



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

LOURDES MARIA HILGERT SANTOS

**ALTERAÇÕES DO CERNE E DA DENSIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM
FUNÇÃO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

LOURDES MARIA HILGERT SANTOS

**ALTERAÇÕES DO CERNE E DA DENSIDADE DA MADEIRA DE EUCALIPTO EM
FUNÇÃO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do título de mestra em Ciências Florestais na área de concentração Ciências Florestais.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientadores: Gilson Fernandes da Silva e Paulo Ricardo Gherardi Hein.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2019

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

S237a Santos, Lourdes Maria Hilgert, 1992-
Alterações do cerne e da densidade da madeira de eucalipto
em função da idade e do espaçamento de plantio / Lourdes Maria
Hilgert Santos. - 2019.
48 f. : il.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre.

Coorientadores: Gilson Fernandes da Silva, Paulo Ricardo
Gherardi Hein.

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

1. Formação do cerne. 2. Idade das árvores. 3. Taxas de
crescimento. 4. Densitometria de raios X. 5. Tilose. I. Vidaurre,
Graziela Baptista. II. Silva, Gilson Fernandes da. III. Hein,
Paulo Ricardo Gherardi. IV. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630

**ALTERAÇÕES DO CERNE E DA DENSIDADE DA MADEIRA DE
EUCALIPTO EM FUNÇÃO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO**

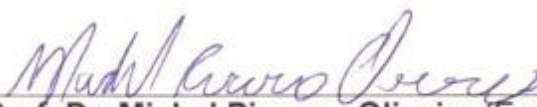
Lourdes Maria Hilgert Santos

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

Aprovada em 28 de fevereiro de 2019.



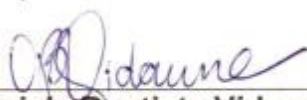
Prof. Dr. Antônio José Vinha Zanuncio (Examinador externo)
Universidade Federal de Uberlândia



Prof. Dr. Michel Picanço Oliveira (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo



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

*Dedico às pessoas
que são a base da minha vida,
meu porto seguro,
razão da minha existência:
minha família.
Pai, mãe e irmão,
amo vocês!*

AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradeço a Deus e à Nossa Senhora Aparecida, pelo dom da vida e por todas as bênçãos e proteção ao longo da minha caminhada.

Agradeço à minha família: ao meu pai, José Ubaldo dos Santos; à minha mãe, Alicia Maria Hilgert Santos; e ao meu irmão, Lucas Hilgert Santos, por todo apoio e incentivo ao longo desse período. Não sei o que seria de mim sem vocês, gratidão por tudo!

À minha vó, Maria de Lourdes, e à toda a família Santos, pelo acolhimento nos dias em que fui até Montanha (ES). Eram mais de dez anos sem visitá-los em razão dos 3300 km de distância, mas que foram um pouco compensados durante esses dois anos.

Agradeço à UFES, ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL/UFES), pela oportunidade de cursar o mestrado e pela estrutura disponível para realização da pesquisa.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À minha orientadora, prof.^a Dra. Graziela Baptista Vidaurre, por contribuir com meu crescimento profissional e compartilhar suas experiências, pela confiança no meu trabalho e pelas inúmeras correções e sugestões na dissertação.

Aos coorientadores, prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva e prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein, pelas sugestões e contribuições durante a execução da pesquisa para melhoria do trabalho.

Ao prof. Dr. Michel Picanço Oliveira, por apresentar o confocal e oportunizar a análise na UENF, por aceitar participar da banca examinadora e pelas contribuições para melhoria do trabalho.

Ao prof. Dr. Antônio José Vinha Zanuncio, por aceitar participar da banca examinadora e pelas contribuições para melhoria do trabalho.

À Suzano S.A., unidade Aracruz (ES), pela disponibilidade do material de pesquisa, pela parceria com a UFES e pela experiência e oportunidade que me proporcionaram de participar da coleta de 76 meses. Agradecimento especial ao pesquisador Eduardo Campinhos, por ter sido esse parceiro ao longo da realização do experimento e por disponibilizar todas as informações solicitadas ao longo da pesquisa; à toda equipe do Centro de Tecnologia e da PRETOP, Carlos Forechi, Edson Pereira, José Antônio Roela, Marcos Vassoler, Joel, Thiago, Joelio, Brener, Lucimar e Jaci; e a todos os colaboradores que participaram das coletas anteriores.

Ao professor Mário Tomazello Filho, por sempre disponibilizar os equipamentos, materiais e estrutura do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira (LAIM-ESALq), para avaliação da densidade aparente da madeira; e à toda a equipe do laboratório, pela acolhida durante as cinco semanas em que estive no LAIM: Aparecido; Maria; Manolo; Luciana; Luís; Bruna; Ricardo; Roger; Alci; Alessandra; Alline; Carolina e Rosane.

A Jéfferson Costa e Fernando Hurtado, pela estadia nas cinco semanas em que fiquei em Piracicaba para análise do material de pesquisa, e ao professor Ananias Dias Júnior, por conseguir a estadia com os meninos.

Agradeço a Clayton Vieira Fraga Filho, pelo suporte na modelagem dos dados de crescimento.

Ao professor Paulo Cezar Cavatte, pela disponibilidade de uso do equipamento Medidor de Área Foliar do Laboratório de Botânica I (LaBot-UFES), e aos alunos Josimar, Jéssica, Thales, Renan e Jhenifer. Agradeço, também, ao professor José Eduardo Macedo Pezzopane e à Genilda Amaral, por repassar o contato do LaBot.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e à prof. Dr. Marcia Giardinieri de Azevedo do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV-UENF), pela disponibilidade de uso do microscópio confocal.

À amiga Maria Naruna Felix, pela amizade e ótima convivência. Agradeço toda a sua ajuda ao longo dessa pesquisa, as correções, contribuições e dicas durante a escrita da dissertação. Obrigada, de coração, por tudo que fez por mim!

À amiga Rita de Cássia Freire, pela amizade e ótima convivência.

À amiga Quétilla Souza, pela amizade e por ter sido tão presente no meu dia a dia.

Agradeço ao amigo João Gabriel Missia, pela amizade, parceria, incentivo, respeito, preocupação, conselhos, troca de conhecimentos, e por todo o apoio no decorrer dessa pesquisa.

À Daniela Minini, Luiz Otávio Cancio, Gabriela Amorim, Alexa Barglini, Jean Carlos Oliveira e Ana Paula Câmara, pelas ajudas ao longo dessa pesquisa.

A Jéferson Martins, Evandro Ferreira e Quinny Rocha, do Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal (LaMFlor-UFES), pelas dúvidas esclarecidas sobre modelagem e crescimento.

Aos colegas do Núcleo de Pesquisa em Qualidade da Madeira (NUQMAD), pela troca de conhecimentos e experiências.

Ao Café da Qualidade, pelas conversas descontraídas nos intervalos.

Aos colegas do PPGCFL/UFES.

A Elecy Constantino, técnico da marcenaria, por todos os serviços prestados para execução das nossas pesquisas, por idealizar e confeccionar os suportes que tanto auxiliaram nas minhas análises.

Aos técnicos de laboratório da UFES, Luciano Dias, Damielle Figueiredo e José Geraldo Oliveira, pela ajuda no preparo de material.

Aos demais funcionários do DCFM.

Agradeço à Márcia Carneiro, Glaucileide Ferreira, Stefania Pimentel, Alice Brito e Mariana Morelli pela convivência nas repúblicas.

À população de Jerônimo Monteiro, pela acolhida. Em especial, Izonete Pereira e família; Sr. Dair e família; Sr. João e família; Dona Nery e família; Kamilla Picanço, Lara Gomes, Lili Gandine, Letycia Cateim e Carla Cateim, pelo carinho.

Aos amigos de Rondônia (Mariane Kuhn Ribeiro; Wesclley Ribeiro; tia Cristina Kuhn; tio João Augusto Kuhn; Andressa Gregolin; Edinelia Roos; Raquel Felberg; Sheila Becker; Ana Shaura Pinheiro; Carla Zarranz e Leonardo Silva), pelos incentivos proferidos a cada troca de mensagens e por acompanharem de longe essa trajetória.

A todos que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis enfrentados nesses dois anos: muito obrigada!

BIOGRAFIA

LOURDES MARIA HILGERT SANTOS, filha de José Ubaldo dos Santos e Alicia Maria Hilgert Santos, nasceu em 25 de fevereiro de 1992, no município de Morretes, estado do Paraná.

Concluiu o ensino médio em 2008, na Escola Monteiro Lobato, em Espigão do Oeste, Rondônia.

Em julho de 2009, ingressou na primeira turma do curso de Engenharia Florestal da Fundação Universidade Federal de Rondônia, Campus Rolim de Moura, e concluiu a graduação em julho de 2014.

Atuou profissionalmente como analista de controles na empresa Amata S.A., em sua Operação Jamari no estado de Rondônia, entre fevereiro de 2015 e março de 2016, e foi bolsista de desenvolvimento tecnológico industrial (nível C) na Embrapa Rondônia, entre abril de 2016 e fevereiro de 2017.

Em março de 2017, iniciou o curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo, desenvolvendo seus estudos na Linha de Pesquisa de Produtos Florestais, área de concentração Qualidade da Madeira, obtendo o título de mestra em Ciências Florestais em fevereiro de 2019.

“Sem sonhos, a vida não tem brilho.
Sem metas, os sonhos não têm alicerces.
Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais.”
(Augusto Cury)

“Por você, o sol nasce, por você, as flores se abrem, os
rios desaguam, as aves retomam o céu...
Por você, Deus fez o universo, e cada detalhe pensou
para te fazer feliz.
Observe. Respire. Agradeça. Viva.
Você não está aqui por acaso...!”
(Sirlei Lima)

RESUMO

SANTOS, Lourdes Maria Hilgert. **Alterações do cerne e da densidade da madeira de eucalipto em função da idade e do espaçamento de plantio**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientadora: Prof.^a Dra. Graziela Baptista Vidaurre. Coorientadores: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva e Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Uma das formas de diferenciação do lenho das árvores é a presença de cerne e alburno. O objetivo deste estudo foi analisar as alterações do cerne e da densidade da madeira de eucalipto em diferentes idades e espaçamentos de plantio. Árvores do clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* plantadas em três espaçamentos (3x1, 3x2 e 3x3 m) foram amostradas em seis idades diferentes (14, 27, 32, 53, 64 e 76 meses). Para quantificação do cerne, foi realizada a média ponderada do volume de cerne obtida pela mensuração da área total e de cerne dos discos ao longo do fuste das árvores. A densidade aparente da madeira do cerne e do alburno foi determinada pela densitometria de raios X. Porcentagem, volume e densidade do cerne, e densidade da madeira foram correlacionados com as diferentes taxas de crescimento. O início do processo de cernificação foi verificado entre 32 e 53 meses de idade, independente do espaçamento, com o uso do indicador *Dimethyl yellow* e pela presença de vasos obstruídos por tilos. A proporção de cerne dobrou com o aumento da idade no maior espaçamento e aumentou cerca de quatro vezes nos espaçamentos de 3x1 m e 3x2 m. Os espaçamentos de plantio influenciaram as taxas de crescimento do plantio (diâmetro, altura total e volume), mas não foi observada diferença estatística entre a porcentagem de cerne e o aumento da área útil. O maior incremento em densidade ocorreu entre o primeiro ano de crescimento (14 meses) e o início da cernificação (53 meses), e, posteriormente, até 76 meses o incremento foi menor. A variação no espaçamento de plantio resultou em pequenos acréscimos na densidade, com a formação de madeira mais densa em maior área útil. Não houve um padrão de variação na densidade de cerne e alburno entre as idades e os espaçamentos de plantio. A avaliação anual permitiu identificar a idade que iniciou a formação do cerne e os incrementos em densidade da madeira de eucalipto.

Palavras-chave: formação do cerne; idade das árvores; taxas de crescimento; densitometria de raios X; tilose.

ABSTRACT

SANTOS, Lourdes Maria Hilgert. **Changes in heartwood and density of eucalyptus wood as a function of age and planting spacings**. 2019. Dissertation (Masters in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jeronimo Monteiro, ES. Advisor: Graziela Baptista Vidaurre. Co-orientators: Gilson Fernandes da Silva e Paulo Ricardo Gherardi Hein.

One of the forms of differentiation of the wood of the trees is the presence of heartwood and sapwood. The aim of this study was to analyze changes in the heartwood and density of eucalyptus wood at different ages and planting spacings. Trees of the *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* clone planted in three spacing (3x1, 3x2 and 3x3 m) were sampled at six different ages (14, 27, 32, 53, 64 and 76 months). For quantification of the heartwood, the weighted average of the heartwood volume obtained by measuring the total area and heartwood of the discs along the stem of the trees was performed. The apparent density of the wood of heartwood and sapwood was determined by X-ray densitometry. Percentage, volume and density of the heartwood, and density of the wood were correlated with the different growth rates. The beginning of the process of cernification was verified between 32 and 53 months of age, regardless of spacing, with the use of the Dimethyl yellow indicator and the presence of vessels obstructed by tylos. The proportion of heartwood doubled with increasing age in the largest spacing and increased about four times in the 3x1 m and 3x2 m spacings. The planting spacings influenced growth rates (diameter, total height and volume), but there was no statistical difference between the percentage of heartwood and the increase in the useful area. The greatest increment in density occurred between the first year of growth (14 months) and the beginning of the cernification (53 months), and posteriorly up to 76 months the increment was smaller. The variation in planting spacing resulted in small increases in density, with the formation of denser wood in a larger useful area. There was no pattern of variation in heartwood and sapwood density between the ages and planting spacings. The annual evaluation made it possible to identify the age that started the formation of the heartwood and the increments in density of eucalyptus wood.

Keywords: heartwood formation; trees age; growth rates; X-ray densitometry; tylose.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3	HIPÓTESE	14
4	REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE CERNE E ALBURNO.....	15
4.2	O PROCESSO DE CERNIFICAÇÃO NA MADEIRA	17
4.3	PROPRIEDADES DA MADEIRA DO CERNE E DO ALBURNO	20
5	METODOLOGIA	23
5.1	DESCRIÇÃO E AMOSTRAGEM DO MATERIAL EXPERIMENTAL	23
5.2	QUANTIFICAÇÃO DE CERNE NA MADEIRA.....	24
5.3	MICROSCOPIA CONFOCAL	25
5.4	DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA	25
5.5	CRESCIMENTO DAS ÁRVORES	21
5.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	22
6	RESULTADOS	23
6.1	FORMAÇÃO DO CERNE NA MADEIRA.....	23
6.2	EFEITO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO NA FORMAÇÃO DO CERNE.....	25
6.3	EFEITO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO NA DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA.....	26
6.4	DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA DO CERNE E DO ALBURNO	28
6.5	CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E SUA CORRELAÇÃO NA FORMAÇÃO DO CERNE E NA DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA	29
7	DISCUSSÃO	32
8	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O tronco das árvores é constituído por diferentes tipos de madeira, e alterações na formação das células pelo câmbio são influenciadas por fatores internos, como a idade, e externos, como as condições de crescimento (PLOMION; LEPROVOST; STOKES, 2001). Uma das formas de diferenciação macroscópica da madeira é a presença de cerne e alborno, verificada na maioria das espécies pela diferença de coloração que ocorre devido à cernificação, processo de transformação de alborno em cerne (BAMBER, 1987). Esse processo altera as características e funções específicas do alborno na árvore, de modo que a maior presença de cerne na madeira influencia a sua utilização e afeta a sua uniformidade (HILLIS, 1987).

A porcentagem de cerne na madeira de eucalipto varia entre espécies, materiais genéticos, idades, espaçamentos de plantio, classes diamétricas das árvores, taxas de crescimento e condições ambientais (GOMINHO; PEREIRA, 2000, 2005; GOMINHO et al., 2001; ARANTES, 2009; CASTRO et al., 2016; CHERELLI et al., 2018; BARBOSA et al., 2019; BRITO et al., 2019; ALMEIDA et al., 2020). A proporção de cerne e de alborno em uma árvore influencia a qualidade da polpa celulósica (MIRANDA et al., 2007), a produção de carvão vegetal (PEREIRA et al., 2013), o uso de produtos preservativos empregados nas indústrias de tratamento de madeira (VALLE et al., 2013), e a secagem da madeira devido à impregnação dos vasos por tilos (SILVA; TRUGILHO, 2003). Apesar dos impactos da proporção de cerne no uso da madeira, o processo de cernificação ainda é pouco estudado na madeira de eucalipto de plantações de rápido crescimento no Brasil.

A densidade é a propriedade mais utilizada e de fácil obtenção que influencia a qualidade dos produtos à base de madeira. A determinação da densidade do cerne e do alborno de eucalipto, individualmente, auxilia na otimização da indústria madeireira e pode contribuir nas tomadas de decisão da idade de corte. A idade e o espaçamento de plantio influenciam a proporção de cerne e a densidade da madeira. Contudo, informações sobre a idade em que se inicia a formação do cerne, o efeito do espaçamento de plantio na cernificação e a variabilidade anual das propriedades tanto do cerne quanto do alborno ainda são pouco conhecidas em *Eucalyptus*. Conhecer a periodicidade da transformação do alborno em cerne e a quantidade que é formada com a idade, e as condições de crescimento das árvores auxilia nos conhecimentos sobre a formação da madeira e sua utilização de forma mais racional nas indústrias de base florestal.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as alterações do cerne e da densidade da madeira de eucalipto em função da idade e do espaçamento de plantio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a formação e a porcentagem de cerne ao longo do tronco da árvore, em função da idade e do espaçamento de plantio.
- Determinar a densidade da madeira do cerne e do alburno, e analisar o acréscimo dos valores com a idade nos diferentes espaçamentos de plantio.
- Estabelecer uma relação funcional entre as taxas de crescimento na formação do cerne e na variação da densidade da madeira.

3 HIPÓTESE

A influência da idade e do espaçamento de plantio nas taxas de crescimento das árvores interfere na formação e quantificação do cerne e na variação dos valores de densidade aparente da madeira do cerne e do alburno de eucalipto.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE CERNE E ALBURNO

O lenho de uma árvore é constituído por diferentes tipos de madeira, e uma das formas de diferenciação é a presença de cerne e alburno. O alburno é definido como “a porção da madeira que contém células vivas e materiais de reserva na árvore viva” (IAWA, 1964, p. 20), e o cerne como “a camada interna de madeira que deixa de conter células vivas durante o crescimento da árvore, sendo os materiais de reserva removidos ou convertidos em extrativos” (IAWA, 1964, p. 9).

O alburno desenvolve três funções principais na árvore viva: suporte, condução e armazenamento. O suporte é fornecido pelos traqueídeos em Gimnospermas (coníferas) e pelas fibras em Angiospermas (folhosas). A condução de água e sais minerais das raízes para as folhas ocorre por meio dos traqueídeos nas coníferas e através dos elementos de vaso nas folhosas. Além disso, o alburno armazena reservas originadas dos açúcares produzidos pela fotossíntese nas folhas, os quais são transformados em grãos de amido nas células parenquimáticas (BAMBER, 1987).

Em contraste com o alburno, o cerne não contém células vivas, não conduz água e nem armazena materiais de reserva, exerce apenas a função de suporte estrutural para a maioria das árvores. Sugere-se que a formação do cerne ocorre somente para manter o equilíbrio nutricional da parte viva da árvore, regulando um nível ótimo de alburno (BAMBER, 1976).

Geralmente, o cerne apresenta uma coloração mais escura que o alburno, embora em muitas espécies nem sempre seja possível observar essa diferença de cor (IAWA, 1964). O alburno é formado por células funcionais de coloração mais clara, que quando se tornam inativas passam a conter óleos, resinas, gomas e/ou compostos fenólicos, substâncias que são frequentemente responsáveis pela coloração mais escura do cerne (COSTA et al., 2006).

Em seções transversais pode ser observada uma zona que limita esses dois lenhos, com características distintas do cerne e do alburno. A “zona de transição” é definida como uma zona estreita e de cor pálida em torno do cerne, que contém células vivas desprovidas de amido e impermeáveis a líquidos, e apresenta teor de umidade variado. Em determinadas espécies não é possível observar a presença dessa zona de transição (HILLIS, 1987).

A demarcação do limite entre cerne e albarno por diferença da coloração natural representa um processo conveniente, mas define o cerne como uma área onde os extrativos estão presentes, e não como uma região onde houve a morte das células de parênquima, o que pode confundir a visualização correta da área de cerne em fase inicial de formação (CHERELLI et al., 2018).

As mudanças na zona de transição ao longo do tempo podem delinear melhor “a estação de desenvolvimento do cerne” do que a atividade do xilema (TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002). Assim, outras características devem ser consideradas na quantificação de cerne e albarno em uma árvore como, por exemplo, detectar amido na madeira indica região de albarno, e o aumento da acidez no lenho evidencia a presença de cerne. Essas são análises pouco divulgadas que podem contribuir com mais conhecimentos sobre o processo de cernificação.

Algumas técnicas colorimétricas facilitam a diferenciação desses dois tipos de madeira (CHERELLI, 2015), por meio do uso de produtos químicos para realçar a mudança de coloração do cerne. São eles: amarelo de metila, alaranjado de metila, iodeto de potássio, azul de bromocresol, vanilina sulfúrica, cloreto férrico e nitrato de prata (BAMBER, 1987). Técnicas de varredura de raios X, infravermelho e raios gama também são utilizadas para quantificar cerne no tronco de uma árvore (GOMINHO, 2003). Essas técnicas alternativas auxiliam a quantificação de cerne e de albarno na madeira das diversas espécies.

O amarelo de metila (*Dimethyl yellow*) demonstra ser um bom indicador de acidez na madeira de *Eucalyptus grandis*. Esse corante possibilitou a delimitação da região do xilema funcional (albarno) e não funcional (cerne), marcando o cerne com tonalidade vermelho-róseo, por ser a região com pH mais baixo; e o albarno, com uma coloração amarelada em razão do seu maior pH (CASTRO, 2014). A coloração de amostras de madeira de clones de *Eucalyptus* com iodeto de potássio não permitiu a distinção entre frações de cerne e de albarno dos materiais avaliados com dois, quatro e seis anos de idade (CHERELLI, 2015).

O cerne apresenta menor teor de umidade devido à redução da atividade fisiológica (GJERDRUM, 2013). A variação do teor de umidade do cerne é de 33% a 98%, e do albarno, de 44% a 249%, comparando um grupo de espécies de coníferas e de folhosas (SHMULSKY; JONES, 2011). Esses dados mostram que as diferenças no teor de umidade entre albarno e cerne das madeiras de angiospermas são menores do que nas gimnospermas, destacando que essa característica também é variável entre os indivíduos de ambas as espécies.

A durabilidade natural do alburno geralmente é mais baixa, tornando-o mais suscetível a deterioração. Todavia, o alburno apresenta maior permeabilidade associada à facilidade de transporte de fluidos em suas células. Isso acontece devido à presença de pontoações não aspiradas e ausência de substâncias impregnadas no seu interior (TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002), uma vez que a aspiração de pontoações e a obstrução dos vasos por tilos é comum no cerne, o que reduz sua permeabilidade (SIAU, 1984).

Os componentes químicos da madeira do cerne e do alburno também diferem entre si, especialmente em relação aos extrativos. O processo de cernificação é a principal causa de variação no tipo e quantidade desses componentes, com duas a três vezes mais teores de extrativos depositados no cerne que no alburno (PEREIRA; GRAÇA; RODRIGUES, 2003).

4.2 O PROCESSO DE CERNIFICAÇÃO NA MADEIRA

A madeira é um produto final biológico gerado durante o crescimento cambial ao longo de anos sucessivos (SAVIDGE, 2003). Esse processo de formação da madeira é complexo e, como relatado por Déjardin et al. (2010), envolve cinco etapas de desenvolvimento: (1) divisão celular do câmbio vascular; (2) expansão celular, ocorrendo alongamento das células e aumento dos raios; (3) deposição de parede celular secundária; (4) morte celular programada; e (5) formação de cerne. As células de madeira são produzidas pelo câmbio, que corresponde a uma camada de células entre a casca e o xilema que se diferenciam rapidamente em tamanho e forma até formar uma parede mais grossa. Após serem produzidas, as células permanecem inalteradas em forma para o desenvolvimento da árvore e se tornam o alburno. As células do raio e do parênquima axial permanecem vivas no alburno, enquanto que aquelas mais especializadas perdem seus conteúdos vivos logo após a completa diferenciação e o espessamento celular. Ocorrem a morte das células do parênquima e alterações na natureza do alburno, que resultam na formação do cerne (BAMBER, 1987).

A morte gradual das células parenquimáticas e a formação do cerne resultam da conjugação dos fatores temporal e espacial (HILLIS, 1968). O primeiro fator decorre da idade, e o segundo é uma resposta ao aumento da distância entre as células e a parte fisiologicamente mais ativa no fuste de uma árvore. A transformação do alburno em cerne é conhecida como cernificação. Além da morte das células do

parênquima radial, nesse processo ocorre consumo de oxigênio e liberação de CO₂, consumo de amido, aumento de extrativos e presença de tilos em algumas espécies (SILVA; TRUGILHO, 2003).

A cernificação pode estar relacionada ao controle genético, o qual tem efeito significativo na proporção do cerne dentro das espécies. Porém, a influência das condições ambientais deve ser considerada (HILLIS, 1987). O desenvolvimento do cerne também é associado à perda de propriedades condutoras na estrutura da árvore e à acumulação em graus variáveis de compostos não estruturais (GOMINHO; PEREIRA, 2000); a formação desse lenho pode ser considerada resposta a um estímulo hidráulico e que se desenvolve para manter uma proporção constante e ótima de alburno no fuste da árvore (BERTHIER et al., 2001). Um mecanismo de regulação entre o alburno e a biomassa foliar, denominado *pipe-model* (modelo tubular), assegura que a função de condução em uma árvore seja realizada por um conjunto de unidades tubulares que se estendem das raízes até as folhas (SHINOZAKI et al., 1964).

Mesmo não sendo apresentada uma explicação clara sobre a formação do cerne, podem existir fatores endógenos que desencadeiam a expressão de genes envolvidos na biossíntese fenólica das células parenquimáticas que estão na zona de transição, os quais liberam e difundem componentes fenólicos nas paredes celulares e lúmens vizinhos quando essas células morrem (HIGUCHI, 1997). Conhecer as diferenças químicas entre alburno e cerne é importante. Sabe-se que o cerne contém menos celulose e mais lignina do que o alburno. Todavia, conhecer a distribuição de elementos minerais na zona de transição entre os dois lenhos é importante para determinar a química da madeira de espécies florestais (SAITO et al., 2008).

Além da síntese celular, os genes na zona de transição podem ser ativados por um sinal molecular, que se torna um indicativo de redução da atividade do câmbio celular. Por meio desse sinal, ocorrem sucessivas atividades dentro do câmbio que resultam na morte das células e posterior formação do cerne. Esse sinal molecular pode ser desencadeado por um aumento de etileno necessário na produção de polifenóis, ou por uma mudança no teor de água perto da zona de transição, resultando em aspiração das pontuações e até mesmo estresse mecânico causado por ação de ventos e, conseqüente, inclinação do fuste (PLOMION; LEPROVOST; STOKES, 2001), o que tende a formar mais cerne em árvores inclinadas pelo vento (BERTHIER et al., 2001). Todavia, o nível de inclinação do fuste de árvores cultivadas em locais com ocorrência de ventos não aumentou a taxa de formação de cerne na

madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com seis anos de idade (BOSCHETTI et al., 2015).

Em síntese, as mudanças que ocorrem durante a transformação do alburno em cerne são morte das células parenquimáticas, diminuição da taxa metabólica e atividade enzimática, liberação de amido, escurecimento e acumulação de extrativos no xilema e alterações no teor de umidade. Outras mudanças que podem acontecer no processo de formação do cerne são modificações anatômicas no lenho das árvores, como a formação de tilose em angiospermas (PALLARDY, 2008).

Os tilos se formam quando uma ou mais células parenquimáticas, próximas a um elemento de vaso ou traqueídeo inativo, penetram pelas pontuações para o lume do vaso ou traqueídeo, proporcionando sua obstrução (COSTA et al., 2006). A presença de tiloses nos vasos inibe o fluxo de fluido, que pode limitar a absorção de umidade e impedir fisicamente o movimento de agentes patogênicos através da madeira (TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002). Muitas espécies do gênero *Eucalyptus* apresentam vasos obstruídos por tilos, ao passo que em outras não é verificada essa obstrução. Os relatos na literatura somente indicam que o cerne contém tilos nos vasos e o alburno, não (CHERELLI, 2015).

O processo de formação do cerne ainda é pouco conhecido. Há relatos que a cernificação começa entre 3 e 4 anos de idade na madeira de *Eucalyptus globulus* (GOMINHO; PEREIRA, 2000, 2005), mas são raras as pesquisas que comprovam a idade do início da formação do cerne em eucalipto, sendo necessários estudos específicos para melhor compreensão desse processo.

A ocorrência do início da formação de cerne na madeira de eucalipto é abordada por alguns autores:

- Cherelli (2015) diferenciou cerne em dois clones de *Eucalyptus* spp. com 2 anos de idade.
- Castro (2014) e Castro et al. (2016) detectaram presença de cerne no lenho das árvores de eucalipto aos 3 anos de idade.
- Gominho e Pereira (2000), e Brito et al. (2019) observaram presença de cerne em clones de eucalipto com 4 anos de idade.
- Feuchard (2015) demarcou cerne na madeira de clones de eucalipto com 4 e 5 anos de idade, independente do espaçamento de plantio.
- Evangelista (2007), Arantes (2009) e Mauri (2010) verificaram presença de cerne em diferentes materiais genéticos de eucalipto aos 6 anos.

4.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA DO CERNE E DO ALBURNO

A quantidade e a taxa de formação de cerne variam muito com as espécies, idade, taxa de crescimento, genética, qualidade do sítio, condições ambientais e práticas silviculturais (BAMBER, 1987; HILLIS, 1987; TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002; PALLARDY, 2008; MOYA; BOND; QUESADA, 2014). O teor de extrativos e a variabilidade de cerne e alburno em relação à altura no fuste, à idade, à espécie e ao sítio são as propriedades mais estudadas pelos pesquisadores. Mas faltam relatos sobre quanto de alburno é transformado em cerne por ano em árvores de eucalipto (BERTHIER et al., 2001).

Em estudos comparativos de idade, espera-se encontrar menor quantidade de cerne em árvores mais jovens e, conseqüentemente, menor relação C/A. Essa tendência de aumento da quantidade de cerne com a idade foi observada por Evangelista (2007), Cherelli (2015) e Feuchard (2015). Essa relação da formação de cerne com a idade também é válida para a proporção de cerne e de alburno ao longo do fuste da árvore. Conseqüentemente, quanto maior a sua altura, menor será a quantidade de cerne (PEREIRA et al., 2013; COSTA et al., 2017; BRITO et al., 2019).

Isso se deve à participação das camadas de células recém-formadas no fuste, cuja proporção aumenta no sentido base-topo (SANTOS; GARCIA; GERALDI, 2004). Como o desenvolvimento do cerne acompanha o avanço da idade da árvore, sua proporção é maior onde o lenho é mais velho, ou seja, a proporção de cerne diminui da base para o topo da árvore. O diâmetro da árvore também desempenha papel fundamental na formação de cerne, com árvores de maiores diâmetros apresentando maior proporção de cerne (SANTOS; GARCIA; GERALDI, 2004; GOMINHO; PEREIRA, 2005; ARANTES, 2009). Verifica-se também uma correlação positiva entre a quantidade de cerne e o crescimento de árvores de eucalipto (WILKINS, 1991; GOMINHO; PEREIRA, 2000), com maior produção de cerne em sítios mais produtivos.

Todavia, a influência da qualidade do sítio nas propriedades do cerne e do alburno não segue uma tendência definida. Já foi verificado uma maior quantidade de cerne em árvores de locais com taxa de crescimento mais rápida (MIRANDA et al., 2007), ao passo que também há relatos de que árvores mais produtivas apresentaram menores percentuais de cerne quando comparadas àquelas de menor produtividade (CHERELLI, 2015).

O espaçamento de plantio também influencia na formação do cerne. A proporção de volume do cerne aumenta em maiores áreas úteis de cultivo (GOMINHO; PEREIRA, 2005). Porém, Brito et al. (2019) observou que não houve influência significativa da área útil proporcionada pelo espaçamento de plantio na porcentagem de cerne em madeira de clones de eucalipto com 4 anos de idade. Sabe-se que o espaçamento é um fator de crescimento diretamente relacionado com o diâmetro e altura das árvores, e as maiores dimensões em área útil mais ampla proporcionam aumento da quantidade de cerne formado na madeira de diversas espécies.

Acréscimo na quantidade de alburno em árvores cultivadas em maiores áreas úteis foi verificado em árvores de *Eucalyptus globulus* com 18 anos (MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009); esses maiores percentuais foram atribuídos ao desenvolvimento da copa proporcionado pelo maior espaço entre as árvores. Uma relação linear positiva também foi observada entre a biomassa foliar e a área de alburno de *Tectona grandis* e *Gmelina arborea* (MORATAYA et al., 1999), em que árvores com menor concorrência no seu crescimento – maior área útil – tenderam a adicionar mais volume de cerne no seu fuste. Com a maior disponibilidade de nutrientes em espaços de cultivo mais amplos, as árvores intensificam a divisão de suas células e aumentam a quantidade de alburno no seu fuste.

Estudos que determinam individualmente a densidade da madeira do cerne e do alburno são pouco relatados. Observa-se menores valores de densidade na região do cerne com aumento gradativo em direção à região do alburno (ARANTES, 2009), aumento esse caracterizado pela presença de madeira juvenil na região central próxima à medula e de madeira adulta próxima à casca. Clones de *Eucalyptus* spp. com 7,5 anos de idade, apresentaram menores densidades na sua madeira em árvores com maior quantidade de cerne (PEREIRA et al., 2013), e em uma caracterização tecnológica em clones de *Eucalyptus camaldulensis* com a mesma idade foram encontrados valores médios de densidade básica para a madeira de cerne de 563 kg m^{-3} e do alburno de 605 kg m^{-3} , equivalente a uma diferença de 7,5% entre a densidade das duas regiões (COSTA et al., 2017).

Assim, é possível indicar uma relação inversa entre valores de densidade e a porcentagem de cerne em árvores jovens de eucalipto. Esse acréscimo de valores segue o padrão da variação radial dessa propriedade na madeira de eucalipto, a qual aumenta no sentido medula-casca devido ao aumento da espessura da parede das fibras e diminuição do tamanho dos poros.

O teor de extrativos no cerne é mais alto do que no alburno (SILVA; TRUGILHO, 2003), evidenciando que árvores com maior quantidade de cerne apresentam mais extrativo em seu fuste. A madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (5 anos e 7 meses) apresentou em sua composição o dobro de conteúdo extrativo de cerne (7,6%) em relação ao de alburno (3,7%) (GOMINHO et al., 2001).

Avaliar as propriedades da madeira do cerne e do alburno é de suma importância, pois constituem parâmetros de qualidade e influenciam nos processos de polpação, na produção de carvão vegetal e na secagem da madeira. Um dos aspectos que mais valorizam as peças de madeira com cerne é a sua coloração, o que aumenta o interesse tecnológico das serrarias por produtos com maior quantidade de cerne.

Madeiras com maiores teores de cerne interferem na produção de celulose, uma vez que o cozimento é dificultado pelo maior teor de extrativos existentes nessa região, além de ocorrer alterações na cor e na densidade do cavaco. Já madeiras com mais alburno são desejadas por possibilitar melhor penetração dos licoros durante a polpação, o que contribui para menor consumo de produtos químicos utilizados no branqueamento da polpa (MAURI, 2010; BARBOSA et al., 2019).

Na produção de carvão vegetal, são preferíveis árvores com maior proporção de alburno, visto que as porcentagens de cerne e alburno afetam expressivamente a etapa inicial da carbonização, caracterizada pela secagem da madeira (PEREIRA et al., 2013). O cerne apresenta mais resistência à degradação térmica que o alburno, fato que torna importante a relação C/A para a produção de carvão vegetal. Isso porque uma maior relação C/A na madeira implicará em melhor rendimento desse material no processo de carbonização, devido ao menor grau de degradação da madeira do cerne (SILVA; TRUGILHO, 2003).

Com efeito, a maior quantidade de cerne também pode dificultar a secagem, pelo lenho ser impermeável, o que atrapalha o transporte de água da parte mais interna para a mais externa da madeira (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Já o alburno, devido à sua maior permeabilidade, normalmente apresenta uma secagem mais rápida, quando comparado ao cerne.

5 METODOLOGIA

5.1 DESCRIÇÃO E AMOSTRAGEM DO MATERIAL EXPERIMENTAL

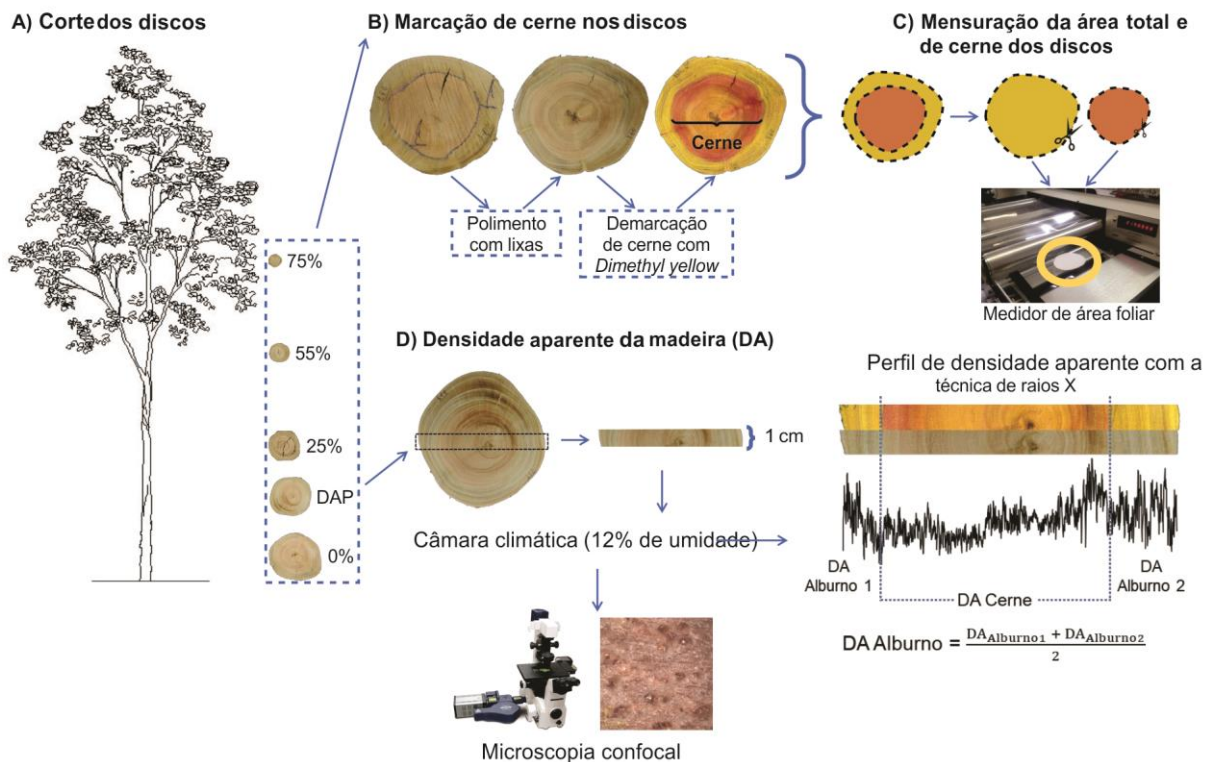
O material foi proveniente da plantação experimental de uma empresa de polpa celulósica, localizada em Aracruz, Espírito Santo, Brasil (19° 49' 15" Latitude Sul e 40° 05' 20" Longitude Oeste). O solo é classificado como argissolo amarelo típico com textura arenosa média, e o clima como Aw – tropical com inverno seco, com temperatura média anual de 23°C e precipitação anual entre 1000 e 1400 mm, de acordo com a classificação climática proposta por Koppen (ALVARES et al., 2013).

O experimento teve início em junho de 2011 em uma área de 2 hectares. O clone de *E. grandis* x *E. urophylla* foi plantado em três espaçamentos (3x1 m, 3x2 m e 3x3 m) dispostos em parcelas em faixas, sendo alocadas três subparcelas por espaçamento com 15 árvores cada para medições anuais. O tamanho das subparcelas foi variável com a área útil de cada árvore, sendo: subparcela 3x1 m com 45 m², subparcela 3x2 m com 90 m² e subparcela 3x3 m com 135 m².

Nove inventários florestais foram realizados para seleção e amostragem do material, com mensuração do diâmetro à altura do peito (DAP, a 1,30 m do solo) e da altura total (HT) de todas as árvores das subparcelas. Esse monitoramento foi semestral até 36 meses, e posteriormente as medições aconteceram em intervalos anuais até o final do experimento.

Amostragens da madeira foram realizadas nas idades de 14, 27, 32, 53, 64 e 76 meses, e a escolha das árvores baseou-se no DAP médio das parcelas dos respectivos inventários. A amostragem consistiu no corte de três árvores por espaçamento de plantio em cada idade, em um total de 54 árvores. Após o corte, procedeu-se a mensuração da altura total e do diâmetro (com e sem casca) das árvores nas posições relativas 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65%, 75%, 85% e 95% da altura total para cubagem rigorosa pelo método de Smalian. Seis discos ao longo do fuste de cada árvore amostrada foram retirados, sendo estes no DAP e nas posições relativas a 0% (base), 25%, 55% e 75% da altura total (Figura 1A).

Figura 1 – Amostragem do material experimental.



Fonte: A autora.

5.2 QUANTIFICAÇÃO DE CERNE NA MADEIRA

Os discos coletados foram polidos em lixadeira de cinta com lixas de grãos 40 e 50 para eliminar as ranhuras do corte da motosserra e, posteriormente, um polimento mais fino foi realizado em lixadeira orbital com lixas de grãos 80 e 120. Para realçar a presença de cerne e confirmar a observação visual, a face lixada dos discos foi pincelada com *Dimethyl yellow* (0,2% em etanol) (CASTRO, 2014; BRITO et al., 2019). Ao reagir com os componentes da madeira, essa solução indica em amarelo a região do xilema funcional (alburno) e realça em vermelho-róseo a parte não funcional (cerne), sendo a diferenciação de cor baseada no pH (Figura 1B).

Para mensuração das áreas total e de cerne, traçou-se a área total do disco em folha de papel branca, e a região de cerne foi demarcada em folha vegetal transparente com posterior contorno em papel branco. A leitura da área dos desenhos recortados foi realizada em um medidor de área foliar, modelo LI-3100C *Area Meter* (Figura 1C).

A porcentagem de cerne nas árvores foi calculada pela metodologia do volume ponderado, pela metodologia de tronco de parabolóide por Smalian. As diferentes alturas da amostragem ao longo do tronco foram separadas em quatro seções: 0%-DAP, DAP-25%, 25-55% e 55-75%. Obteve-se o volume da árvore e de cerne em

cada seção (Equação 1), e pela soma dos valores das seções foi calculado o volume ponderado (Equações 2 e 3, respectivamente). A porcentagem de cerne foi obtida pela razão dos somatórios dos valores ponderados (Equação 4).

$$V_{\text{árvore}} \text{ ou } V_{\text{cerne}} = \frac{h}{2} (S_i + S_{i+1}) \quad (1)$$

$$V_{\text{ponderado árvore}} = (V_{\text{árvore } 0\%-\text{DAP}} + \dots + V_{\text{árvore } 55-75\%}) \quad (2)$$

$$V_{\text{ponderado cerne}} = (V_{\text{cerne } 0\%-\text{DAP}} + \dots + V_{\text{cerne } 55-75\%}) \quad (3)$$

$$\% \text{Cerne} = \frac{V_{\text{ponderado cerne}}}{V_{\text{ponderado árvore}}} * 100 \quad (4)$$

Em que: $V_{\text{árvore}}$ = volume da árvore ou de cerne em cada seção [m^3]; h = altura referente ao ponto da seção [m]; S_i = área no menor nível de altura da seção [m^2]; S_{i+1} = área no maior nível de altura da seção [m^2]; $V_{\text{ponderado árvore}}$ = Volume ponderado total da árvore [m^3]; $V_{\text{ponderado cerne}}$ = Volume ponderado de cerne na árvore [m^3]; $\% \text{Cerne}$ = Porcentagem de cerne na árvore [%].

5.3 MICROSCOPIA CONFOCAL

A bagueta diametral retirada do disco relativo à posição DAP foi utilizada para analisar a presença de vasos impregnados por tilos na madeira de eucalipto, por meio da microscopia confocal (Figura 1D). O microscópio confocal é composto por um feixe de luz ultravioleta a laser, que fornece menores comprimentos de onda e melhor resolução das imagens.

O cerne e a zona de transição foram observados, e imagens fotográficas foram registradas para auxiliar a caracterização dessas regiões na madeira (cerne, zona de transição e alborno). As amostras foram observadas em três lentes objetivas: 5x, 10x e 20x, que apresentavam ampliação de x108, x216 e x430, respectivamente. De acordo com a lente escolhida, várias fotos foram registradas em um ponto selecionado para observação na amostra, e a imagem final, montada digitalmente.

5.4 DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA

Após a marcação e quantificação de cerne, uma bagueta diametral foi retirada do disco relativo à posição DAP (Figura 1D) para determinação da densidade aparente da madeira pela técnica de densitometria de raios X, descrita por Tomazello et al. (2008). Com uma serra circular dupla paralela, retirou-se uma amostra no sentido transversal da bagueta (1,7 mm de espessura e 10 mm de largura), as quais foram

acionadas em câmara de climatização (60% de umidade e 20°C de temperatura), até atingir 12% de umidade.

O escaneamento das amostras foi executado por um feixe de raios X colimado no equipamento QTRS-01X (*Quintek Measurement Systems – QMS Tree Ring System*), em resolução linear de 80 µm. A transformação dos valores de raios X em densidade aparente ocorreu no software QMS, e foram construídos gráficos dos perfis de densidade aparente do material.

Para determinar a densidade aparente média do cerne e do alburno, delimitou-se um ponto de corte no perfil de densidade aparente das baguetas. Com base nos limites marcados pelo indicador químico *Dimethyl yellow*, foi identificada a transição entre as duas regiões, e realizada a medição da largura de cerne e de alburno em cada raio da bagueta. As médias entre os valores dos dois raios corresponderam a densidade aparente de cada região na amostra.

5.5 CRESCIMENTO DAS ÁRVORES

A equação de volume para árvores individuais foi ajustada com os dados da cubagem rigorosa das árvores coletadas, e escolheu-se o modelo de Schumacher e Hall (1933) que é frequentemente empregado na predição volumétrica (Equação 5).

$$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * HT^{\beta_2} * \varepsilon \quad (5)$$

Em que: V = volume total sem casca [m³]; DAP = diâmetro à altura do peito [cm]; HT = altura total [m]; β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros do modelo; ε = erro aleatório.

O volume das árvores inventariadas nas três subparcelas dos três espaçamentos (3x1, 3x2 e 3x3 m) nas seis idades (14, 27, 32, 53, 64 e 76 meses) foi calculado a partir do inventário florestal, medindo o DAP e a altura total de todas as árvores e aplicando as equações obtidas. O incremento médio anual (IMA) foi determinado a partir da divisão do volume de madeira de cada tratamento pela respectiva idade, e o incremento corrente anual (ICA) foi obtido pela diferença de volume entre as idades avaliadas. Volume de cerne por hectare (VC ha) foi obtido aplicando a porcentagem de cerne obtida para o tratamento no volume total de madeira. As análises foram realizadas no software RStudio, na linguagem R (R CORE TEAM, 2014).

5.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para análise estatística dos dados, empregou-se delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial duplo, com três repetições. A idade representou o primeiro fator, em seis níveis (14, 27, 32, 53, 64 e 76 meses). Já o espaçamento de plantio, transformado nessa parte para valores em área útil, foi o segundo fator em três níveis (3x1, 3x2, 3x3 m / 3, 6, 9 m²).

A igualdade de variância (homocedasticidade) e a normalidade dos dados foram verificadas pelos testes de Cochran e Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$), respectivamente. As médias de cada tratamento foram comparadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Também foi desenvolvida uma estatística descritiva para analisar os percentuais de acréscimo ou decréscimo da porcentagem de cerne e da densidade da madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, ao longo das idades e entre os espaçamentos de plantio.

A porcentagem e o volume de cerne na árvore foram correlacionados com as diferentes taxas de crescimento, sendo avaliado: % Cerne = porcentagem de cerne; VC = média do volume de cerne nas árvores amostradas; AU = área útil; I = idade; DAP = diâmetro à altura do peito das árvores amostradas; HT = altura das árvores amostradas; V = volume das árvores amostradas; IMA = incremento médio anual.

Os valores dos coeficientes foram obtidos pela correlação linear de Pearson e seu valor p . Equações de regressão para predição de porcentagem de cerne (% Cerne) foram ajustadas por análise de regressão múltipla com ajuste pelo método Exhaustive Search (pacote Leaps), que testa todas as combinações de variáveis e fornece a que melhor estima a variável dependente. As variáveis que apresentaram correlações significativas foram utilizadas como variáveis independentes e o melhor modelo foi selecionado. As análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2014).

6 RESULTADOS

6.1 FORMAÇÃO DO CERNE NA MADEIRA

O *Dimethyl yellow* foi eficiente na indicação da presença de cerne na madeira a partir dos 53 meses, o que indica o início da formação de cerne com 32 e 53 meses de idade, independente do espaçamento de plantio (Figura 2).

Houve clara distinção entre as duas regiões nos discos após a aplicação do indicador químico, e a formação do cerne no disco ocorreu de forma irregular. A cor destacada com o *Dimethyl* nos discos da Figura 2 (A até R) demonstra que a reação na madeira é diferente em árvores de uma mesma espécie. Distintas tonalidades entre os discos foram observadas, o que pode estar relacionado aos tipos e quantidade de extrativos na madeira.

Manchas ao redor da medula, observadas pela análise visual das amostras em coloração natural nas idades iniciais (14, 27 e 32 meses), não foram coloridas com a aplicação do indicador químico, o que confirmou que as manchas não representavam região de cerne (tons amarelados nos discos indicados pelas setas vermelhas – Figura 2, A até H). Já nos discos das idades mais avançadas (53, 64 e 76 meses), o indicador *Dimethyl* não apresentou reação em regiões próximas à medula e em locais com podridão na madeira, as quais ficaram com coloração amarelada em áreas de cerne (setas azuis – Figura 2, J até R).

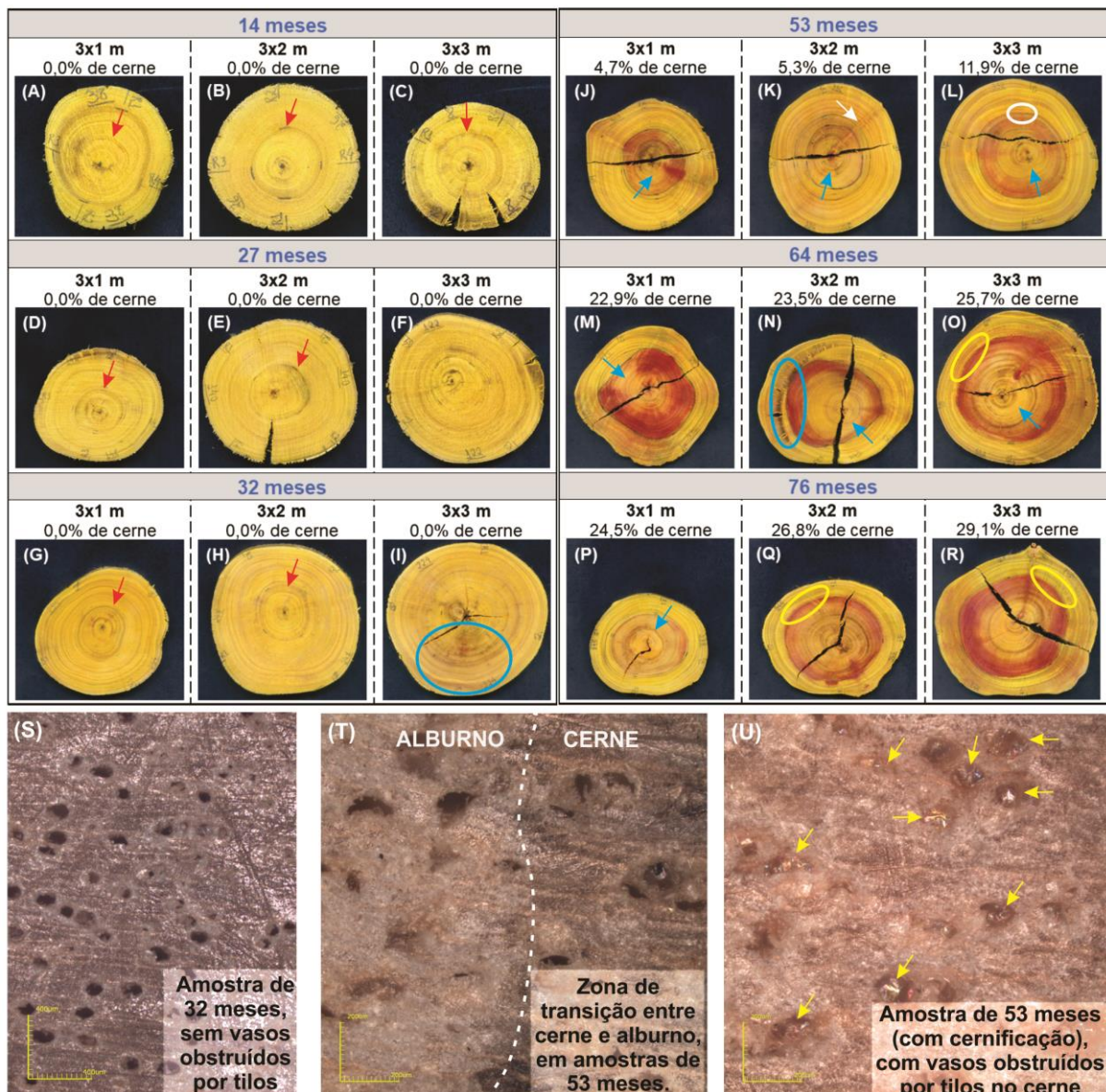
Apesar da presença de lenho de tração (LT) interferir na observação visual do limite de transição, a cor mais escura do LT coincidia com esse limite e dificultava a marcação, a demarcação foi facilitada, pois não houve reação do *Dimethyl* nesses locais que apresentaram coloração amarelada (círculos azuis – Figuras 2I e 2N).

Regiões ao redor de nós, presentes na seção transversal dos discos, foram realçadas em vermelho com a aplicação do *Dimethyl*, em razão do elevado teor de extrativos nesses locais (setas brancas – Figuras 2K e 2O).

Áreas circulares com tonalidades mais claras no meio do disco foram registradas visualmente como uma possível zona de transição, mas a aplicação do *Dimethyl* realçou a região em amarelo e a caracterizou como alburno (círculo branco – Figura 2L). Também foi observada uma coloração avermelhada mais intensa no cerne próximo ao limite de transição com o alburno (círculos amarelos – Figuras 2O, 2Q e 2R), possivelmente causada por alguma alteração na composição química da madeira.

Todos os vasos estavam impregnados por tilos na região do cerne nas amostras de 53 meses em que foi detectado o início da formação do cerne (setas amarelas – Figura 2U), e zonas de transição entre cerne e alburno de amostras foram observadas com presença de tilose na região do cerne (Figura 2T). Nas amostras de idades anteriores à cernificação, não foi verificada tilose nas amostras (Figura 2S).

Figura 2 – Discos da posição diâmetro à altura do peito (DAP) com *Dimethyl yellow* para verificação da presença de cerne (A até R), e imagens fotográficas registradas no microscópio confocal em amostras da madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* em diferentes idades e espaçamentos de plantio (S até U).

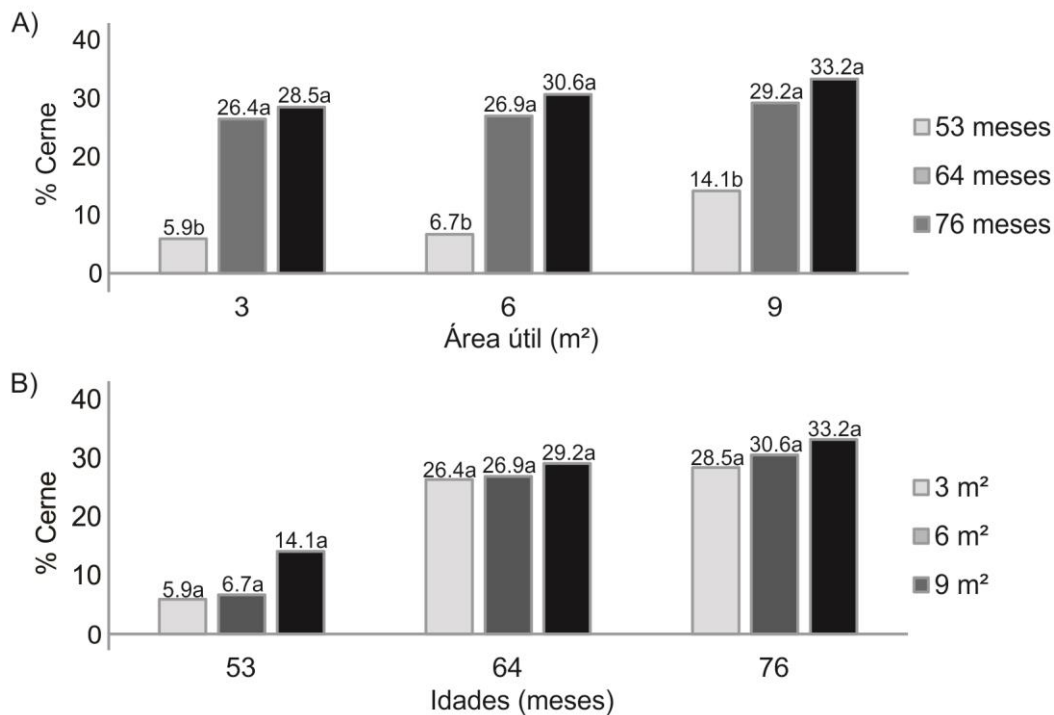


Fonte: A autora.

6.2 EFEITO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO NA FORMAÇÃO DO CERNE

O avanço da idade das árvores proporcionou maiores porcentagens de cerne em todos os espaçamentos. A porcentagem de cerne aumentou significativamente do primeiro para o segundo ano de formação (entre as idades 53 e 64 meses), com maior acréscimo observado no menor espaçamento (Figura 3A). A porcentagem de cerne entre 53 e 64 meses aumentou cerca de quatro vezes nos espaçamentos de 3x1 m e 3x2 m e dobrou no espaçamento com área útil de 9 m². De 64 para 76 meses, esse incremento em cerne aconteceu em proporções menores.

Figura 3 – Teste de médias da porcentagem de cerne (% Cerne) em função da idade (A) e da área útil (B) em árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Fonte: A autora.

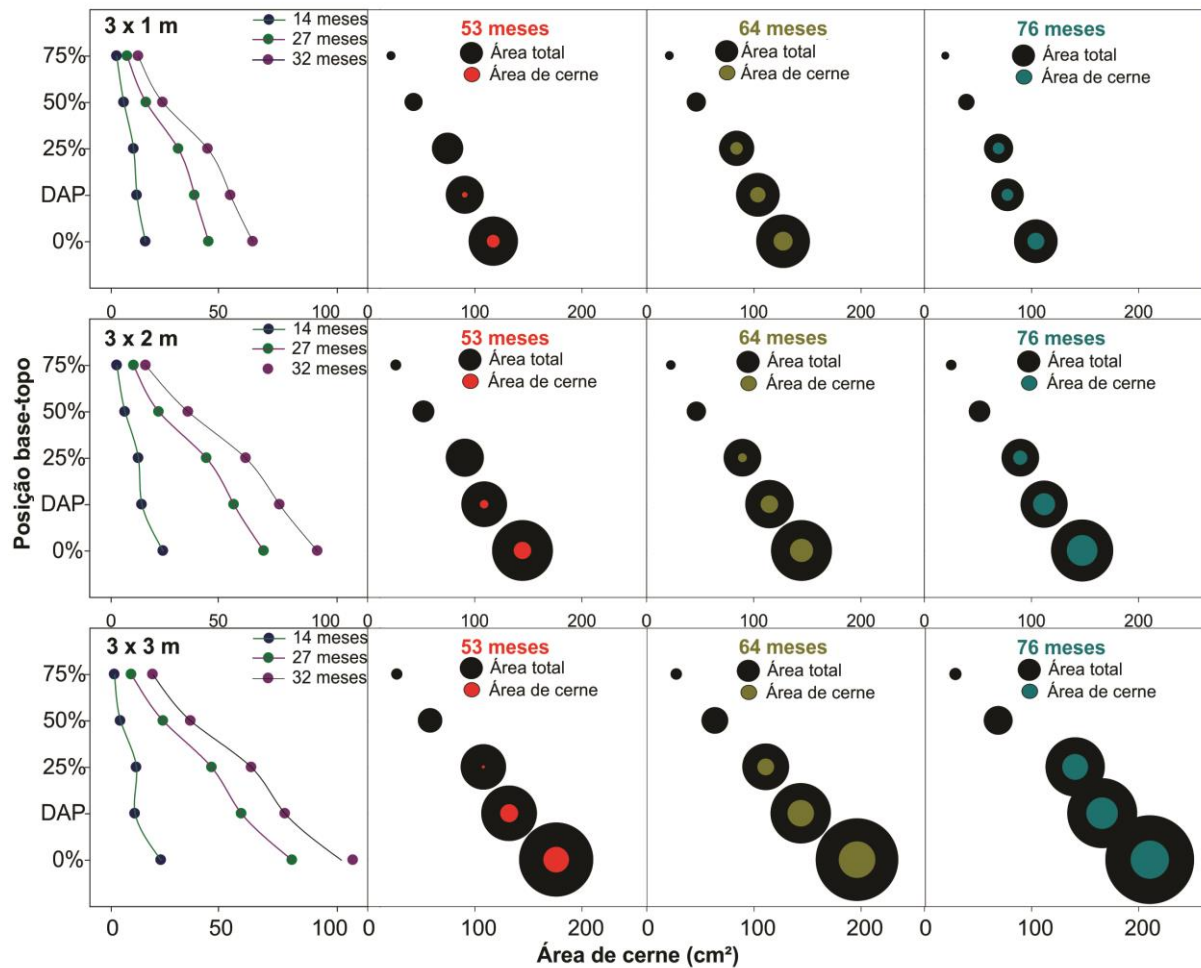
Não foi observada diferença estatística entre a porcentagem de cerne em relação ao aumento da área útil (Figura 3B), mas foi observada uma tendência de maior formação de cerne em árvores cultivadas no espaçamento mais amplo (3x3 m). O maior percentual de aumento de cerne foi observado entre os espaçamentos 3x2 m e 3x3 m, na idade de 53 meses.

Nas árvores de *E. grandis* x *E. urophylla* ocorreu aumento das áreas totais e de cerne com a idade nos três espaçamentos de plantio e diminuição nas posições mais altas do fuste (Figura 4). Um acréscimo expressivo no diâmetro das árvores foi

observado com a mensuração da área total dos discos, entre as idades de 14 e 27 meses nos espaçamentos 3x2 m e 3x3 m, sem formação de cerne.

A partir do início da formação (53 meses), a presença de cerne na madeira foi comprovada até a posição 25% da altura total, com exceção dos espaçamentos 3x1 m e 3x2 m aos 53 meses de idade, em que o cerne foi formado até o DAP.

Figura 4 – Variabilidade base-topo da área total e de cerne em árvores de *E. grandis* x *E. urophylla* em diferentes idades e espaçamentos de plantio.



Fonte: A autora.

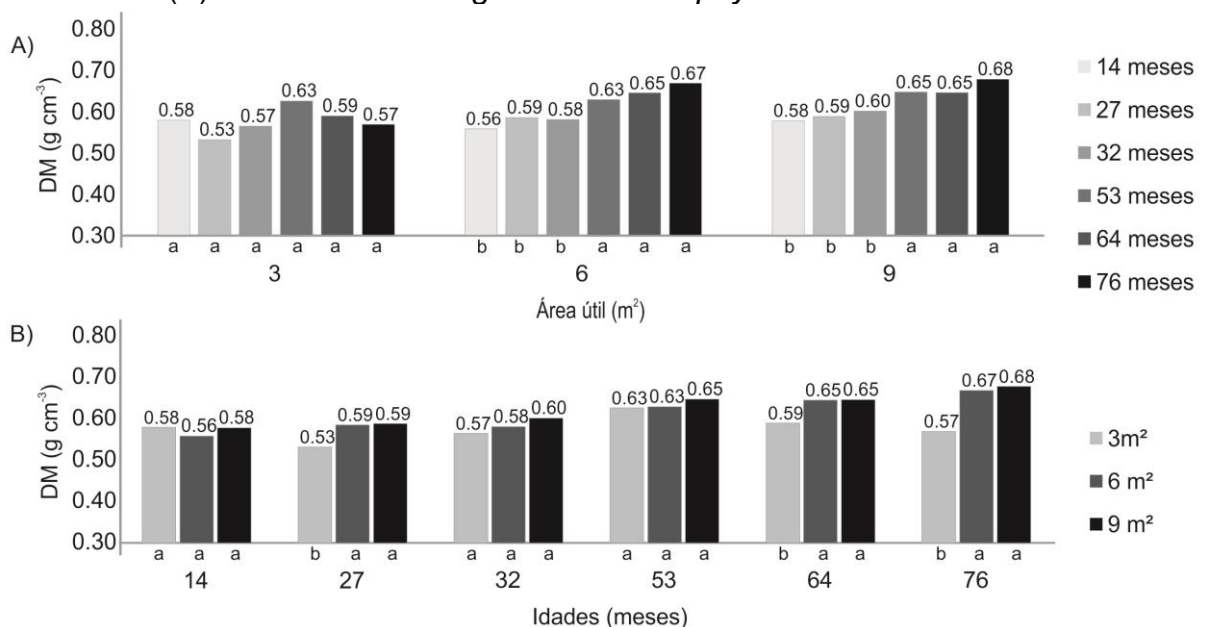
6.3 EFEITO DA IDADE E DO ESPAÇAMENTO DE PLANTIO NA DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA

A densidade aparente da madeira variou pouco, tanto em relação à idade quanto aos diferentes espaçamentos de plantio (Figura 5). Nos três espaçamentos de plantio, maiores acréscimos de densidade foram observados entre as amostragens de 32 e 53 meses (Figura 5A). Um acréscimo médio de 18% foi verificado na densidade da madeira entre a menor e a maior idade de avaliação (14 para 76 meses)

nos espaçamentos 3x2m e 3x3m, com maior incremento em densidade entre as idades 32 e 53 meses (Figura 5A).

Não houve diferença estatística entre os valores de densidade dos maiores espaços vitais de crescimento de 6 e 9 m² (Figura 5B). Nas idades de 14, 32 e 53 meses, o aumento da área útil não alterou a densidade da madeira em nenhum dos espaçamentos. O maior incremento em densidade ocorreu entre os espaçamentos 3x1 m e 3x2 m na idade de 76 meses, o que pode indicar início de competição nessa idade. A variação da densidade aos 14 meses de idade é um comportamento difícil de ser explicado em razão de não ser frequente a caracterização de madeira em idade tão jovem, ainda mais em um espaço vital de crescimento reduzido.

Figura 5 – Teste de médias da densidade da madeira (DM) em função da idade (A) e da área útil (B) em árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*.

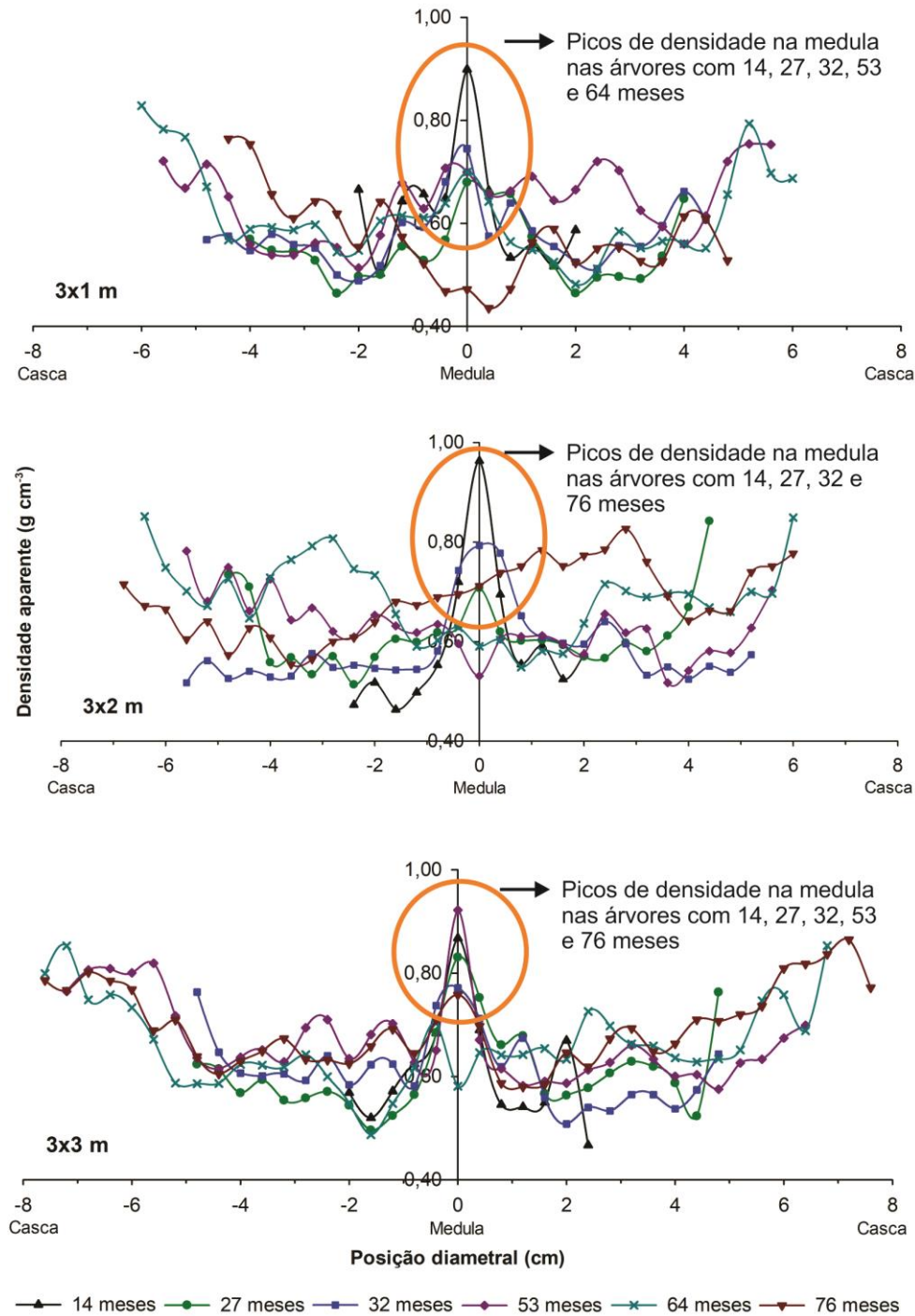


Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Scott Knott a 5% de significância. Fonte: A autora.

Os perfis densitométricos da madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* evidenciam a variabilidade diametral (casca-casca) da densidade entre as idades e os espaçamentos de plantio, com tendência de aumento dos valores no sentido medula-casca (Figura 6).

Regiões mais densas próximas a medula (círculos alaranjados – Figura 6) foram observadas até 64 meses no espaçamento 3x1 m, nas amostras de 14, 27, 32 e 76 meses do espaçamento 3x2 m, e aos 14, 27, 32, 53 e 76 meses no espaçamento 3x3 m. Maiores valores de densidade também foram encontrados em regiões próximas à casca, correspondentes à madeira de alburno.

Figura 6 – Variação diametral da densidade aparente (DA) da madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* em diferentes idades e espaçamentos de plantio.

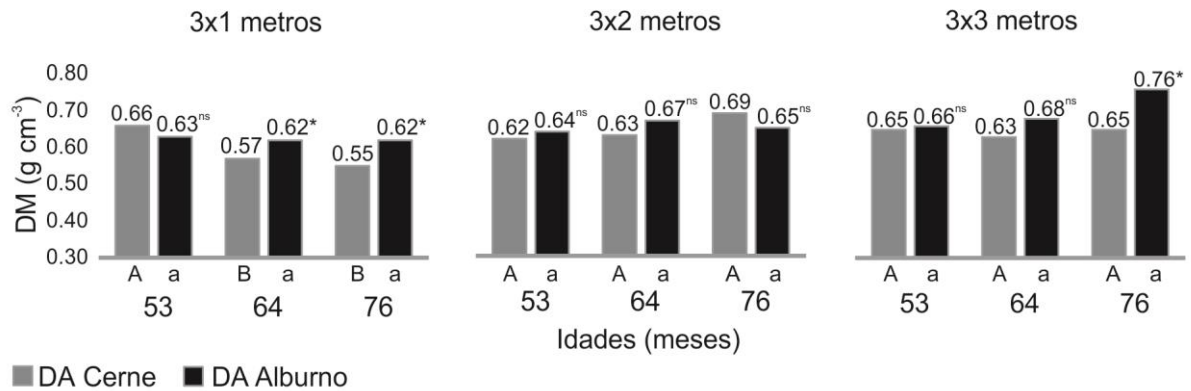


6.4 DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA DO CERNE E DO ALBURNO

A densidade aparente média do cerne (DA Cerne) foi menor que a do alburno (DA Alburno) somente no espaçamento 3x1 m aos 64 e 76 meses e no espaçamento 3x3 m aos 76 meses, com o maior valor de densidade obtido nesse tratamento (Figura 7). Entre os espaçamentos de plantio, não houve um padrão de variação da DA Cerne e DA Alburno.

Entre as idades, a densidade do cerne somente diferiu e foi maior aos 53 meses no espaçamento 3x1 m. O alburno não variou os valores de densidade ao longo dos anos nos três espaçamentos de plantio.

Figura 7 – Variação da densidade aparente da região do cerne (DA Cerne) e do alburno (DA Alburno) na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* em diferentes idades e espaçamentos de plantio.

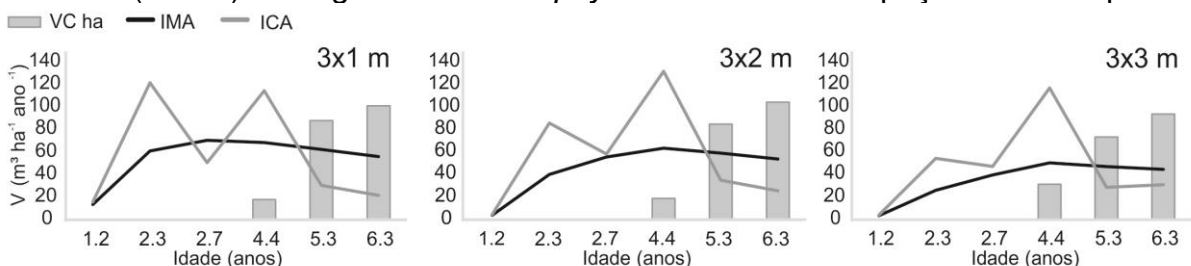


Médias seguidas de * possuem densidade de cerne e alburno diferentes estatisticamente. Letras maiúsculas comparam médias de cerne, letras minúsculas comparam médias de alburno, sendo que médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Fonte: A autora.

6.5 CRESCIMENTO DAS ÁRVORES E SUA CORRELAÇÃO NA FORMAÇÃO DO CERNE E NA DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA

Com os volumes estimados das árvores, foi calculado o Incremento Médio Mensal (IMM) e o Incremento Corrente Mensal (ICM) para as seis idades amostradas (Tabela 1). O ponto de encontro das curvas IMA e ICA determinou a Idade Técnica de Corte (ITC) entre 4,4 e 5,3 anos (Figura 8). No menor espaçamento (3x1 m), é possível observar a influência da competição a partir dos 2,3 anos, e uma redução do ICA aos 2,3 anos sugere a inclusão de técnicas de desbaste nesses espaçamentos.

Figura 8 – Incremento médio anual (IMA), incremento corrente anual (ICA) e volume de cerne (VC ha) de *E. grandis* x *E. urophylla* em diferentes espaçamentos de plantio.



Fonte: A autora.

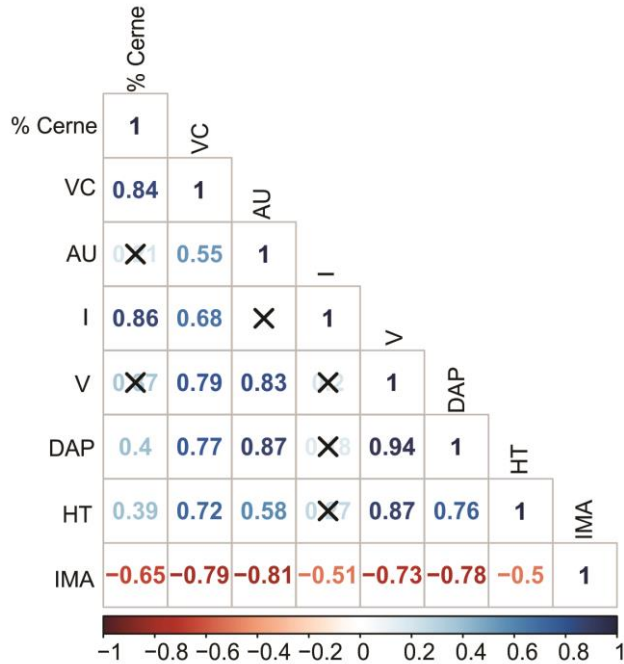
O incremento em cerne ao longo dos anos foi maior nos menores espaçamentos, sendo que enquanto os valores de cerne do início da formação para a idade final de corte aumentaram cerca de três vezes para o maior espaçamento, o aumento para as áreas úteis de 3 e 6 m² foi de aproximadamente seis vezes. Os valores de ITC nos três espaçamentos de plantio foram superiores à idade que iniciou a formação do cerne (53 meses), e demonstra que o processo de cernificação ocorreu após os valores de IMA começarem a se estabilizar.

Tabela 1 – Valores médios das taxas de crescimento em diâmetro (DAP), altura total (HT) e volume (V) de *E grandis* x *E. urophylla* em diferentes idades e espaçamentos de plantio.

Espaçamento (m)	Idade (meses)	DAP (cm)	HT (m)	V (m ³ parcela ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)
3x1 (parcela: 45 m ²)	14	4,6	5,6	0,070527	15,67
	27	8,3	12,6	0,615706	136,82
	32	8,6	13,2	0,842941	187,32
	53	9,8	15,2	1,356690	301,49
	64	9,9	14,9	1,493436	331,87
	76	9,9	14,5	1,590565	353,46
3x2 (parcela: 90 m ²)	14	4,9	5,3	0,040377	4,49
	27	10,3	14,1	0,808536	89,84
	32	11,3	16,4	1,330057	147,78
	53	12,5	19,6	2,510784	278,98
	64	13,3	19,8	2,824244	313,80
	76	13,6	19,9	3,053143	339,24
3x3 (parcela: 135 m ²)	14	4,8	5,4	0,056765	4,20
	27	10,7	13,2	0,791880	58,66
	32	11,9	16,5	1,430749	105,98
	53	14,8	21,1	3,011065	223,04
	64	16,2	20,9	3,398330	251,73
	76	17,2	21,4	3,818571	282,86

O VC apresentou correlações significativas com todas as variáveis analisadas (% Cerne, AU, I, V, DAP, HT, IMA), enquanto % Cerne não se correlacionou com área útil (AU) e volume da árvore (V) (Figura 9). A idade foi a variável que apresentou maior correlação com o VC ($r = 0,86$), enquanto a área útil, como observado nos resultados anteriores (Figura 3), não influenciou tanto na proporção de cerne. IMA foi negativamente correlacionado com todas as variáveis, com destaque para o volume de cerne, área útil, volume e DAP.

Figura 9 – Correlação de Pearson das variáveis dendrométricas com as proporções de cerne na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*.



Em que: % Cerne = porcentagem de cerne; VC = média do volume de cerne nas árvores amostradas; AU = área útil; I = idade; V = volume das árvores amostradas; DAP = diâmetro à altura do peito das árvores amostradas, HT: altura das árvores amostradas, IMA: incremento médio anual.

Fonte: A autora.

A partir dessas relações foi possível modelar uma equação que estima a porcentagem de cerne das árvores (Tabela 2). A melhor equação para estimar % Cerne utilizou idade e DAP como variáveis de entrada. A equação apresentou coeficiente de determinação de 0,77, e RMSE de 21%. A equação tende a subestimar a proporção de cerne em árvores menores e mais novas, consequentemente com menos cerne, mas é aplicável para árvores próximas da idade de corte.

Tabela 2 – Equações de regressão linear e estatísticas de precisão da predição de porcentagem de cerne (% Cerne) na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*.

Equação: % Cerne = -57,9379 + 0,8922*I + 1,5653*DAP					Graph 1:1
r ² _{aj} : 0,78					
RMSE: 21,40%					
Coeficientes					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr (> t)	
Intercept	-57,9379	9,7201	-5,961	3,75E-06*	
I	0,8922	0,1034	8,629	8,06E-09*	
DAP	1,5653	0,5807	2,696	0,0126*	

Em que: % Cerne = porcentagem de cerne da árvore; I = idade em meses; DAP = diâmetro à altura do peito em cm; r²_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; RMSE = erro quadrático médio da raiz.

* significativo a 5% de probabilidade.

7 DISCUSSÃO

A avaliação anual da madeira possibilitou identificar o início da formação do cerne em árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, e não apenas em intervalos de tempo de possível ocorrência do processo de cernificação, como abordado em outros trabalhos.

O início da formação do cerne aos 53 meses (4 anos e 5 meses), independente do espaçamento de plantio, está compreendido entre o intervalo de idade (2 a 6 anos) relatado para ocorrência de cernificação na madeira de eucalipto (HILLIS, 1968; CASTRO, 2014; CHERELLI, 2015; BRITO et al., 2019), e por estimativas de modelagem altura *versus* idade (desenvolvimento de árvores de eucalipto entre 3 e 4 anos) (GOMINHO; PEREIRA, 2000, 2005).

A observação da cor natural da seção transversal da madeira não foi conclusiva para identificar a cernificação. Somente com o uso do *Dimethyl yellow* foi possível confirmar a presença de cerne nas árvores a partir de 53 meses. Manchas ao redor da medula, principalmente nas idades iniciais de avaliação, que geraram dúvidas quanto à presença de cerne, permaneceram com coloração amarelada após a aplicação do indicador, o que comprova a necessidade do emprego do *Dimethyl* para assegurar a demarcação do cerne e do alborno na madeira de eucalipto.

Essa eficiência do indicador químico na distinção do cerne na madeira de eucalipto também foi relatada por Castro (2014) e Brito et al. (2019). O *Dimethyl* atua como um indicador de acidez e sua reação na madeira varia com a composição química. Maiores percentuais de extrativos associados a um menor pH do cerne na madeira de eucalipto (GOMINHO et al., 2001; MIRANDA et al., 2007), principalmente na periferia do cerne, delimitaram o limite de transição na seção transversal do disco. Após a aplicação do *Dimethyl*, os nós também foram realçados em tons avermelhados devido ao maior acúmulo de extrativos.

A coloração avermelhada mais intensa observada na transição do cerne confirma o entendimento de que o cerne formado em idades mais avançadas de crescimento possui composição química, principalmente concentração de extrativos, superior ao inicialmente formado.

Vasos totalmente impregnados por tilos já na idade inicial de formação do cerne (53 meses) e sua ausência em idades anteriores, observados pela microscopia confocal, corroboram com a literatura de que a cernificação em eucalipto está

associada à formação de tilose (BAMBER, 1976; COSTA et al., 2006; CHERELLI, 2015).

A porcentagem de cerne aumentou com a idade das árvores, assim como observado em outros clones de eucalipto plantados no Brasil (PEREIRA et al., 2013, CASTRO et al., 2016). A formação do cerne é resultado da morte das células parenquimáticas associada ao ciclo anual de crescimento da árvore em um processo contínuo, que gradativamente aumenta com o envelhecimento da madeira (BAMBER, 1976; HILLIS, 1987). A avaliação anual permitiu identificar o início da formação do cerne na madeira de eucalipto e conhecer o comportamento do processo de cernificação ao longo das idades avaliadas.

Os diferentes espaçamentos não influenciaram a idade de formação do cerne, no entanto, houve uma tendência de aumento da porcentagem de cerne nas árvores cultivadas em maior área útil. Isso pode estar associado ao fato de que a diferença entre os espaçamentos ainda é pequena, como nos trabalhos de Gominho e Pereira (2005) e Brito et al. (2019), em que também não houve influência do espaço vital de crescimento na proporção de cerne das árvores. Em estudos com maior variação da área útil (entre 6 e 20 m²), foi observado que o espaçamento interfere na cernificação (MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009).

As árvores provenientes do espaçamento mais amplo apresentaram maiores dimensões em diâmetro e altura (Tabela 1), e os valores dos coeficientes de correlação (Figura 9) evidenciam que o volume de cerne aumentou no fuste de árvores com maior diâmetro, altura e volume individual. A relação positiva demonstra que o espaçamento de plantio não influenciou o início do processo de cernificação na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, mas alterou as taxas de crescimento das árvores em diferentes áreas úteis.

A área de cerne diminuiu no sentido base-topo das árvores, e a avaliação anual em diferentes espaçamentos confirmou que a proporção formada de cerne acompanha o aumento do diâmetro da árvore. Santos, Garcia e Geraldi (2004) afirmaram que as camadas recém-formadas de madeira aumentam gradativamente da base para o topo do fuste. Como a formação do cerne acompanha o avanço da idade, sua proporção foi maior na base da árvore por corresponder à madeira mais velha do fuste.

As maiores áreas dos discos entre as idades de 14 e 27 meses se devem ao maior incremento em diâmetro (Tabela 1). O rápido crescimento inicial das árvores até o segundo ano após o plantio (Figura 9) proporcionou maiores dimensões na

seção transversal das árvores. Esse crescimento promove uma correlação positiva entre diâmetro das árvores e porcentagem de cerne, de modo que a produção de novas células estimula o processo de cernificação (BARBOSA et al., 2019).

Em locais em que o clima influencia a produção de cerne pelo aumento no crescimento das árvores, correlações fortes e positivas entre o IMA e porcentagem de cerne foram observadas (ALMEIDA et al., 2020), entretanto, nesse estudo, as flutuações em volume promovidas pelos diferentes espaçamentos e idades demonstraram uma relação negativa entre o IMA e % Cerne. Essa relação foi bastante influenciada pelo crescimento em conjunto das árvores no povoamento, o que não corresponde ao crescimento individual das árvores. Árvores nos menores espaçamentos crescem menos em diâmetro (Tabela 2), apesar de apresentarem volume final semelhante às maiores áreas úteis devido ao maior número de árvores por área, no entanto, a relação positiva entre a formação de cerne e o crescimento permanece é demonstrada pela correlação positivo da % Cerne e volume de cerne com o diâmetro das árvores.

Houve aumento anual da densidade da madeira nos espaçamentos de 3x2 m e 3x3 m, e o maior incremento em densidade ocorreu entre as idades 32 e 53 meses, que correspondeu ao período de início da formação do cerne. De acordo com Tomazello Filho et al. (2008), o desenvolvimento da tilose no lúmen dos vasos e a deposição de substâncias extrativas no cerne proporcionam maior diferença na atenuação de raios X, o que contribuiu para o acréscimo de densidade entre as duas idades de avaliação.

O incremento em densidade ocorre em função das atividades de divisão celular do câmbio e das exigências fisiológicas do desenvolvimento das árvores (PLOMION; LEPROVOST; STOKES, 2001), e é consequência do aumento da espessura da parede, diminuição da largura das células, e da maior dimensão e menor frequência dos vasos (ZOBEL; JETT, 1995). Com o envelhecimento das árvores, as células de maiores dimensões se acumulam no lenho e essas maiores proporções tornam a madeira mais densa.

Uma relação positiva entre a área útil e a densidade foi observada nas idades de 64 e 76 meses, com aumento da densidade em cultivo mais amplo. O espaçamento de plantio, assim como a idade, também influencia a densidade da madeira de eucalipto e, normalmente, maiores espaçamentos de plantio geram madeiras mais densas (MOULIN et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018). Devido à maior disponibilidade de água, nutrientes e luz em maiores espaçamentos, as árvores investem em

acumulação de carbono, o que proporciona aumento da densidade da madeira (KING et al., 2005, 2006).

Com a variação dos percentuais de acréscimo da densidade média da madeira nos três espaçamentos, não foi possível verificar uma tendência de estabilização até a idade de 76 meses. De acordo com Trugilho, Lima e Mendes (1996), a madeira altera suas propriedades na fase de maior crescimento e tende a estabilizar com a maturidade de suas células. Do primeiro ano de crescimento da árvore até a idade de formação do cerne (53 meses) houve um incremento médio de 12% na densidade média da madeira (áreas úteis de 6 e 9 m²). Posteriormente, até a idade de corte (76 meses), o acréscimo nos valores foi de 5%.

Os maiores percentuais de aumento na densidade da madeira ocorreram entre os espaçamentos 3x1 m e 3x2 m, que, possivelmente, foram influenciados pela competição das árvores em campo. Em relação a essa concorrência, que se inicia quando os recursos indispensáveis para o desenvolvimento das árvores são reduzidos aquém do necessário (WEBER et al., 2008), fatores como menor disponibilidade de água, luz e nutrientes, em locais de menores espaçamentos de plantio, aumentam a competição e influenciam o crescimento em diâmetro e altura dos indivíduos (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008; WEST, 2014). Os menores valores médios de diâmetros, alturas e volumes individuais das árvores provenientes do espaçamento 3x1 m (Tabela 1) confirmam que houve estagnação do crescimento, o que afetou o incremento em densidade da madeira.

Diferentemente do aumento da densidade em maiores espaçamentos de plantio, nos três espaços vitais de crescimento não houve alteração do padrão de variação da densidade no sentido medula-casca, o que demonstra que a pequena diferença da área útil disponível para o desenvolvimento da árvore não altera a variabilidade radial da densidade da madeira.

Independente do espaçamento de plantio, houve a predominância de picos de valores de densidade na região da medula nas idades iniciais (até 32 meses), que também foi observada por Sette Júnior et al. (2009) e Castro et al. (2017) em árvores fertilizadas, e por Câmara et al. (2018) em árvores sob estresse abiótico. Com o avanço da idade, proporcionalmente as regiões mais externas do fuste das árvores se tornam mais densas com o aumento das dimensões das células, e a ocorrência de picos de densidade na medula diminui em árvores mais velhas.

A menor densidade do cerne em relação à do alburno acompanha a variabilidade radial da madeira (aumento da medula para casca), mas não foi

verificado um padrão de variação entre os valores médios de densidade do cerne e do alburno nas diferentes idades e espaçamentos de plantio. Downes et al. (1997) relatam que o aumento da densidade no sentido medula-casca ocorre devido a alterações na quantidade de lenho juvenil e adulto, e menor proporção entre lenho inicial e tardio, o que torna a madeira dessa região mais densa.

A madeira mais densa do cerne aos 53 meses pode estar relacionada à composição química, devido à maior deposição de extrativos na região após a cernificação. Wilkes (1984) constatou que a quantidade e os tipos de compostos químicos nas células também interferem na densidade da madeira de eucalipto, e atribuiu o acréscimo dos valores ao maior conteúdo químico.

A diminuição da densidade do cerne no espaçamento 3x1 m ao longo das idades evidencia a estagnação do crescimento das árvores, com o avanço da idade em decorrência da maior competição em locais de área útil reduzida, como também foi observado para o comportamento da densidade média da madeira de eucalipto no espaçamento 3x1 m.

O menor incremento em densidade após a formação do cerne na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* pode influenciar na decisão por menores ciclos de corte (atualmente, 6-7 anos em empresas de polpa e papel). Até 53 meses de idade, quando ocorre o maior incremento em densidade da madeira, o povoamento está próximo da sua produção máxima (ITC entre os 53 e 64 meses, Figura 8), sugerindo uma antecipação da idade de corte baseada na qualidade da madeira e crescimento das árvores.

A possibilidade de modelar a quantidade de cerne utilizando variáveis dendrométricas de fácil obtenção, como diâmetro das árvores, fornece aos gerentes florestais um método não invasivo de obter essa propriedade (ALMEIDA et al., 2020). Apesar da subestimação de árvores mais novas, nossos resultados podem fornecer um caminho para caracterização fenotípica dos plantios em relação à quantidade de cerne produzida antes do corte, e ajudar em tomadas de decisões relacionadas ao uso da madeira. Estudos com maior amostragem de árvores e locais são sugeridos, uma vez que vários fatores, como as condições ambientais e climáticas, interagem para influenciar o crescimento e formação de madeira nas árvores.

8 CONCLUSÕES

A marcação de cerne baseada na visualização da cor natural da madeira não foi conclusiva para identificar o início da cernificação, que somente foi possível pela coloração química e presença de tilose.

A avaliação permitiu identificar a idade em que se iniciou a formação do cerne na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*. Os espaçamentos de plantio não influenciaram a idade de cernificação, mas alteraram as taxas de crescimento em diâmetro, altura e volume, que, conseqüentemente, aumentaram a proporção de cerne nas árvores.

O aumento do espaçamento de plantio proporcionou pequenos acréscimos na densidade com o avanço da idade, o que demonstrou que essa propriedade da madeira foi pouco relacionada com o desenvolvimento individual da árvore.

Os maiores incrementos em densidade foram observados até a idade do início da formação do cerne, o que evidencia que essa propriedade é influenciada pelo aumento nas dimensões das células da madeira com o avanço da idade e não pelo processo de cernificação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. N. F. et al. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117743, 2020.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BAMBER, R. K. Heartwood, its function and formation. **Wood Science and Technology**, vol. 10, p. 1-8, 1976.
- BAMBER, R. K. Sapwood and Heartwood. **Wood Technology and Forest Research Division**, n. 2, p. 1-8, 1987.
- BARBOSA, T. L. et al. Influence of site in the wood quality of *Eucalyptus* in plantations in Brazil. **Southern Forests**, v. 81, n. 3, p. 247-253, 2019.
- BERTHIER, S. et al. Irregular heartwood formation in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): consequences for biomechanical and hydraulic tree functioning. **Annals of Botany**, v. 87, p. 10-25, 2001.
- BOSCHETTI, W. T. N. et al. Parâmetros dendrométricos e excentricidade da medula em árvores inclinadas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 781-789, 2015.
- BRITO, A. S. et al. Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of *Eucalyptus* wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. 1-9, 2019.
- CÂMARA, A. P. et al. Physiological disorders affecting dendrometric parameters and *Eucalyptus* wood quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, p. 27-34, 2018.
- CASTRO, V. R. **Efeito do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2014. 141 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2014.
- CASTRO, A. F. N. M. et al. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 551-560, 2016.
- CASTRO, V. R. et al. Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1017-1027, 2017.
- CHERELLI, S. G. **Cerne e alborno em eucaliptos: influência da espécie e da idade nas propriedades tecnológicas**. 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência

Florestal) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2015.

CHERELLI, S. G. et al. Heartwood and sapwood in eucalyptus trees: non-conventional approach to wood quality. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 90, n. 1, p. 425-438, 2018.

COSTA, C. G. et al. Xilema. In: APPEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M (Org.). **Anatomia Vegetal**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 129-154.

COSTA, A. C. S. et al. Propriedades da madeira de cerne e albarno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017.

DÉJARDIN, A. et al. Wood formation in Angiosperms. **C. R. Biologies**, v. 333, p. 325-334, 2010.

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

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

FEUCHARD, L. D. **Influência do espaçamento de plantio e idade de colheita na qualidade da madeira de eucalipto para celulose**. 2015. 42 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo: Nobel, v. 1, 1985. 112 p.

GJERDRUM, P. Estimating missing sapwood rings in three European gymnosperm species by the heartwood age rule. **Dendrochronologia**, v. 31, p. 228-231, 2013.

GOMINHO, J. **Variação do cerne no eucalipto e a sua influência na qualidade da madeira para produção de pastas para papel**. 2003. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2003.

GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Variability of heartwood content in plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Wood and Fiber Science**, v. 32, n. 2, p. 189-195, 2000.

GOMINHO, J.; PEREIRA, H. The influence of tree spacing in heartwood content in *Eucalyptus globulus* Labill. **Wood and Fiber Science**, v. 37, n. 4, p. 582-590, 2005.

GOMINHO, J. et al. Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid *Eucalyptus grandis* x *urophylla*. **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 1, p. 3-8, 2001.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 362 p.

- HILLIS, W. E. Chemical aspects of heartwood formation. **Wood Science and Technology**, v. 2, p. 241-259, 1968.
- HILLIS, W. E. **Heartwood and tree exudates**. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 268 p.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS – IAWA. Committee on Nomenclature. **Multilingual glossary of terms used in wood anatomy**. Verlag-Anst: Buchdruckerei Konkordia, 1964. 185 p.
- KING, D. A. et al. Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia. **Functional Ecology**, v. 19, p. 445-453, 2005.
- KING, D. A. et al. The role of wood density and stem support costs in the Growth and mortality of tropical trees. **Journal of Ecology**, v. 94, p. 670-680, 2006.
- MAURI, R. **Anatomia e densidade do lenho de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com variação de altitude e de topografia, no estado de Minas Gerais**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2010.
- MIRANDA, I. et al. Heartwood, extractives and pulp yield of three *Eucalyptus globulus* clones grown in two sites. **Appita Journal**, v. 60, n. 6, p. 485-500, 2007.
- MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacings. **Trees**, v. 23, n. 2, p. 367-372, 2009.
- MORATAYA, R. et al. Foliage biomass - sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* L.F. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. **Forest Ecology and Management**, v. 113, p. 231-239, 1999.
- MOULIN, J. C. et al. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-10, 2017.
- MOYA, R.; BOND, B.; QUESADA, H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. **Wood Science and Technology**, v. 48, n. 2, p. 411-433, 2014.
- OLIVEIRA, I. R. et al. Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. **Southern Forests**, v. 80, n. 4, p. 311-318, 2018.
- PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. 3 ed. Columbia: Academic Press, 2008. 469 p.
- PEREIRA, H.; GRAÇA, J.; RODRIGUES, J. C. Wood chemistry in relation to quality. In: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (Ed.) **Wood quality and its biological basis**. Oxford: Blackwell Publishing, 2003. p. 53-86.
- PEREIRA, B. L. C. et al. Correlações entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.

PLOMION, C.; LEPROVOST, C.; STOKES, A. Wood formation in trees. **Plant Physiology**, v. 127, p. 1513-1523, 2001.

R CORE TEAM, 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 20 set. 2018.

SAITO, K. et al. Chemical differences between sapwood and heartwood of *Chamaecyparis obtusa* detected by ToF-SIMS. **Applied Surface Science**, v. 255, p. 1088-1091, 2008.

SANTOS, P. E. T.; GARCIA, J. N.; GERALDI, I. O. Posição da tora na árvore e sua relação com a qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 66, p. 142-151, 2004.

SAVIDGE, R. A. Tree growth and wood quality. In: BARNETT, J. R.; JERONIMIDIS, G. (Ed.) **Wood quality and its biological basis**. Oxford: Blackwell Publishing, 2003. p. 1-29.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2 ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SETTE JÚNIOR, C. R. et al. Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill, aos 24 meses de idade. **Floresta**, v. 39, n. 3, p. 535-546, 2009.

SHINOZAKI, K. et al. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. **Japanese Journal of Ecology**, v. 14, n. 4, p. 133-139, 1964.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest Products and Wood Science: An Introduction**. 6 ed. Iowa: Blackwell Publishing, 2011. 466 p.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. 1 ed. New York: Springer Wood Science, 1984. 245p.

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

TAYLOR, A. M.; GARTNER, B. L.; MORELL, J. J. Heartwood formation and natural durability – a review. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 4, p. 587-611, 2002.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Application of technique in nondestructive evaluation of *Eucalyptus* wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 139-150, 2008.

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

VALLE, M. L. A. et al. Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 481-490, 2013.

WEBER, P. et al. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest secessions. **Forest Ecology and Management**, v. 254, n. 1, p. 96-106, 2008.

WEST, P. W. Growing plantation forests. 2 ed. Cham: Springer, 2014. 329p.

WILKES, J. The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 113-120, 1984.

WILKINS, J. Sapwood, heartwood and bark thickness of silviculturally treated *Eucalyptus grandis*. **Wood Science and Technology**, v. 25, p. 415-423, 1991.

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. **Genetic of wood production**. 1 ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 337p.