sítios e lenhos para o *E. urophylla* – G7 (Tabela 1), sendo essa espécie originária de locais com pouca disponibilidade de água (FLORES et al., 2016). Assim, quando se compara sítios que compõem gradiente de sazonalidade de chuvas com os lenhos da madeira, não há grandes amplitudes em seus diâmetros de vasos (Figura 8), por ser considerada uma espécie mais rústica, fato corroborado a menor inclinação na linha de tendência entre frequência e área de vasos. A característica intrínseca a espécie é uma estratégia para manutenção de transporte de água mesmo em condições adversas (QADERI; MARTEL; DIXON, 2019).

O Q8 considerado clone “plástico” (SCOLFORO et al., 2019), tem como característica forte interação com o meio ambiente (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2011), nesse caso ajustes nos elementos de vaso (Figura 6) (PFAUTSCH et al., 2018; ROSELL; OLSON; ANFODILLO, 2017). Essa capacidade de adaptar ao meio de crescimento, tende a proporcionar um *trade off* entre segurança e eficiência (PFAUTSCH et al., 2016b). Nesse contexto, a frequência de vasos do Q8 proporciona aumento de área ocupada por vaso conforme a disponibilidade de água (Figura 6).

A área ocupada por vaso foi uma variável que teve interação significativa dos sítios e lenhos para o G7 (Tabela 1), com as maiores médias no sítio menor sazonalidade de chuva (Tabela 2). Contudo, a área ocupada por vaso nem sempre apresentou comportamento crescente com a frequência no clone *E. urophylla* – G7 (Figura 8), informação documentada nos trabalhos científicos como uma associação compensatória e de segurança hidráulica (SPERRY; MEINZER; MCCULLOH, 2008; FAN et al., 2012; SMITH et al., 2013; OLADI; BRÄUNING; POURTAHMASI, 2014). Isso mostra que a maior área ocupada por vasos foi atribuída ao diâmetro e não ao número de condutores, o que impactou na condutividade hidráulica do lenho, fato confirmado pelo aumento de 19% na condutividade do sítio 20.

As características anatômicas do xilema podem ser categorizadas em dois grupos: propriedades “plásticas”, que apresentam alta variabilidade interanual (lenhos), e características “estáticas” que variam em uma faixa mais conservadora (OLADI; BRÄUNING; POURTAHMASI, 2014). Dentre as variáveis analisadas, a frequência de vasos apresentou uma faixa mais conservadora para ambos clones, independente da sazonalidade do sítio, faixa até 25 vasos por mm^2 (Figura 8), o que mostra o menor intervalo de variação controlada principalmente por fatores genéticos (OLADI; BRÄUNING; POURTAHMASI, 2014).

A densidade da madeira do *E. grandis* - Q8, demonstra comportamento diferente entre sítios e lenhos (Tabela 2). Provavelmente, as diferentes magnitudes de disponibilidade de água influenciaram a interação entre madeira e ambiente, o que pode ser explicado pela espessura de parede de fibra e condutividade hidráulica (Tabela 3 e Figura 10). Além da resistência mecânica, as paredes de fibra suportam os vasos do xilema para resistir à implosão sob alta tensão (JANSSEN et al., 2019).

A precipitação é essencial para a formação dos lenhos e atividade cambial em espécies tropicais (RAHMAN et al., 2019). *Eucalyptus urophylla* demonstrou distinção de anéis de crescimento mais visível, sendo a sazonalidade de chuva determinante na formação de madeira (RAHMAN et al., 2019). Em anéis de crescimento de *E. grandis* a variação na organização e tamanho dos vasos foram associados a índices pluviométricos e ao fenótipo (BUENO et al., 2020). Nas angiospermas, o tempo seco promove elementos de vasos com diâmetro menores, o que pode reduzir a ocorrência de embolia (JANSSEN et al., 2019), isso poderia ser uma compensação por meio da diminuição da capacidade de transporte do xilema, que ocorreu mais intensamente no lenho tardio (Figura 6).

As correlações entre largura de anel e densidade da madeira foram negativas, o que demonstra a taxa de crescimento radial influência de forma inversa a densidade, independentemente do lenho de ambos os clones (Figura 7). Esse comportamento é relatado em estudos anuais de crescimento radial, e podem ser proporcionais ou não (FRANCIS et al., 2017).

As variáveis canônicas aliam o grau de sazonalidade com as variáveis da madeira, do modo a elencar características inerentes ao de transporte de água dentro do gradiente de sazonalidade. O sítio mais sazonal influenciou a produção do lenho com maior frequência de vasos e menor vulnerabilidade a cavitação (Figura 9). A restrição hídrica do solo pode acarretar em menor condutividade para manutenção do transporte de água na planta (CÂMARA et al., 2020). Esse

comportamento é o inverso do sítio 2 o menos sazonal, que tende a produzir lenhos mais vulneráveis a cavitação por possuir maior área condutiva. Essas características podem estar relacionadas com as baixas temperaturas aliadas com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (ISLAM; RAHMAN; BRÄUNING, 2019; RAHMAN et al., 2019). Outro fator a ser considerado é o ritmo de crescimento das árvores *E. grandis* no sítio de menor sazonalidade, a espessura da parede das fibras tendem a ser menos espessas (Tabela 3).

O aumento de condutividade hidráulica potencial gera uma variação de decréscimo de densidade aparente da madeira, como mostra a análise de trilha (Figura 10). O comportamento de crescimento radial da árvore, acompanhado com aumento do transporte de água (TYREE; EWERS, 1991) relaciona os maiores crescimentos a densidades mais baixas. Entretanto, o poder de explicação das variáveis exógenas usadas nesse trabalho abrem questionamentos sobre efeitos das variáveis residuais a serem descobertas. Essas lacunas na explicação da densidade podem estar presentes em fatores ambientais como, temperatura, precipitação e tipos de solos. A complexidade de elementos anatômicos formadores da densidade da madeira apresentam diferentes variáveis para os clones, sendo apenas a espessura da parede de fibra com variação no mesmo sentido da densidade.

Entender a performance hidráulica dos clones e os períodos em que há maior atividade fisiológica são suportes para definir as intervenções silviculturais em sítios com sazonalidade de chuva. Durante o crescimento do lenho inicial, período chuvoso, a planta está no ápice do crescimento anual com maior demanda de água e desenvolvimento, por isso atividades como adubação são mais interessantes. Entretanto, outros tratamentos silviculturais como desrama e desbaste que requerem um esforço metabólico maior são melhor aproveitados no período seco. É especialmente interessante estudar se a forma de alteração nas características anatômicas do xilema de eucalipto depende da espécie e da sazonalidade do sítio de crescimento ou pode ser generalizada para todas as árvores de porosidade difusa em diferentes climas (DE MICCO et al., 2016).

As alterações morfológicas que afetam a funcionalidade do xilema são variadas (LACHENBRUCH; MCCULLOH, 2014). Neste trabalho, células individuais, como os vasos, tiveram o diâmetro alterado; e em segundo plano provocaram alterações nos lenhos (inicial e tardio) e contribuíram para distintos ritmos de crescimento nas condições ambientais analisadas. O conjunto de características

morfológicas relevantes influencia propriedades como a densidade da madeira e, em seguida, o conjunto de propriedades influencia o desempenho dos clones independente da finalidade do plantio. Os silvicultores focam no desempenho, contudo, todas as etapas de formação da madeira necessitam de entendimento, para que o todo funcione eficientemente. O conhecimento do padrão sazonal de formação do xilema é importante para melhores avaliações do manejo florestal e das práticas silviculturais, e pode fornecer meios para melhorar as características da madeira e conseqüentemente, seus produtos.

5. CONCLUSÃO

A maior sazonalidade de chuvas provocou 5 vezes menos vulnerabilidade a cavitação na madeira de arvores que cresceram sob menor sazonalidade, para o *E. urophylla* – G7. O *E. grandis* - Q8 tem um comportamento crescente de área de vaso com a frequência, independente da sazonalidade. O lenho inicial tem 2 vezes mais condutividade hidráulica que o lenho tardio.

Sítios com maior sazonalidade investem em frequência de vasos para diminuir a vulnerabilidade a cavitação. Sítios com chuvas melhores distribuídas ao longo do ano tem mais área de vaso e maior vulnerabilidade a cavitação.

A variação de incremento do anel de crescimento e condutividade hidráulica potencial geram uma variação de decréscimo de densidade que pode ser explicada também pela espessura da parede de fibra.

6. REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BHERING, L. L. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, n. 2, p. 187–190, 2017.

BUENO, I. G. A. et al. Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance. **Current Plant Biology**, v. 22, n. 100136, 2020.

CÂMARA, A. P. et al. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118380, 2020.

- CARLQUIST, S. Ecological factors in wood evolution : a floristic approach. **American Journal of Botany**, v. 64, n. 7, p. 887–896, 1977.
- 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*. **Ciencia Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1017–1027, 2017.
- COSTA, S. E. DE L. 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. 117807, p. 1–12, 2020.
- CRANG, R.; LYONS-SOBASKI, S.; WISE, R. **Plant anatomy: a concept-based approach to the structure of seed plants**. Springer, 2018, 739p.
- CRUZ, C. D. Programa Genes – Ampliado e integrado aos aplicativos R, Matlab e Selegen. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 38, n. 4, p. 547–552, 2016.
- DE MICCO, V. et al. Intra-annual density fluctuations in tree rings: How, when, where, and why? **IAWA Journal**, v. 37, n. 2, p. 232–259, 2016.
- DOMEC, J. C.; GARTNER, B. L. How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 379, p. 2369–2379, 2002.
- FAN, Z. X. et al. Hydraulic conductivity traits predict growth rates and adult stature of 40 Asian tropical tree species better than wood density. **Journal of Ecology**, v. 100, n. 3, p. 732–741, 2012.
- FLORES, T. et al. ***Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. ed. 1. Piracicaba: IPEF, 2016. 448p.
- FRANCIS, E. J. et al. Quantifying the role of wood density in explaining interspecific variation in growth of tropical trees. **Global Ecology and Biogeography**, v. 26, n. 10, p. 1078–1087, 2017.
- FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 250p.
- GLEASON, S. M. et al. Whole-plant capacitance, embolism resistance and slow transpiration rates all contribute to longer desiccation times in woody angiosperms from arid and wet habitats. **Tree Physiology**, v. 34, n. 3, p. 275–284, 2014.
- HACKE, U. G. et al. Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency. **Tree Physiology**, v. 26, n. 6, p. 689–701, 2006.
- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2019. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>
- ISLAM, M.; RAHMAN, M.; BRÄUNING, A. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. **Dendrochronologia**, v. 53, p. 63–72, 1 fev. 2019.
- JANSSEN, T. A. J. et al. Wood allocation trade-offs between fiber wall, fiber lumen, and axial parenchyma drive drought resistance in neotropical trees. **Plant Cell and Environment**, v. 43, n. 4, p. 965–980, 2019.
- LACHENBRUCH, B.; MCCULLOH, K. A. Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. **New Phytologist**, v. 204, n. 4, p. 747–764, 2014.

- LENZ, A. M. et al. Expansion of eucalyptus energy plantations under a Livestock-Forestry Integration scenario for agroindustries in Western Paraná, Brazil. **Ecological Indicators**, v. 98, p. 39–48, 2019.
- MARCATI, C. R. et al. Comparative wood anatomy of root and stem of *Citharexylum myrianthum* (Verbenaceae). **Rodriguesia**, v. 65, n. 3, p. 567–576, 2014.
- MCMAHON, D. E.; JACKSON, R. B. Management intensification maintains wood production over multiple harvests in tropical *Eucalyptus* plantations. **Ecological Applications**, v. 29, n. 4, p. 1–15, 2019.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introdução à Análise de Regressão Linear**. Wiley ed. Wiley-Interscience, 2001, 641p.
- OLADI, R.; BRÄUNING, A.; POURTAHMASI, K. “Plastic” and “static” behavior of vessel-anatomical features in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in view of xylem hydraulic conductivity. **Trees - Structure and Function**, v. 28, n. 2, p. 493–502, 2014.
- OLIVEIRA, R. S. et al. Embolism resistance drives the distribution of Amazonian rainforest tree species along hydro-topographic gradients. **New Phytologist**, v. 221, n. 3, p. 1457–1465, 2019.
- OLSON, M. E. et al. Plant height and hydraulic vulnerability to drought and cold. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 115, n. 29, p. 7551–7556, 2018.
- PFAUTSCH, S. et al. Vessel diameter and related hydraulic traits of 31 *Eucalyptus* species arrayed along a gradient of water availability. **Ecology**, v. 97, n. 6, p. 1626, 2016a.
- PFAUTSCH, S. et al. Climate determines vascular traits in the ecologically diverse genus *Eucalyptus*. **Ecology Letters**, v. 19, n. 3, p. 240–248, 2016b.
- PFAUTSCH, S. et al. Traits and trade-offs in whole-tree hydraulic architecture along the vertical axis of *Eucalyptus grandis*. **Annals of Botany**, v. 121, p. 129–141, 2018.
- PINEDA-GARCÍA, F.; PAZ, H.; MEINZER, F. C. Drought resistance in early and late secondary successional species from a tropical dry forest: The interplay between xylem resistance to embolism, sapwood water storage and leaf shedding. **Plant, Cell and Environment**, v. 36, n. 2, p. 405–418, 2013.
- QADERI, M. M.; MARTEL, A. B.; DIXON, S. L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. **Plants**, v. 8, n. 3, p. 1–23, 2019.
- RAHMAN, M. H. et al. Changes in cambial activity are related to precipitation patterns in four tropical hardwood species grown in Indonesia. **American Journal of Botany**, v. 106, n. 6, p. 760–771, 2019.
- ROCHA, S. M. G. et al. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020.
- ROSELL, J. A.; OLSON, M. E.; ANFODILLO, T. Scaling of xylem vessel diameter with plant size: causes, predictions, and outstanding questions. **Current Forestry Reports**, v. 3, n. 1, p. 46–59, 2017.
- SCOLFORO, H. F. et al. Yield pattern of eucalypt clones across tropical Brazil: An

approach to clonal grouping. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 30–39, 2019.

SILVA, G. F. et al. Análise da influência de diferentes tamanhos e composições de amostras no ajuste de uma relação hipsométrica para *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 31, n. 4, p. 685–694, 2007.

SMITH, M. S. et al. Contrasting xylem vessel constraints on hydraulic conductivity between native and non-native woody understory species. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1–13, 2013.

SPERRY, J. S.; MEINZER, F. C.; MCCULLOH, K. A. Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: Scaling from tissues to trees. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, n. 5, p. 632–645, 2008.

SURDI, P. G. et al. Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 229–236, 2014.

TYREE, M. T.; EWERS, F. W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. **New Phytologist**, v. 119, n. 3, p. 345–360, 1991.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963.

ZANNE, A. E. et al. Angiosperm wood structure: global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. **American Journal of Botany**, v. 97, n. 2, p. 207–215, 2010.

ZIMMERMANN, M. H. **Xylem structure and the ascent of sap**. Springer Verlag: Berlin.1983.

CAPÍTULO III

Qual a amostragem radial é mais representativa da densidade aparente, morfologia de vasos e fibras na madeira jovem de *Eucalyptus*?

RESUMO

Uma amostragem bem-sucedida da madeira para entender o efeito de fatores ambientais no crescimento da árvore e representar os valores médios de densidade e elementos anatômicos ainda é um desafio, mesmo para a madeira de eucalipto. Este trabalho tem como objetivo identificar qual ou quais pontos do perfil radial da madeira são mais representativos para a determinação da densidade aparente, dos elementos de vasos e das fibras da madeira. 50 árvores de *Eucalyptus* (2 clones: *E. urophylla* - G7 e *E. grandis* – Q8) foram colhidas em 5 sítios distribuídos ao longo do Brasil, das quais retiraram-se discos a 1,30 m do solo, que posteriormente foram cortados por faixas de amostragem ao longo do raio (0 a 33%, 33 a 66%, 66 a 100%, cerne periférico e alburno periférico) para determinação de densidade aparente e mensuração da morfologia de fibras e vasos da madeira. As confiabilidades de cada amostragem para estimar as propriedades da madeira do raio total foi variável e intrínseca a cada propriedade. Os resultados indicam que a faixa radial de 33 a 66% e cerne periférico foram mais similares a média do raio total. Entretanto, a posição 33 a 66% tem maior poder de explicação e menor variação para as propriedades estudadas. As faixas de 0 a 33%, 66 a 100% e alburno periférico tendem a subestimar e superestimar os valores médios do perfil total, respectivamente.

Palavras Chave: *Eucalyptus*, Estratégia de amostragem; Variação interna a árvore; Amostragem destrutiva.

Highlights

- Estratégias de amostragem de eucalipto jovem na avaliação de propriedades da madeira.
- As amostragens próximas as extremidades do raio total madeira tem maior variação.
- A faixa de 33 a 66% é a que melhor representa o raio total da madeira.

1. INTRODUÇÃO

A heterogeneidade das características da madeira na árvore tem sido discutida pelas variações nos sentidos radial e axial (PÁDUA et al., 2019), pelas proporções de tipos de células em eucalipto, como vasos e fibras (OHSHIMA et al., 2020), pela variação do tipo de madeira formada: juvenil e adulta e cerne e alburno, sendo representadas com amostragens variadas (BOBADILHA et al., 2019; BUENO et al., 2020). A amostragem da madeira para a avaliação das propriedades da madeira deve considerar a acurácia, o tempo, o custo de processamento e coleta do material de modo atender os segmentos industriais e investimentos florestais. No entanto, há poucas informações relacionadas à estratégia de amostragem que melhor represente a área do xilema a ser estudada. Sabe-se contudo, que padrões de comportamentos de densidade, diâmetro de vasos e fibras são crescentes da medula-casca (DOWNES et al., 1997; SETTE JUNIOR et al., 2012).

Fatores como, clima, solo, material genético, idade e espaçamento influenciam a formação e qualidade da madeira. Em madeiras de eucalipto as amostragens foram compiladas, com uma abordagem quantitativa, por meio de uma revisão sistemática com base nas plataformas de pesquisa, Google scholar, Microsoft Academic, Scielo, utilizando as palavras-chave density wood, anatomy wood, eucalyptus, radial sampling, são apresentadas na Figura 1. A pesquisa compreendeu os anos de publicação 2015 e 2021, de acordo com a metodologia proposta por Tranfield; Denyer; Smart, (2003).

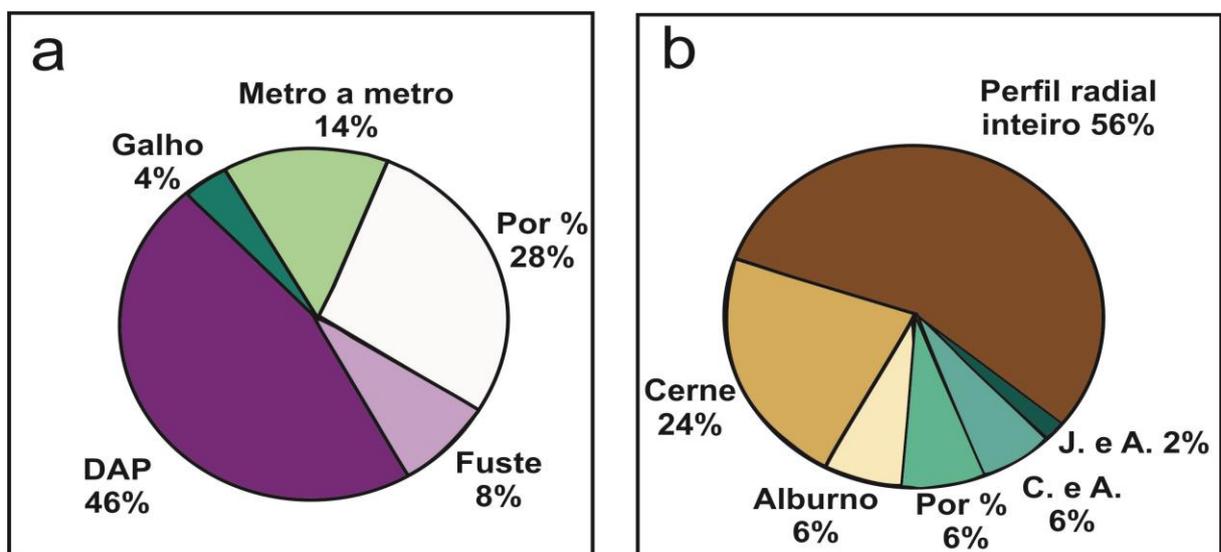


Figura 1. Compilação de informações amostrais de 50 artigos e 31 revistas científicas, com a média de fator de impacto de 1,59, produzidos em 15 países, que abrange 36 materiais genéticos de eucalipto entre espécies e híbridos. a)

Percentuais das posições axiais mais avaliadas para propriedades da madeira de eucalipto; b) Percentuais da forma e metodologia adotada na amostragem radial destrutiva. Onde: Cerne e alburno é representado pelo (C. e A.) e os lenhos juvenil e adulto (J. e A.). Referências apresentadas no Apêndice

A amostragem de madeira na posição do DAP (1,30 m do solo) é a mais usual para avaliação de algumas propriedades (AISO-SANADA et al., 2019; CÂMARA et al., 2020; CASTRO et al., 2020; MENUCELLI et al., 2019; PÉREZ-PEÑA et al., 2020; PRASETYO et al., 2019; ROCHA et al., 2020) devido a ergonomia e eficiência operacional dos trabalhos em campo para aferir o crescimento diametral (SILVA et al., 2007). No geral, propriedades de importância industrial, como a densidade da madeira (VEGA et al., 2020), são aferidas em amostras de perfil radial inteiro com amostras da madeira da medula a casca no formato de baguetas de diferentes dimensões, cunhas, pontos equidistantes (cm) e disco inteiro. Quando essa mesma amostra tem que ser usada para outra finalidade como caracterização de fibras, elementos de vasos e raios, as estratégias de amostragem destrutiva são por pontos equidistantes (cada 1 ou 2 cm), ou pontos fixos no cerne, alburno ou cerne e alburno, sendo esses mais usuais em estudos de anatomia da madeira. Estudos cuja amostragem é em porcentagem (%) do perfil radial, são realizados com a função de diminuir o efeito diferença das idades das amostras, quando a amostragem abrange uma amplitude grande entre o menor e maior diâmetro da árvore.

O aperfeiçoamento da amostragem é para mitigar e “controlar” a variabilidade das propriedades da madeira no interior da árvore, neste caso, na direção radial. Estas incluem: a) variação no anel de crescimento, que é caracterizada por alterações na densidade da madeira, juntamente com espessura de parede de fibras e área de vasos (SALVO et al., 2017); b) variação pela predominância do lenho juvenil, com propriedades extremamente variáveis da medula à casca, sendo sua interferência considerável na densidade da madeira (ZAQUE; FERREIRA; MELO, 2018); c) variação entre os lenhos normal e a de reação; d) variação com as tensões de crescimento que é uma limitação dimensional das fibras em formação, causadas pelas fibras maduras do xilema já formado, de forma sucessiva em camadas mais externas da árvore, o que ocasiona um acúmulo de cargas permanentes (GRIL et al., 2017).

O objetivo deste artigo é definir o melhor ponto de amostragem no perfil radial da madeira de eucalipto para determinação da densidade aparente, elementos de vasos e fibras da madeira jovem de *Eucalyptus* spp.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostragem das árvores

O presente estudo faz parte do projeto TECHS, que abrangeu 36 sítios do norte do Brasil ao Uruguai (BINKLEY et al., 2017) com 18 materiais genéticos diferentes, sendo: 7 clones para os sítios tropicais, 7 clones para sítios subtropicais e 4 clones considerados plásticos que foram implantados em todos os sítios. O objetivo do projeto foi investigar o padrão de crescimento do eucalipto em diferentes condições climáticas.

Cinco sítios distribuídos ao longo do Brasil foram selecionados para o estudo: 2 Arapoti – PR (24. 2 S, 50.0 O), 4 Belo Oriente - MG (19.3 S, 42.4 O), 7 Rio Verde – GO (18.0 S, 50.9 O), 13 Três Lagoas – MS (20.9 S, 51.9 O) e 20 (22.3 S, 46.9 O). Os dois materiais de *Eucalyptus* utilizados com 6 anos foram classificados como sensíveis ao clima (SCOLFARO et al., 2019), sendo: *E. urophylla* G7 – tropical, clima de origem Cwa e *E. grandis* Q8 – “plástico”, que significa ter forte adaptação a diferentes climas, sem perdas elevadas no incremento (FRITSCHÉ-NETO; BORÉM, 2011), clima de origem Af.

2.2 Estratégia de amostragem em campo e na árvore

Cada clone foi plantado em uma única parcela por sítio (24 x 45 m) com 8 linhas x 15 árvores e espaçamento de 3 x 3 m. Todas as árvores dentro de cada parcela tiveram o diâmetro na altura do peito (DAP, 1,3 m do solo) e altura mensurados. Após a medição da parcela, cinco árvores com troncos retos e sem sinais de doença foram selecionadas como representantes de cinco classes de diâmetros de cada clone (G7 e Q8) por sítio, totalizando 50 árvores. A escolha de representantes por classe garante a representatividade da parcela, para uma amostragem mais próxima a realidade do povoamento. Após mensuração do DAP e seleção das árvores, elas foram cortadas e discos de 5 cm de espessura foram retirados a altura do DAP (Figura 2).

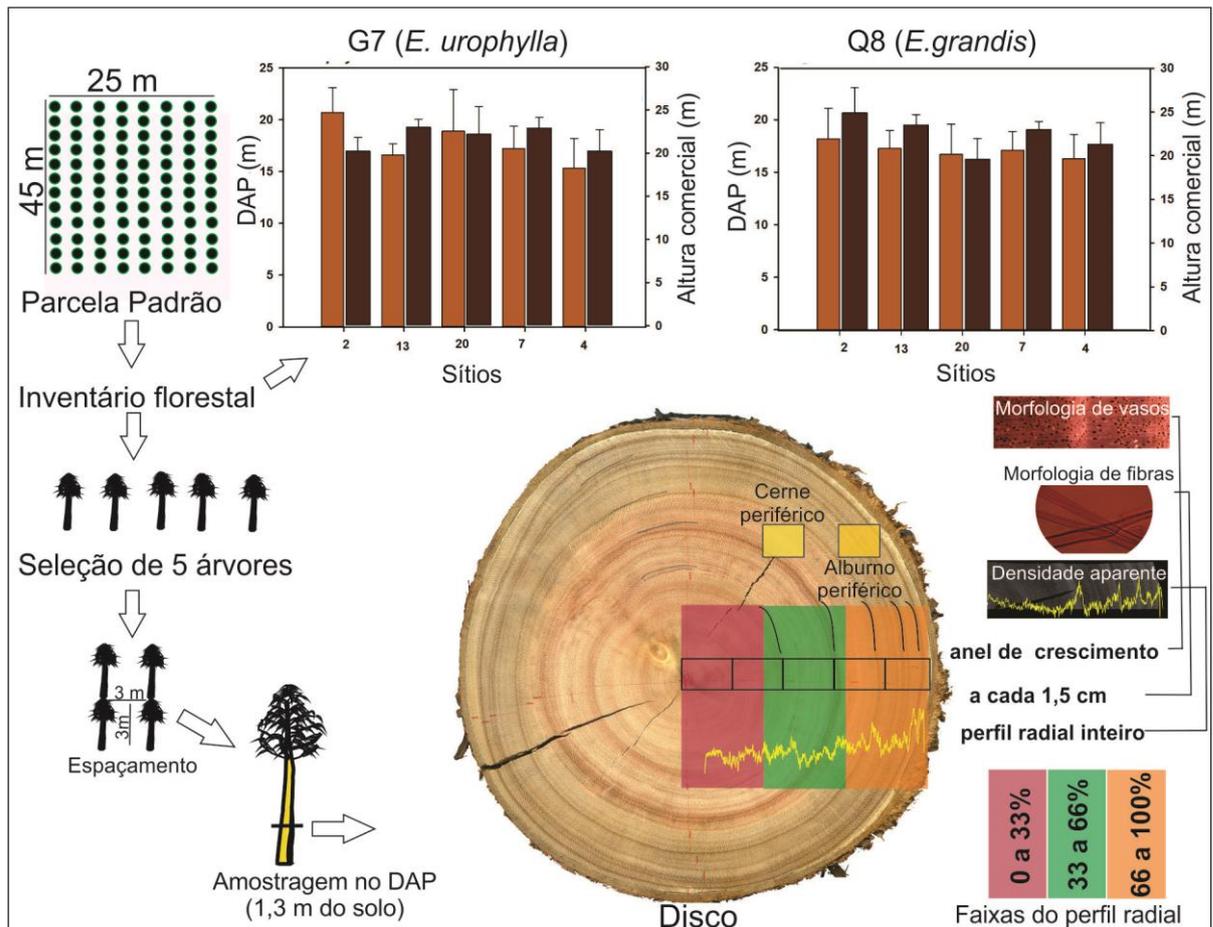


Figura 2. Esquema de amostragens da plantação, das árvores e do disco de madeira de dois clones de eucalipto em 5 sítios, no Brasil.

As análises anatômicas foram a partir de amostras retiradas nas faixas de: 0 a 33%, 33 a 66%, 66 a 100%, cerne e alburno periférico.

A densidade aparente da madeira, as análises de vasos e fibras tem repetições referentes ao número de árvores, ou seja, 50 repetições por faixa amostral no sentido medula-casca (0 a 33%, 33% a 66% e 66% a 100% do raio do disco), cujas faixas são formadas por médias. Os valores de cada faixa (0 a 33%, 33% a 66% e 66% a 100%) são correspondentes a médias. Os valores formadores das médias da densidade aparente foram aferidos a cada 50 μm da amostra. A quantidade de valores correspondentes as análises de fibras variam de acordo com o tamanho da amostra. Já as médias de morfologia dos vasos, são dependentes do número de anéis de crescimento correspondente a cada faixa.

2.3 Propriedades da madeira

A partir dos discos, foram realizadas as análises de densidade aparente; diâmetro (μm), frequência ($\text{n}^\circ \text{mm}^{-2}$), condutividade hidráulica potencial e

vulnerabilidade à cavitação dos vasos; e comprimento (μm), e espessura de parede (μm) das fibras da madeira.

A densidade aparente foi determinada pela técnica de densitometria de raios X, sendo o preparo das amostras realizado de acordo com as metodologias de Castro et al. (2017) e Surdi et al. (2014). Utilizou-se o equipamento de raios X digital Faxitron, modelo LX-60, com valores de densidade determinados a cada 50 μm de distância no sentido radial.

As amostras para fibras foram cortadas no sentido longitudinal, dissociadas e clareadas em solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético foi utilizada, proporções como proposto por Dadswell (1972). Os elementos de vasos foram analisados por meio de lâminas histológicas, montadas com seções do lenho de 20 μm de espessura, cortadas com o micrótomo de deslize (Leica SM2000R, Heidelberg, Alemanha) na face transversal de amostras, após fervura em água. As lâminas foram desidratadas em etanol e coradas com safranina. A porosidade do lenho foi observada em aumento de 5x em microscópio digital automatizado (Zeiss Axio Scope. A1) com câmera acoplada.

As fibras (largura, comprimento e diâmetro de lume) e os vasos (diâmetro e frequência) foram mensuradas pelo software Axio Vision SE64. A espessura da parede das fibras foi calculada pela diferença entre largura total e diâmetro do lume, dividido por dois.

2.4 Análises dos dados

Análise exploratória foi realizada para as faixas de amostragem do raio dos discos foram realizadas em 6 posições, 0 a 33%, 33 a 66%, 66 a 100%, cerne periférico e alburno periférico e também do raio total, pelas seguintes estatísticas descritivas: mínimo, máximo, média e coeficiente de variação (CV).

Os valores das propriedades da madeira por faixa de amostragem e da média geral do raio total dos discos, também foram expressos em gráficos tipo radar. Os dados para plotagem no radar foram parametrizados de modo que as médias gerais do raio total e das faixas de amostragem ficassem internas ao gráfico. A parametrização em percentagem (%) foi de 0,700 g cm^{-3} para densidade aparente, 1200 μm para comprimento da fibra, 20 μm para largura total de fibra, 6 μm para espessura de parede de fibra, 130 μm para diâmetro de vaso e 20 vasos mm^{-2} para frequência de vasos, para que os dados apresentados estivessem no interior do

radar. O gráfico de radar facilita a comparação das propriedades da madeira determinadas por faixas de amostragem em relação à média geral do raio total. A representação das propriedades da madeira por meio de vértices ajuda a realizar uma análise simultânea sobre valores acima (superestimados) e abaixo (subestimados) da média geral do raio dos discos de *Eucalyptus*.

Para definir a faixa de amostragem representativa, foram ajustados modelos de regressão linear simples, por faixas de amostragens do raio (0-33, 33-66, 66-100 %), cerne e alburno periférico, como regressores das propriedades da madeira médias obtidas no raio total. O preditor é a faixa, expressa numericamente como a porcentagem do raio, e a resposta é a propriedade da madeira considerada. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi realizado para determinar se as propriedades da madeira são normalmente distribuídas.

3. RESULTADOS

A análise descritiva foi necessária para identificar a presença de anomalias, registros incorretos e *outliers*, que não seguem a tendência geral do restante do conjunto, além de proporcionar um panorama geral dos dados. O conjunto de dados de densidade da madeira que apresentou maior amplitude de valores, foi na faixa de amostragem de 0 a 33% do raio (Figura 3) com $0,259 \text{ g cm}^{-3}$.

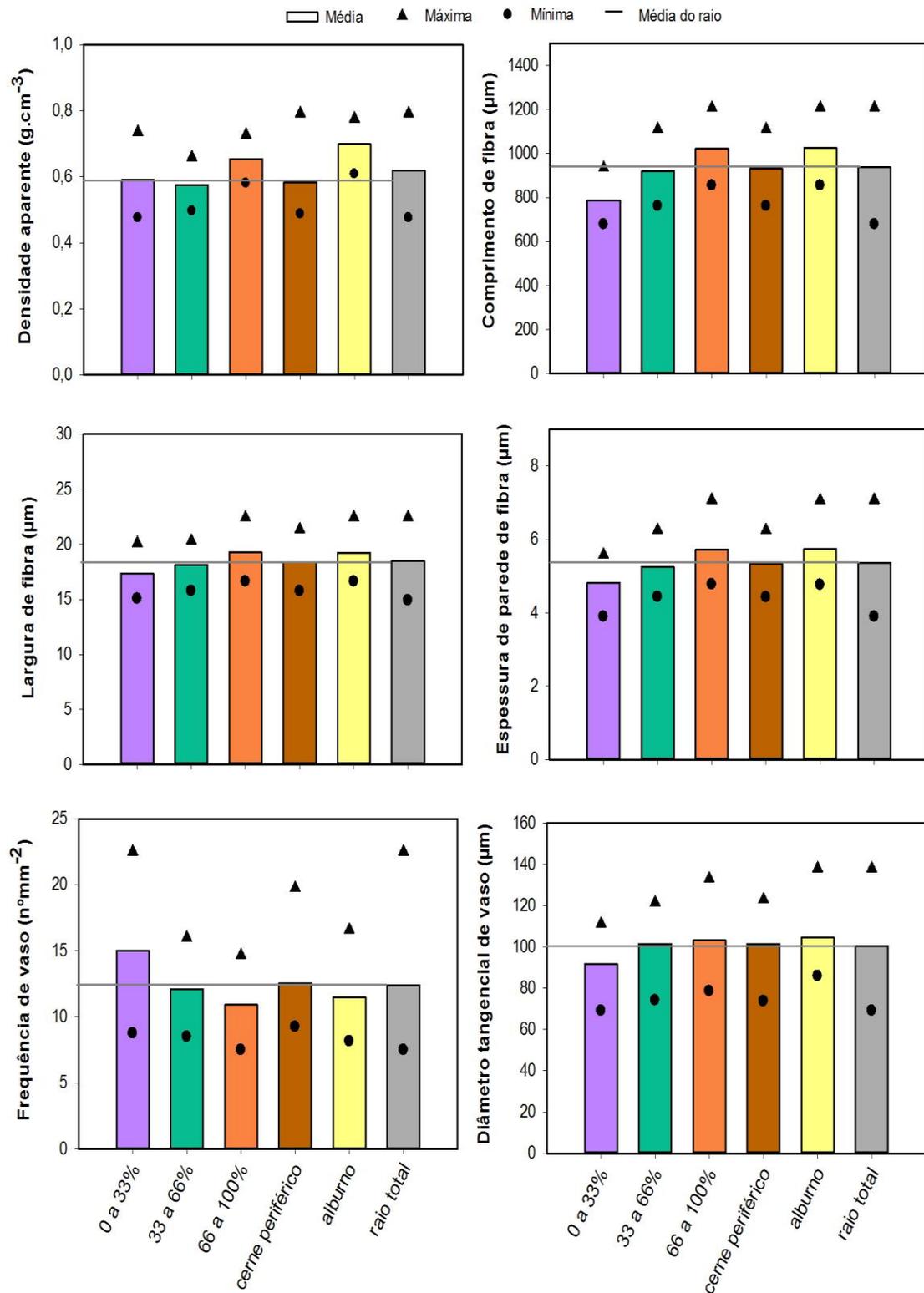


Figura 3. Estatística descritiva das propriedades da madeira determinadas nas faixas de amostragem de madeira de dois clones de eucalipto (*E. urophylla* e *E. grandis*) cultivados em cinco sítios no Brasil.

A faixa de amostragem de 0 a 33% do raio do disco apresenta características de superestimar a frequência de vasos e subestimar o diâmetro de vaso (Figura 4).

Entre as faixas, a de 33 a 66% é a que apresenta os valores mais próximos da média do raio total dos discos, entretanto, subestima a densidade da madeira e frequência de vasos. Na faixa de 66 a 100%, a maioria das propriedades da madeira avaliadas foram superestimadas, com exceção da frequência de vasos que foi subestimada.

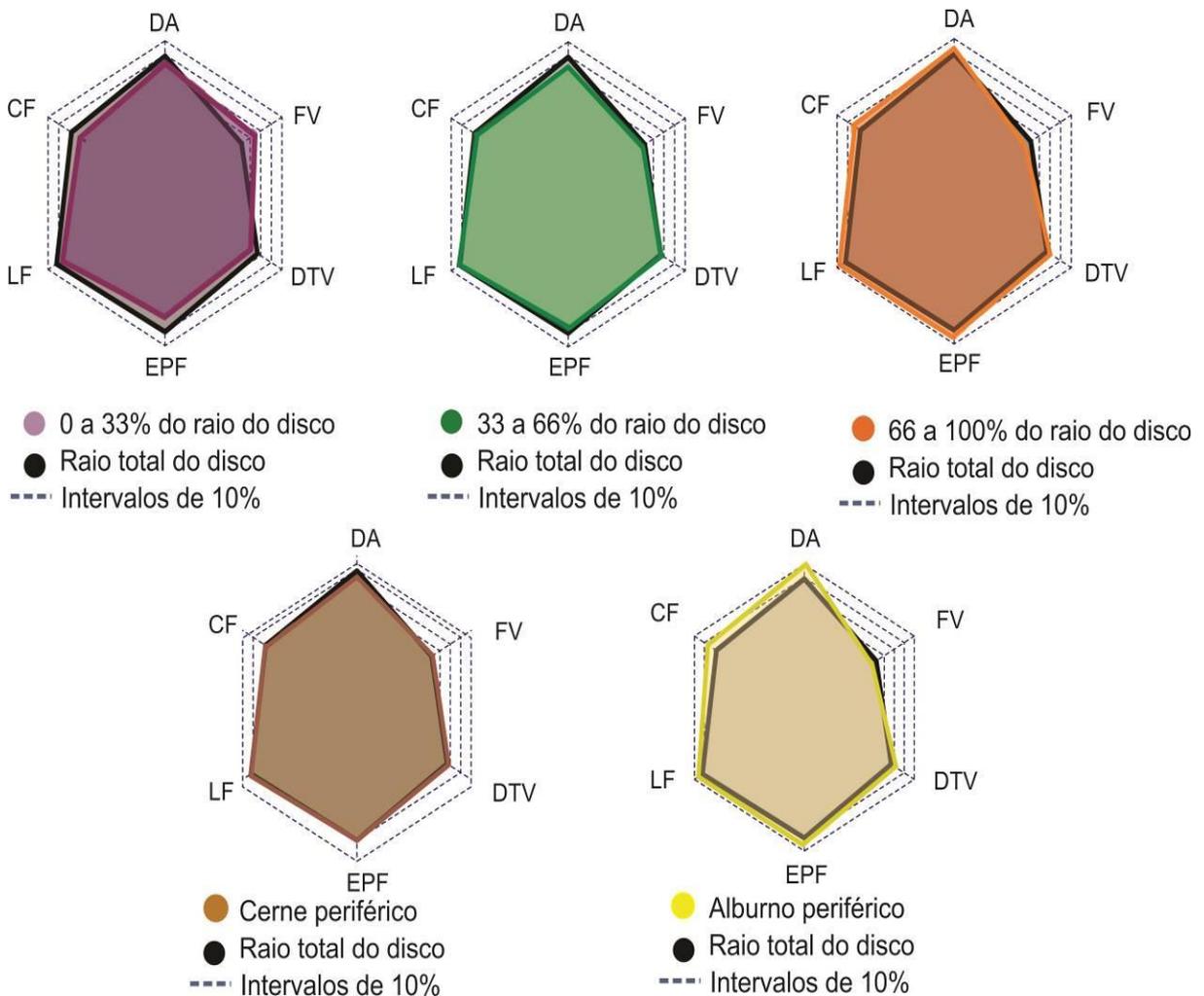


Figura 4. Representação dos valores das propriedades da madeira (DA: densidade aparente; CF: comprimento das fibras; LF: largura total das fibras; EPF: espessura de parede das fibras; DTV: diâmetro de vasos; FV: frequência de vasos por faixas de amostragem de 0 a 33%, 33 a 66%, 66 a 100% do raio, cerne periférico e alburno periférico em relação as médias do raio total dos discos de madeira de dois clones de eucalipto plantados em cinco sítios no Brasil.

O cerne periférico tem características semelhantes a faixa de 33 a 66%, enquanto o alburno superestima principalmente os valores relacionados a morfologia das fibras. Assim, o alburno periférico apresenta comportamento oposto a faixa de 0 a 33% que subestima os valores de morfologia das fibras. As faixas de 66 a 100% e cerne periférico tem maior poder explicativo da média geral da morfologia das fibras,

vasos e da densidade aparente da madeira do raio total dos discos, com exceção da frequência de vasos (Figura 5). As estimativas da densidade aparente da madeira e do diâmetro dos vasos pelas faixas de amostragem, obtiveram os maiores valores de R^2 . O modelo matemático para estimar a densidade apresentou R^2 de 0,71 na faixa de amostragem de 33 a 66%. Já o diâmetro tangencial dos vasos foi melhor explicado nas faixas 33 a 66% e 66 a 100%, com valores de R^2 de 0,67 e 0,61, respectivamente.

A espessura de parede de fibra teve a menor amplitude entre os R^2 tem um explicação acima de 50% em todas as posições testadas nesse estudo. O cerne e alburno periférico apresentaram os maiores valores de Erro Padrão Absoluto e menores R^2 .

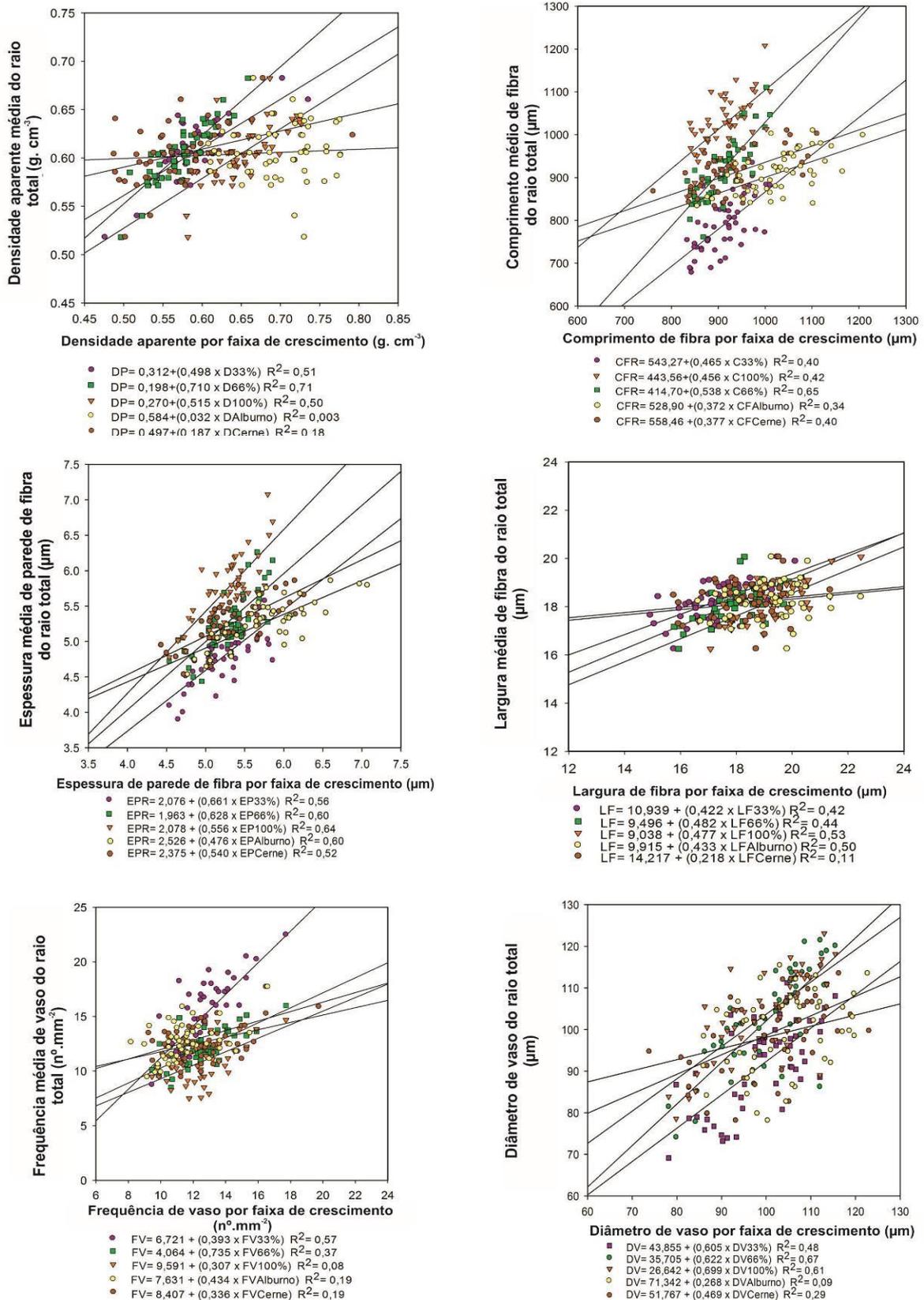


Figura 4. Plots de regressão linear para estimar as propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* determinadas no raio total dos discos por faixas de amostragem (33%, 66%, 100%, cerne periférico e albúneo periférico). Os valores plotados são uma combinação de dois clones e 5 sítios de cultivo, aos 6 anos de idade.

4. DISCUSSÃO

As variações nos valores de densidade aparente e nas morfologias de fibras e vasos (Figura 3) no sentido medula-casca podem ocorrer devido à idade de formação da madeira e variações dentro dos anéis de crescimento (lenhos inicial e tardio) e entre anéis, influenciados pelo clima (diâmetro e frequência) (TOMAZELLO et al., 2008). A variabilidade na disposição e dimensão dos elementos anatômicos são responsáveis pela variação da densidade da madeira (BOSCHETTI; VIDAURRE; SILVA, 2020).

Os maiores valores de frequência de vasos e menores de diâmetro de vasos encontrados próximos a medula também foram relatados em estudo da variação da morfologia de vaso no sentido medula-casca, dividida em (I – medula, II – cerne periférico e III – periferia) em 12 clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos de idade. Este estudo demonstrou que os valores mais próximos da média geral foram das amostras obtidas próximas da casca, ou seja, em idades mais avançadas (CARNEIRO, 2017).

A superestimação e subestimação das propriedades da madeira de eucalipto a depender da posição de amostragem acontece em resposta a intensa variabilidade radial dos elementos anatômicos. Contudo, elementos como vasos tendem a apresentar as maiores flutuações ao longo do raio, uma vez que há maior interação com o ambiente (PFAUTSCH et al., 2016). A variação do diâmetro dos vasos ocorre de diferentes formas no interior das árvores: *i*) sentido base - topo (MCELTRONE et al., 2004); *ii*) no sentido da medula para a casca de forma mais macro e de forma anual e nos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento (MEDEIROS; POCKMAN, 2014; OLSON et al., 2020). Embora todas as formas de variação tenham relação com o transporte de água, a variação de tamanho e frequência de vasos nos períodos iniciais de crescimento do eucalipto é maior e pode se destacar das demais posições radiais que não tenham sofrido o efeito de arranque inicial de crescimento, uma vez que o crescimento em altura tem forte influência nos elementos de vasos (FAJARDO et al., 2020). Estudos com *E. camaldulensis*, *E. globulus* (OHSHIMA et al., 2020) e *E. grandis* (PALERMO et al., 2015) demonstraram que a porcentagem de vasos ao longo do raio não apresenta um padrão constante.

Para o comprimento das fibras, a faixa de 0 a 33% apresentou média de 788 µm (Figura 3). Esse comportamento demonstra que o fator de rápido crescimento

inicial tem maior influência em árvores de menor idade, sendo a madeira mais nova do lenho juvenil a detentora das maiores variações. Essa variação condiciona a faixa de 33 a 66% a deter valores intermediários e assim ser mais similar aos valores médios do raio total dos discos. Corroborando com essa hipótese, o cerne periférico que geralmente é localizado nessa faixa, apresenta valor médio próximo a média do raio total. A espessura de parede das fibras variou de 7 a 8 %. Essa relação realça a homogeneidade dos dados da variável dentro das faixas de amostragem.

A densidade aparente da madeira na faixa de 33 a 66%, explicou melhor a média do raio total dos discos. A localização intermediária entre extremos de valores dessa propriedade, sendo esta faixa de amostragem uma área de transição entre os baixos valores de densidade na região da medula e altos valores próximo a casca. Vale destacar que o maior incremento de densidade ocorre nos anos iniciais (ALMEIDA, 2021), embora haja variações no incremento de densidade até os 6 anos como observado na madeira de *Eucalyptus nitens* (SALVO et al., 2017).

As variações observadas nas faixas de amostragem em relação à média do perfil total estão ligadas a idade de formação da madeira. Essa formação de madeira juvenil é uma das fontes mais importantes de variação entre e intra árvores, e caracteriza-se por um núcleo central ao redor da medula da árvore ao topo, acompanhando o crescimento da copa (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989). Os valores de frequência, superestimados na posição de 0 a 33% (Figura 4), podem ser correlacionados com a concentração de reguladores de crescimento, como auxina. A alta concentração de auxina, principais componentes que regulam as divisões das células do câmbio, pode produzir madeira com grande quantidade de vasos (ALONI, 2021), porém tende a diminuir com o aumento da idade, efeito também observado na faixa de 66 a 100%, onde há subestimação da frequência e condutividade (Figura 4).

O comportamento radial dos elementos celulares pode ocorrer caracteristicamente em muitas espécies (BOUSLIMI; KOUBAA; BERGERON, 2019; MARTINS et al., 2020; MOYA et al., 2009; PALERMO et al., 2015) e é produzido pelo envelhecimento das células cambiais que levam a modificações na estrutura dos elementos que compõem a madeira, por isso essa variação de vasos e fibras observadas em eucalipto, independe do sítio.

A adoção de uma faixa de amostragem ao longo do raio dos discos viabiliza e otimiza a determinação das propriedades da madeira requeridas pelo setor florestal e madeireiro, contudo, é necessário combinar método e posições/faixas de

amostragem confiáveis e precisas para que as informações e estimativas das propriedades ao longo do raio total e diâmetro sejam representativas. Considerar a idade e os estágios de formação da madeira são importantes fatores na variação das propriedades da madeira de eucalipto e devem ser considerados na estratégia de amostragem.

5. CONCLUSÃO

A amostragem na faixa de 33 a 66% do raio representa de forma satisfatória a média geral da densidade aparente, comprimento e espessura da parede das fibras e diâmetro dos vasos da madeira de *E. urophylla* e *E. grandis* aos 6 anos.

As amostragens próximas as extremidades (0 a 33 e 66 a 100%) e pontos fixos (cerne periférico e alburno periférico) possuem maior variação dos dados, decorrente da posição ou tamanho da amostra.

A amostragem na faixa 33 a 66% do raio total é um método prático que abrange diferentes diâmetros, sem necessidade de uma preparação da amostra para visualização dos lenhos (inicial ou tardio) e/ou cerne e alburno. Assim podendo diminuir custos no transporte, diminuir espaços para armazenamentos de amostragens de raio total.

6.REFERÊNCIAS

AISO-SANADA, H. et al. Effects of thinning on anatomical characteristics and wood properties of 12-year-old *Eucalyptus camaldulensis* trees planted in Thailand. **Tropics**, v. 28, n. 3, p. 67–73, 2019.

ALONI, R. The control of tracheid size, vessel widening and density along the plant axis. In: ALONI, R. **Vascular differentiation and plant hormones**. Suíça: Springer, 2021. p. 223–235.

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

BOBADILHA, G. S. et al. Effect of defoliator insect on growth and wood properties of eucalypt trees. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 5, p. 861–868, 2019.

BOSCHETTI, W. T. N.; VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M. Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. In: VIDAURRE, G. B. et al. **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Edufes: Vitória. 2020. p. 221.

BOUSLIMI, B.; KOUBAA, A.; BERGERON, Y. Intra-ring variations and

interrelationships for selected wood anatomical and physical properties of *Thuja occidentalis* L. **Forests**, v. 10, n. 339, p. 1–18, 2019.

BUENO, I. G. A. et al. Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance. **Current Plant Biology**, v. 22, n. 100136, 2020.

CÂMARA, A. P. et al. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118380, 2020.

CARNEIRO, M. F. **Qualidade da madeira de clones de eucalipto utilizados para produção de celulose**. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.

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*. **Ciencia Florestal**, v. 27, n. 3, 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*. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2020.

DADSWELL, H. E. The anatomy of Eucalypt Woods. **Division of applied chemistry technological paper**. Melbourne, 1972.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties**. Melbourne: CSIRO publishing. 1997.

FAJARDO, A. et al. Stem length, not climate, controls vessel diameter in two trees species across a sharp precipitation gradient. **New Phytologist**, v. 225, n. 6, p. 2347–2355, 2020.

FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 250p.

GRIL, J. et al. Tree growth stress and related problems. **Journal of Wood Science**, v. 63, n. 5, p. 411–432, 2017.

MARTINS, G. S. et al. Wood and pulping properties variation of *Acacia crassicaarpa* a.Cunn. ex Benth. and sampling strategies for accurate phenotyping. **Forests**, v. 11, n. 1043, p. 1–20, 2020.

MCELDRONE, A. J. et al. Variation in xylem structure and function in stems and roots of trees to 20 m depth. **New Phytologist**, v. 163, n. 3, p. 507–517, 2004.

MEDEIROS, J. S.; POCKMAN, W. T. Freezing regime and trade-offs with water transport efficiency generate variation in xylem structure across diploid populations of *Larrea* sp. (Zygophyllaceae). **American Journal of Botany**, v. 101, n. 4, p. 598–607, 2014.

MENUCELLI, J. R. et al. Potential of *Hevea brasiliensis* clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* wood as raw materials for bioenergy based on higher heating value. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 992–999, 2019.

- MOYA, R. et al. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. **Investigacion Agraria Sistemas y Recursos Forestales**, v. 18, n. 2, p. 119–131, 2009.
- OHSHIMA, J. et al. Representative heights for assessing whole-tree values of cell-type proportions in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus*. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 885–900, 2020.
- OLSON, M. et al. Xylem vessel-diameter–shoot-length scaling: ecological significance of porosity types and other traits. **Ecological Monographs**, n. e01410, p. 1–32, 2020.
- PÁDUA, F. A. et al. Recommendation of non-destructive sampling method for density estimation of the Eucalyptus wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 21, n. 4, p. 565–572, 2019.
- PALERMO, G. P. D. 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.
- PÉREZ-PEÑA, N. et al. Variation of perpendicular compressive strength properties related to anatomical structure and density in *Eucalyptus nitens* green specimens. **BioResources**, v. 15, n. 1, p. 987–1000, 2020.
- PFAUTSCH, S. et al. Climate determines vascular traits in the ecologically diverse genus *Eucalyptus*. **Ecology Letters**, v. 19, n. 3, p. 240–248, 2016.
- PIRRALHO, M. et al. Evaluation on paper making potential of nine *Eucalyptus* species based on wood anatomical features. **Industrial Crops and Products**, v. 54, p. 327–334, 2014.
- PRASETYO, A. et al. Variations in anatomical characteristics and predicted paper quality of three *Eucalyptus* species planted in Indonesia. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 6, p. 1409–1423, 2019.
- ROCHA, S. M. G. et al. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020.
- SALVO, L. et al. Radial variation of density and anatomical features of *Eucalyptus nitens* trees. **Wood and Fiber Science**, v. 49, n. 3, p. 301–311, 2017.
- SCOLFORO, H. F. et al. Yield pattern of eucalypt clones across tropical Brazil: An approach to clonal grouping. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 30–39, 2019.
- SETTE JUNIOR, C. R. et al. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Arvore**, v. 36, n. 6, p. 1183–1190, 2012.
- SILVA, G. F. et al. Análise da influência de diferentes tamanhos e composições de amostras no ajuste de uma relação hipsométrica para *Eucalyptus grandis*. **Revista Arvore**, v. 31, n. 4, p. 685–694, 2007.

SURDI, P. G. et al. Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 229–236, 2014.

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

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207–222, 2003.

VEGA, M. et al. Radial variation in modulus of elasticity, microfibril angle and wood density of veneer logs from plantation-grown *Eucalyptus nitens*. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 65, p. 1–15, 2020.

ZAQUE, L. A. M.; FERREIRA, M. D.; MELO, R. R. Variação radial e longitudinal da massa específica básica da madeira de *Araucaria angustifolia* com diferentes idades. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, n. 201601368, p. 1–5, 2018.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. VAN. **Wood variation its causes and control**. Berlin: Springer. 1989. 325p.

7. APÊNDICE

AMER, M. et al. Determination of growth stresses indicator, moisture profiles and basic density of clonal eucalyptus wood. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v. 14, n. 1, p. 91–98, 2017.

AMER, M. et al. Experimental Study of the Linear Diffusion of Water in Clonal Eucalyptus Wood. **International Journal of Thermophysics**, v. 41, n. 10, p. 1–17, 2020.

BALDIN, T. et al. Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de Eucalyptus L'Hér. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 8, n. 2, p. 114–126, 2017.

BAROTTO, A. J. et al. Wood density and anatomy of three Eucalyptus species: implications for hydraulic conductivity. **Forest Systems**, v. 26, n. a, p. 1–10, 2017a.

BAROTTO, A. J. et al. Functional relationships between wood structure and vulnerability to xylem cavitation in races of Eucalyptus globulus differing in wood density. **Tree Physiology**, v. 38, n. 2, p. 243–251, 2017b.

BOBADILHA, G. S. et al. Effect of defoliator insect on growth and wood properties of eucalypt trees. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, n. 5, p. 861–868, 2019.

BOSCHETTI, W. T. N. et al. Parâmetros dendrométricos e excentricidade da medula em árvores inclinadas de eucalipto. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 108, p. 781–789, 2015.

BUENO, I. G. A. et al. Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance. **Current Plant Biology**, v. 22, n. 100136, 2020.

CÂMARA, A. P. et al. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118380, 2020.

CARRILLO-VARELA, I. et al. An evaluation of fiber biometry and nanomechanical properties of different eucalyptus species. **BioResources**, v. 14, n. 3, p. 6433–6446, 2019.

CARRILLO, I. et al. Variations in wood anatomy and fiber biometry of eucalyptus globulus genotypes with different wood density. **Wood Research**, v. 60, n. 1, p. 1–10, 2015.

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, n. 1, p. 1–9, 2020.

CHERELLI, S. G. et al. Heartwood and sapwood in eucalyptus trees: Non-conventional approach to wood quality. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 1, p. 425–438, 2018.

COSTA, E. V. S. et al. Influence of spectral acquisition technique and wood

anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 26, n. 2, p. 106–116, 2018a.

COSTA, L. J. et al. Correlation between compression strength parallel of wood and charcoal of Eucalyptus clones Correlação entre a resistência à compressão paralela da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus . **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 120, p. 606–613, 2018b.

COSTA, S. E. DE L. 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. 117807, p. 1–12, 2020.

DAWSON, B. S. W. et al. Effect of supercritical CO₂ treatment and kiln drying on collapse in Eucalyptus nitens wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 2, p. 209–217, 2020.

DICKSON, A.; DAWSON, B. Using cell cross-section dimensions and digital image correlation to evaluate drying shrinkage and collapse in eucalyptus nitens wood. **BioResources**, v. 15, n. 3, p. 6149–6164, 2020.

ESPINOZA-HERRERA, R. et al. Study of thermal expansion and compression strength of three wood species from plantations. **Cerne**, v. 26, n. 2, p. 256–264, 2020.

FERNÁNDEZ, M. E. et al. New insights into wood anatomy and function relationships: How Eucalyptus challenges what we already know. **Forest Ecology and Management**, v. 454, 2019.

HEIN, P. R. G. et al. Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along Eucalyptus trunks grown under contrasting growth conditions. **Trees - Structure and Function**, v. 30, n. 3, p. 871–882, 2016.

ISHIGURI, F. et al. Among-family variations of solid wood properties in 4-year-old Eucalyptus camaldulensis trees selected for pulpwood production in Thailand. **International Wood Products Journal**, v. 8, n. 1, p. 36–40, 2017.

KNAPIC, S. et al. Juvenile wood characterization of Eucalyptus botryoides and E. maculata by using SilviScan. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 2342–2355, 2018.

LUNDQVIST, S. O. et al. Comparison of wood, fibre and vessel properties of drought-tolerant eucalypts in South Africa. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 215–225, 2017.

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

MELO, L. E. DE L. et al. Prediction of microfibril angle for eucalyptus microcorys wood by fiber length and basic density. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 20, n. 4, p. 553–562, 2018.

MENUCELLI, J. R. et al. Potential of Hevea brasiliensis Clones, Eucalyptus pellita and Eucalyptus tereticornis Wood as Raw Materials for Bioenergy Based

- on Higher Heating Value. **Bioenergy Research**, v. 12, n. 4, p. 992–999, 2019.
- NAKAHAMA, K. et al. RNA-seq analysis of lignocellulose-related genes in hybrid Eucalyptus with contrasting wood basic density. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 1–12, 2018.
- OLIVEIRA, R. G. E. et al. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla glulam. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 22, n. 4, p. 495–504, 2020.
- PÁDUA, F. A. et al. Recommendation of non-destructive sampling method for density estimation of the Eucalyptus wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 21, n. 4, p. 565–572, 2019.
- PALERMO, G. P. D. 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.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Effect of wood carbonization in the anatomical structure and density of charcoal from Eucalyptus. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545–557, 2016.
- PÉREZ-PEÑA, N. et al. Simulation of Drying Stresses in Eucalyptus nitens Wood. **BioResources**, v. 13, n. 1, p. 1413–1424, 2018.
- PRASETYO, A. et al. Variations in anatomical characteristics and predicted paper quality of three Eucalyptus species planted in Indonesia. **Wood Science and Technology**, v. 53, n. 6, p. 1409–1423, 2019.
- RAMOS, D. C. et al. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for metallurgical use. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. Specialissue2, 2019.
- RESQUIN, F. et al. Influence of contrasting stocking densities on the dynamics of above-ground biomass and wood density of Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii, and Eucalyptus grandis for bioenergy in Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 438, n. September 2018, p. 63–74, 2019.
- RESQUIN, F. et al. Influence of age and planting density on the energy content of Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii and Eucalyptus grandis planted in Uruguay. **New Forests**, v. 51, n. 4, p. 631–655, 2020.
- ROCHA, S. M. G. et al. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020.
- RODRIGUES, P. M. DE M. et al. Characterization of Schizolobium parahyba (Vell.) S.F. Blake and Eucalyptus urophylla S.T. Blake juvenile wood in Brazilian Savanna soil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 539–547, 2018.
- SERENINI JUNIOR, L. et al. Wood quality of six Eucalyptus clones planted in Northern Mato Grosso State, Brazil. **Wood Research**, v. 65, n. 4, p. 543–554, 2020.
- SETTE JR, C. R. et al. Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of Eucalyptus grandis W. Mill ex Maiden trees. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 337–346, 2016.

SHARMA, S. K. et al. Axial variations in anatomical properties and basic density of *Eucalypt urograndis* hybrid (*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*) clones. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 3, p. 739–744, 2015.

SOARES, B. C. D. et al. Behavior of Juvenile and Mature *Eucalyptus cloeziana* Wood Subjected to Drastic Drying. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, 2019.

SOUZA, T. S. et al. Polyploidy as a strategy to improve the industrial quality of eucalypt wood. **Wood Science and Technology**, v. 55, n. 1, p. 181–193, 2021.

SSEREMBA, O. E. et al. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 2, p. 503–512, 2021.

TREVISAN, R. et al. Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden fiber. **Ciencia Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1385–1393, 2017.

VEGA, M. et al. Radial variation in modulus of elasticity, microfibril angle and wood density of veneer logs from plantation-grown *Eucalyptus nitens*. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 65, p. 1–15, 2020.

WERDIN, J. et al. Biochar made from low density wood has greater plant available water than biochar made from high density wood. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135856, 2020.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Artificial Neural Networks As a New Tool for Assessing and Monitoring Wood Moisture Content. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 543–549, 2016.

ZANUNCIO, A. J. V. et al. Characterization of eucalyptus clones subject to wind damage. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 52, n. 11, p. 969–976, 2017.

CONCLUSÕES GERAIS

Sítios com menor volume de chuvas no período seco tendem a aumentar a densidade do lenho tardio, e em casos extremos diminuir o crescimento radial desse lenho. A amplitude entre as densidades dos clones de eucalipto aumenta conforme a elevação sazonalidade dos sítios. Entretanto, com a ponderação da densidade da madeira obtida na densitometria de raios x, as médias anuais são similares. O uso da larguras dos lenhos e do crescimento radial anual permite explicar a biomassa do caule para os dois clones avaliados.

A maior sazonalidade de chuvas provocou 5 vezes menos vulnerabilidade a cavitação na madeira de arvores que cresceram sob menor sazonalidade, para o *E. urophylla* – G7. O lenho inicial tem o 2 vezes mais condutividade hidráulica que o lenho tardio. Além da espessura de parede das fibras, a densidade aparente pode ser explicada pela largura do anel de crescimento e condutividade hidráulica potencial.

A amostragem na faixa de 33 a 66% do raio representa de forma satisfatória a média geral da densidade aparente, comprimento e espessura da parede das fibras e diâmetro dos vasos da madeira de *E. urophylla* – G7e *E. grandis* – Q8.