**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Vinicius Resende de Castro

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2014**

Vinicius Resende de Castro
Engenheiro Florestal

**Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e
qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARIO TOMAZELLO FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Castro, Vinicius Resende de

Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden / Vinicius Resende de Castro. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.

141 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Nutrição 2. Estresse hídrico induzido 3. Atividade cambial 4. Incremento em diâmetro 5. Densitometria de raios X I.Título

CDD 634.9734
C355e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

Aos meus pais, José de Castro e Virgínia, por terem me concedido a oportunidade de viver, pelo exemplo de vida e união e, principalmente, pela educação: maior herança que um filho pode herdar de seus pais.

Ao meu irmão Henrique, pela amizade e amor que nos une.

*Ao meu amor, Paula Surdi, que sempre me apoiou e
acompanhou nesta jornada.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade, generosidade e conquistas;

À ESALQ/USP, através de todos os professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela acolhida durante o mestrado e doutorado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Prof. Mário Tomazello Filho, pela dedicação e conhecimentos transmitidos ao longo de todos esses anos e competência na orientação desta tese;

Ao pesquisador Gilles Chaix, pelos ensinamentos, orientações, atenção e receptividade durante o trabalho;

Ao pesquisador Jean Paul Laclau, pelas valiosas orientações, apoio e disponibilização da área experimental;

Ao Eng. Rildo Moreira e à Secretária Elaine, da Estação Experimental de Itatinga, bem como à equipe de campo da FLORAGRO, por todo o apoio durante a execução dos trabalhos de campo;

À Maria Aparecida Bermudez, pelo apoio na confecção de lâminas histológicas, amizade, carinho e conversas no cafezinho;

Ao Seu Antônio, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, pelo auxílio nas análises laboratoriais;

Ao Prof. Carlos Tadeu, pelo auxílio nas análises estatísticas;

Aos técnicos Aparecido e Alex Canale, pelo apoio nas etapas experimentais;

Aos amigos, Matheus Chagas, Cláudio Anholetto, Priscila Garcia, Alisson Rangel, Angel Ferreira, Saly Takeshita, Camila Sarto, Mariana Pires, Ivanka Oliveira, Alejandro González, Samara Franzol, Tássio Trevizor, Carlos Sette, Victor Moutinho e Marco Arizapana, pelo que aprendemos juntos, pelos momentos de trabalho e de descontração;

Ao LQCE, pelas análises de composição química, em especial à Regina;

À minha namorada, Paula Surdi, pelo carinho e paciência;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!!!

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Mudanças climáticas e o efeito do estresse hídrico nas árvores.....	17
3.2 Aplicação de fertilizantes minerais nas plantações de <i>eucalyptus</i>	20
3.3 Possibilidade de substituição do potássio pelo sódio em plantações de <i>Eucalyptus</i>	24
3.4 Sazonalidade da atividade cambial e a formação do lenho das árvores	26
3.5 Relação do diâmetro do tronco com as variáveis climáticas	29
3.6 Densidade básica e aparente da madeira de eucalipto.....	32
3.7 Anatomia do lenho sob estresse hídrico e fertilização mineral.....	36
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 Local.....	41
4.2 Área de estudo e delineamento experimental	42
4.3 Sazonalidade do crescimento e incremento do tronco das árvores	44
4.3.1 Crescimento em altura e incremento em diâmetro do tronco das árvores	44
4.3.2 Sazonalidade da atividade cambial do tronco das árvores.....	46
4.4 Dados climáticos	48
4.5 Caracterização do lenho.....	49
4.5.1 Densidade básica do lenho	50
4.5.2 Densidade aparente do lenho através de imagens digitais de raios x.....	51
4.5.3 Diferenciação das regiões do cerne x alburno por colorimetria.....	52
4.5.4 Composição química do lenho	52
4.5.5 Características anatômicas do lenho	52
4.6 Análises estatísticas	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1 Incremento, diâmetro e volume do tronco	55
5.2 Sazonalidade da atividade cambial do tronco	67
5.3 Propriedades físicas do lenho	74
5.3.1 Densidade básica do lenho	74
5.3.2 Densidade aparente do lenho	78

5.4 Avaliação macroscópica da seção transversal do lenho.....	84
5.5 Composição química do lenho.....	90
5.6 Características anatômicas do lenho	91
5.6.1 Dimensões de fibras	91
5.6.2 Dimensões dos elementos de vaso	96
5.7 Características anatômicas e a densidade aparente do lenho	102
6 SÍNTESE DOS RESULTADOS	109
7 CONCLUSÕES.....	113
REFERÊNCIAS	115
ANEXOS.....	139

RESUMO

Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

As árvores de espécies de eucalipto de rápido crescimento, nas plantações florestais no Brasil e de outras regiões do mundo, encontram-se sob o efeito das mudanças climáticas, do estresse hídrico e da baixa fertilidade do solo, afetando o seu crescimento, a formação e a qualidade do lenho. O estudo teve o objetivo de analisar a interação do crescimento e da qualidade do lenho das árvores de eucalipto, submetidas à redução das chuvas e nutrição de K e Na. A dinâmica da formação do lenho com avaliações mensais da atividade cambial, incremento em diâmetro do tronco e as características físicas, químicas e anatômicas do lenho de árvores de *E. grandis* no 12º, 24º e 36º mês de idade foram avaliados em parcelas experimentais implantadas em maio de 2010 na Estação Experimental de Itatinga-SP. Os tratamentos foram definidos por dois regimes hídricos (100% e 66% das chuvas, com redução artificial com lonas em polietileno) e três tipos de nutrição: K (K - 4,5 kmol/ha), N (Na - 4,5 kmol/ha) e controle. Foram selecionadas 54 árvores de eucalipto com dezoito meses de idade, avaliando-se o incremento em diâmetro do tronco a cada trinta dias, no período de novembro de 2011 a outubro de 2013, utilizando-se dendrômetros de aço. A sazonalidade cambial foi avaliada por coletas mensais de amostras do lenho e as análises anatômicas da camada cambial realizadas no primeiro ano de avaliação. As variáveis climáticas e a umidade do solo foram correlacionadas com o incremento em diâmetro do tronco e a sazonalidade da atividade cambial das árvores. Na amostragem do lenho foram selecionadas quatro árvores por tratamento no 12º, 24º e 36º mês para a determinação da densidade básica na direção sentido longitudinal do tronco. Amostras do lenho do DAP foram avaliadas em relação às fibras e vasos, densidade básica e aparente e composição química. Os resultados indicaram efeito da sazonalidade climática na atividade cambial e incremento em diâmetro do tronco das árvores, além da influência da defasagem (*lag*) no crescimento. O tratamento de aplicação do K e 100% de disponibilidade hídrica (K/+A) induziu maior valor de incremento do tronco e altura total das árvores. Houve diferença significativa nos tratamentos de nutrição e disponibilidade hídrica em relação ao crescimento das árvores, à densidade do lenho, dimensões das fibras e vasos e composição química do lenho. As imagens digitais do lenho obtidas pelo raios X permitiram analisar a variação da densidade aparente do lenho. A análise colorimétrica possibilitou detectar a formação do cerne no lenho das árvores no 36º mês. Os resultados do trabalho poderão ser utilizados como subsídios para a adoção de práticas silviculturais nas plantações florestais em áreas com estresse hídrico e/ou afetadas pelas mudanças climáticas, bem como a substituição parcial de K por Na.

Palavras-chave: Nutrição; Estresse hídrico induzido; Atividade cambial; Incremento em diâmetro; Densitometria de raios X

ABSTRACT

Effects of potassium, sodium and water availability on growth and wood quality of *Eucalyptus grandis* W Hill ex Maiden trees

The forest plantations of eucalyptus of fast growing in Brazil and other regions of the world are under the effect of climate change, water stress and low soil fertility, affecting growth and wood quality. The study aimed to analyze the interaction of growth and quality of the wood of eucalyptus trees, subjected to reduced rainfall and nutrition of K and Na. The dynamics of the formation of the wood with monthly assessment of the cambial activity, an increase in trunk diameter and the physical, chemical and anatomical characteristics of the wood of trees of *E. grandis* on the 12th, 24th and 36th month of age were evaluated in experimental plots established in May/2010 in Experimental Station of Itatinga - SP. Treatments were defined by two water regimes (100% and 66% of rainfall, artificial reduction with polyethylene tarps) and three types of nutrition : K (K - 4.5 kmol/ha), N (Na - 4.5 kmol/ha) and control. 54 trees of eucalyptus were selected to 18th month of age by evaluating the increase in trunk diameter every thirty days, from November/2011 by October/2013, using steel dendrometers. The cambial seasonality was assessed monthly by sampling of the wood and anatomical analyzes of the cambial layer performed in the first year of assessment. The climatic variables and soil moisture were correlated with the increase in trunk diameter and seasonality of cambial activity of trees. In the sample of the wood have been selected four trees per treatment in the 12th, 24th and 36th months of age for the determination of the density in the longitudinal direction of the trunk. Samples of wood from DAP were evaluated in relation to fibers and vessels, basic density and chemical composition. The results showed the effect of seasonality on cambial activity and increase in diameter of trees, beyond the influence of lag in growth. The treatment of applying K and 100% water availability (K/+A) induced larger increment value and the total height of the trunk of the trees. There was a significant difference in nutrition and water availability of the treatments in relation to the growth of trees, density of wood, fiber dimensions and vessels and chemical composition of wood. Digital images of the samples obtained by X-ray, allowed to analyze the variation of the apparent density of the wood. The colorimetric analysis allowed to detect the formation of heartwood in the wood of trees in the 36th month. The results may be used as subsidies for the adoption of silvicultural practices in forest plantations in areas with water and/or affected by climate change stress as well as the partial replacement of K by Na.

Keywords: Nutrition; Induced water stress; Cambial activity; Diameter increment; X-ray densitometric

1 INTRODUÇÃO

As extensas plantações florestais no Brasil e em outras regiões do mundo encontram-se sob o efeito das mudanças climáticas globais e com risco de declínio de produtividade e de áreas plantadas, induzido pelo aumento da temperatura e redução da precipitação. Os registros climáticos de algumas regiões do mundo indicam uma tendência de aquecimento significativo ($> 2^{\circ}\text{C}$), ao longo do século passado, bem como a ocorrência de períodos de seca, afetando a vegetação de grandes áreas, desde o início da década de 1990 (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007). Essas alterações são provocadas pelas atividades humanas, pelo aumento da poluição por gases tóxicos e indutores de efeito estufa (CO_2 , CO , CH_4 , N_2O , entre outros), elevando a temperatura e alterando a frequência e intensidade da precipitação.

As florestas naturais e as plantações florestais, nas regiões semiáridas e em áreas temperadas e tropicais, estão sendo diretamente afetados pelas alterações climáticas. O estresse hídrico tem provocado a diminuição do crescimento e o aumento da mortalidade das árvores (ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2010), embora, poucos estudos tenham sido realizados em plantios de eucalipto.

O impacto das mudanças climáticas globais no Brasil poderá afetar negativamente todos os segmentos da cadeia produtiva de base florestal, incluindo os plantios de eucalipto, que somam 5,10 milhões de hectares. Essa significativa área visa suprir a demanda das indústrias brasileiras, com forte tendência de expansão para o atendimento do mercado nacional e internacional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013). A expansão na área plantada é resultado de fatores favoráveis de ordem econômica, silvicultural e ambiental, como o crescimento das árvores em ciclos de curta rotação, alta produtividade e qualidade da madeira.

A avaliação e o monitoramento contínuo do crescimento das árvores são fundamentais para a avaliação da produtividade dos plantios, propiciando a compreensão da resposta das árvores às variações das condições ambientais e da aplicação de fertilizantes minerais. Nesse aspecto, a avaliação periódica da sazonalidade da atividade cambial possibilita o acompanhamento do crescimento do diâmetro do tronco das árvores de florestas tropicais e temperadas, quando se

utilizam dendrômetros ou se faz a avaliação da xilogênese (MARIAUX, 1969, 1970; DÉTIENNE et al., 1988; BOTOSSO; TOMAZELLO FILHO, 2001).

No Brasil, as áreas utilizadas para a implantação de programas de reflorestamento com eucalipto são, de modo geral, de baixa fertilidade, deficientes de potássio e de outros minerais e com característico déficit hídrico (GAVA, 1997; GONÇALVES et al., 2004). A possibilidade da substituição total ou parcial do potássio por sódio na fertilização dos solos em plantações florestais, segundo Marschner (1995), tem interesse prático e científico. As fontes de potássio, contendo sódio em sua composição, requerem menor energia no seu processo de purificação, permitindo, com isso, uma redução no preço dos fertilizantes.

A compreensão da interação de alguns elementos químicos, como o sódio e o potássio, e da disponibilidade hídrica, bem como os seus efeitos na sazonalidade do crescimento, em diâmetro do tronco e da qualidade do lenho das árvores, são determinantes na expansão dos plantios florestais para novas áreas do país. Os elementos minerais influenciam o balanço hídrico das árvores, aumentando a sua eficiência no uso da água, sob estresse hídrico, e, por consequência, na sua resistência à seca (GONÇALVES et al., 2000; ALMEIDA, 2009).

Trabalhos avaliando a caracterização tecnológica da madeira em árvores de espécies de eucalipto jovens (1 a 3 anos) são escassos e os resultados de pesquisas referentes ao efeito de fertilizantes minerais nas propriedades da madeira são controversos, com indicação de aumento (VIGNERON et al., 1995 e BOUVET et al., 1999) e redução (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989 e WASHUSEN et al., 2005) ou nulo (BAMBER et al. 1982; PEREIRA, 1990) da densidade do lenho. Além das características químicas, Silveira (2000) ressalta a importância das pesquisas referentes ao efeito da fertilização mineral nas propriedades anatômicas, físicas e mecânicas de árvores de eucalipto de elevada taxa de crescimento. Sette Junior et al. (2013) ressaltam a importância de estudos os quais tratam do efeito da fertilização mineral sobre a qualidade e as propriedades da madeira de eucaliptos, principalmente quanto à análise isolada de nutrientes.

Algumas pesquisas têm sido conduzidas em ambiente controlado, visando analisar o crescimento das árvores, sob estresse hídrico (NGUGI et al., 2004; COOPMAN et al., 2008); no entanto, são escassos os estudos que avaliam a atividade cambial, formação e qualidade do lenho das árvores.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho foi a avaliação do efeito do potássio e do sódio, bem como da disponibilidade de água, no crescimento, formação e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*.

Os objetivos específicos foram a avaliação da (i) sazonalidade da atividade cambial e do incremento em diâmetro do tronco, bem como do efeito das variáveis climáticas; (ii) dimensões das fibras e dos vasos e da densidade básica e aparente do lenho e o comportamento com a idade; e (iii) composição química estrutural do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mudanças climáticas e o efeito do estresse hídrico nas árvores

As mudanças do clima, devido às atividades humanas e aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, acarretam a elevação das temperaturas médias e alteram a frequência e intensidade das precipitações. Tais fenômenos estarão sujeitos a variações mais drásticas nas próximas décadas, atingindo, diretamente, o crescimento das florestas naturais e plantadas, em nível global, principalmente nas regiões tropicais (IPCC, 2007, 2013; ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2010; GROENIGEN et al., 2011; NOL et al., 2011; REAY et al., 2012).

O relatório de mudanças climáticas do IPCC (2013) indica que as observações, realizadas desde 1950, demonstram mudanças em eventos, como a ocorrência de temperaturas extremas, ao longo do dia, e frequentes ondas de calor. O relatório prevê, no século XXI, um aumento provável da precipitação, em algumas regiões, e o aumento ou diminuição acentuado das temperaturas, em escala global. Em relação às ondas de calor, prevê-se um aumento da sua frequência e/ou intensidade, além do aumento da velocidade média do vento, com ciclones tropicais. O relatório conclui que as mudanças da precipitação e da temperatura implicarão na alteração do ciclo da água, com maior frequência de inundações e seca, dependendo da região.

A Primeira Conferência Nacional de Mudanças Climáticas no Brasil, realizada em 2013, indicou que a temperatura pode ser acrescida de 2 a 4°C, ainda neste século; o relatório inclui, ainda, a análise de vinte mil amostras de partículas de ar da atmosfera, provenientes de diversas regiões do país. A previsão para as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste é de um regime de chuvas menor e diminuição da vazão dos rios; nas regiões Sul e Sudeste, prevê-se uma maior precipitação, com o volume de até 30% do volume de água, nas bacias dos rios Paraná e do Prata. Prevê-se, ainda, que as alterações climáticas alterem o mapa do agronegócio e da distribuição das florestas, dependendo da intensidade da sua ação antrópica no ambiente.

O relatório da International Fertilizer Industry Association – IFA (2009) atribui a mudança climática global, parcialmente, ao manejo inadequado do nitrogênio, responsável pelo aumento da concentração de N_2O , resultando num efeito estufa

296 vezes mais drástico que o CO₂. O IPCC (2007) estimou um aumento de 17% para todas as emissões de N₂O, oriundas do uso de fertilizantes minerais, entre os anos de 1990 e 2005, e projeta um aumento de 35 a 60%, até o ano de 2030. O relatório do IPCC, no entanto, ressalta que tais previsões podem não se concretizar, uma vez que a adoção de práticas silviculturais mais adequadas pode, parcialmente, atenuar o aumento das emissões (SMITH et al., 2007).

As florestas, nas áreas semiáridas, bem como nas áreas temperadas e tropicais, são diretamente afetadas por tais perturbações climáticas, ocasionando secas severas, podendo estar associadas ao fenômeno climático, conhecido como El Niño (VAN NIEUWSTADT; SHEIL, 2005). Sob condições de estresse hídrico, são observadas a diminuição do crescimento e o aumento da mortalidade das árvores (PEÑUELAS et al., 2001; CLARK, 2004; NEPSTAD et al., 2007; SOJA et al., 2007; ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2010). Considerando que, nas próximas décadas, a deficiência hídrica seja mais intensa, em muitas áreas de produção de alimentos e florestas, é importante que se entenda a influência da disponibilidade de água sobre a fisiologia das árvores para propor estratégias economicamente viáveis.

A obtenção de material de alta produtividade requer, dentre outros, a seleção de material genético, apropriado para cada condição ambiental, principalmente em sítios em que a disponibilidade hídrica é limitada, em consequência da baixa precipitação ou irregularidade na sua distribuição (REIS et al., 1989; CHAVES et al., 2004; STAPE et al., 2004 apud REIS et al., 2006).

A tolerância ao estresse hídrico varia com o genótipo. Desse modo, algumas plantas desenvolvem mecanismos de adaptação, tornando-se mais eficientes na absorção de água do solo, especialmente pelo crescimento de um extenso e profundo sistema radicular, e de características da parte aérea, como adequação da área foliar, rápido fechamento dos estômatos e manutenção de uma reduzida temperatura foliar, dentre outros (REIS et al., 1988; GOMES, 1994; LI et al., 2000 apud REIS et al., 2006).

Na Floresta Amazônica, Brando et al. (2008) simularam uma redução de 35 a 41% das chuvas, através do uso de lonas plásticas, durante quatro anos, e verificaram, a partir do segundo ano de estudo, uma diminuição da produção primária líquida de 41% da parte aérea, em relação à testemunha. Nepstad et al. (2007) avaliaram a seca induzida em um hectare na região central da Amazônia e

verificaram um declínio da umidade no solo, bem como de um aumento do estresse hídrico no dossel, com um aumento da mortalidade, de 1,5 para 9%.

Vários experimentos foram conduzidos em ambiente controlado para avaliar o efeito do estresse hídrico sobre o crescimento inicial em seis espécies de eucalipto. O déficit hídrico induziu à redução do acúmulo de biomassa e modificações na estrutura das plantas, mas, também, resultou em adaptações morfológicas e fisiológicas diferentes entre populações e/ou espécies (NGUGI et al., 2004; MERCHANT et al., 2007; COOPMAN et al., 2008). São escassos os estudos sobre a avaliação da atividade cambial, o incremento do tronco e formação e qualidade do lenho em árvores de *Eucalyptus*, sob o efeito de um estresse hídrico severo e prolongado no campo.

Um aumento da área foliar foi, também, observado em plantios irrigados de eucaliptos (JARVIS et al., 1989; OLBRICH et al., 1993). A redução da condutância estomática e, por consequência, da fotossíntese em plantios de eucalipto foi observada em resposta ao aumento do déficit hídrico do solo e da pressão de vapor no ambiente (WHITE et al., 1996, 2000; MIELKE et al., 1999).

Um experimento de campo, utilizando árvores de *Eucalyptus grandis* com 3 e 9 anos de idade, avaliou-se a resposta ao déficit hídrico do solo, conduzido com a redução artificial de chuva; a intensidade de estresse não foi suficiente para se observar diferenças significativas (DYE, 1996).

Diversos trabalhos realizados (KALLARACKAL; SOMEN, 1997; BINKLEY et al. 2004; HUBBARD et al., 2004; YIN et al., 2004; STAPE et al., 2004 apud ALMEIDA, 2009) mencionam a eficiência do uso da água, como principal e limitante fator de crescimento das florestas. Tal situação constitui um índice bastante útil não somente para a avaliação dos genótipos mais eficientes, mas, também, para a definição de práticas de manejo que aumentem a produtividade e que sejam mais sustentáveis, uma vez que a produção final de madeira é resultante da interação genótipo x ambiente.

Oliveira et al. (2011), avaliando a correlação entre a precipitação e o incremento anual, em diâmetro, do tronco de *Eucalyptus grandis* de 23 anos, encontraram correlações positivas e significativas. Os autores associaram estes resultados aos anos que apresentaram maior volume de chuvas; também, demonstraram maiores valores de incremento, que favoreceram o crescimento, ou

seja, uma maior quantidade de água no solo aumenta as condições favoráveis ao crescimento da planta.

Considera-se que, nas próximas décadas, a deficiência hídrica seja mais intensa em muitas áreas de produção, sendo notória a importância do K, Na e do Cl para os mecanismos de abertura e fechamento de estômatos no controle e na eficiência do uso da água (MALAVOLTA, 1980; MARSCHNER, 1995; EPSTEIN; BLOON, 2006 apud ALMEIDA, 2009). Não existem estudos, no entanto, que tratem especificamente do manejo de plantios florestais de *Eucalyptus*, envolvendo a fertilização com tais nutrientes, aliada a tratamentos com exclusão artificial de água da chuva, com a perspectiva de aumento da eficiência de uso de água.

3.2 Aplicação de fertilizantes minerais nas plantações de *Eucalyptus*

Devido à grande adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, ao rápido crescimento e aos múltiplos usos, as plantações de eucalipto no Brasil ocupavam, em 2012, cerca de 5,10 milhões de hectares, com crescimento de 4,5%, em relação ao ano anterior. O estabelecimento de novos plantios para atender à demanda de matéria prima para novos projetos industriais de papel e celulose alavancaram o crescimento da área plantada (ABRAF, 2013).

Apesar de as árvores de *Eucalyptus* sp. apresentarem uma boa adaptação em quase todas as regiões do Brasil, com elevado potencial silvicultural e plantações em larga escala, grande parte das regiões utilizadas abrange áreas com solos de baixa fertilidade, presente no bioma “Cerrado” (Figura 1).

Figura 1 – Principais distritos florestais do país por região e bioma (ABRAF, 2013 e IBGE, 2012 adap.)

Para se obter ganhos em produtividade de madeira, no entanto, é indispensável a aplicação de fertilizantes, contendo os macronutrientes N, P, K e alguns micronutrientes, principalmente, B, Zn, Mg e S (BARROS; NOVAIS, 1996; LANA; NEVES, 1994; ROCHA, 2000).

Após ciclos sucessivos de produção, as respostas das plantações à adição de K são expressivas. Um estudo, realizado por Silveira et al. (1998), mostrou que o K e B foram os nutrientes cujas deficiências eram mais comuns em plantios no Brasil.

Os efeitos da fertilização mineral em árvores de eucalipto são reconhecidos desde 1960, com a pesquisa realizada por Mello (1968), com árvores de *Eucalyptus saligna*, em solos pobres e ácidos do Cerrado: aos dois anos de idade, a diferença de produção das árvores das parcelas adubadas e não adubadas era de 33 m³/ha.

O aumento do volume de madeira em árvores de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* com adubação potássica variou de 67 a 118% no Cerrado do Estado de Minas Gerais (BARROS et al., 1981 apud por SILVEIRA; MALAVOLTA, 2003).

A importância da correção potássica nesses solos foi confirmada pelo trabalho pioneiro de Gava (1997), na região de Angatuba/SP, onde a aplicação de diferentes doses de K₂O por hectare, em um solo com baixo valor potássio trocável (14 ppm), proporcionou uma resposta significativa no IMA e volume cilíndrico, aos sete anos de idade; demonstrou, ainda, que a aplicação de K é uma ferramenta importante na tomada de decisão sobre fertilização.

Stape (1992), estudando a fertilização de *Eucalyptus grandis*, em areia quartzosa de baixa fertilidade, em uma região de déficit hídrico intenso, observou ganhos de volume de madeira de 81%, quando aplicou NPK + micronutrientes, em comparação com a testemunha.

Scatolini et al. (1996) avaliaram a resposta do *Eucalyptus grandis* sob doses de KCl (72 e 288 g/planta), aplicadas, de uma só vez, trinta dias após o plantio ou parceladas em até quatro vezes, no 1º, 12º, 24º e 36º mês de idade, em três solos (latossolo vermelho-amarelo, textura argilosa, podzólico vermelho-amarelo, textura argilosa e latossolo vermelho-amarelo textura média); observaram-se, ainda, teores de K disponível na camada de 0 a 20 cm de solo, em torno de 0,7 mmolc.dm⁻³, e CTC, ao redor de 60 mmolc.dm⁻³. Os resultados demonstraram uma vantagem significativa para a dose mais elevada nos três locais, tanto para volume cilíndrico

como para a área basal, altura e DAP, porém sem diferenciação quanto aos modos de aplicação.

Valeri et al. (1996) analisaram o efeito da adubação com K (30 e 60 g/planta de K_2O) e do parcelamento (dividida em até cinco anos) sobre o incremento do volume de madeira e a idade de corte de árvores de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, plantadas em areia quartzosa e latossolo vermelho-escuro álico. Concluíram que, no latossolo, obteve-se o maior crescimento em volume cilíndrico das árvores com a aplicação de 30 g/planta de K_2O , parcelados nos 4 ou 5 primeiros anos; a idade de corte das árvores não foi afetada pelos tratamentos. Os mesmo autores verificaram que, na areia quartzosa, o maior crescimento foi obtido com a aplicação de 60 g/planta de K_2O , parcelados em doses iguais nos cinco primeiros anos ou em doses crescentes nos quatro primeiros anos; entretanto, a aplicação adequada de K diminuiu a idade de corte, em relação às testemunhas.

Stape e Benedetti (1997) verificaram um ganho de 4,45 m³/ha/ano na produção de madeira de *Eucalyptus grandis*, através da adubação, sendo a aplicação de N e K responsável pelos melhores resultados. Esses autores não identificaram, contudo, qual dos dois nutrientes mais contribuiu para esse ganho. Diante dos resultados relatados por Gama-Rodrigues (1997) e da menor intensidade de resposta de eucalipto à aplicação de nitrogênio (BARROS et al., 1990), pode-se levantar a hipótese de que o K tenha sido o nutriente mais importante na adubação de brotações.

Os valores médios de concentração de nutrientes em árvores de diferentes espécies de eucaliptos nos Estados de São Paulo e Minas Gerais, com idades entre 6,5 a 9 anos, mostraram que, cerca de 20% do conteúdo total de K, encontra-se nas folhas, 12% nos ramos, 20% na casca e 45% na madeira (BELOTTE, 1979; PEREIRA et al., 1984; REIS et al., 1987; MORAIS et al., 1990; SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001; SANTANA et al., 1999 apud SILVEIRA et al., 2000).

Faria et al. (2002) avaliaram a relação entre a produtividade de madeira (IMA) e o conteúdo de K, no tronco de clones de *Eucalyptus* na região do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, encontrando uma correlação linear entre as duas variáveis, obtendo-se uma produtividade média de 45 m³/ha/ano, aos 57 meses de idade. Verificaram, também, que a aplicação de 240 kg/ha de K_2O , acarretou um aumento da ordem de 54% no volume e na matéria seca dos troncos das árvores da segunda rotação, em comparação com o tratamento sem adubação. Da primeira

para a segunda rotação, no entanto, verificaram um decréscimo médio de 52% na produtividade, atribuído à exportação de nutrientes, em especial de K, com consequência da redução da fertilidade do solo. Trabalho semelhante foi realizado por Higashi et al. (1999), em brotação de *Eucalyptus saligna*. Os autores encontraram uma correlação linear entre a quantidade acumulada de K e a produtividade; o sítio mais produtivo (35,8 m³/ha/ano) acumulou, aproximadamente, 138 kg de K/ha, aos sete anos.

Laclau et al. (2009), avaliando o plantio de *Eucalyptus grandis* até os 36 meses, em Itatinga-SP, com aplicação de 116 kg/ha, verificaram que a adubação potássica aumentou a produção primária líquida de 4,48 para 8,77 kg/m², ao longo do tempo de avaliação e o tempo médio de vida das folhas aumentou de 111 para 149 dias, que provocou o aumento da biomassa foliar.

É escassa a literatura especializada sobre os efeitos do Na e do K no crescimento de árvores de espécies do gênero *Eucalyptus*.

Sette Júnior (2007) avaliou os efeitos da fertilização de K e Na, na forma isolada; verificou que a forma isolada apresentou um incremento de madeira equivalente a 71 e 73%, no período do 22º ao 33º mês após o plantio.

Almeida (2009) verificou que a fertilização sódica aos 36 meses, após o plantio, resultou em árvores com aumento de 13% em diâmetro do tronco, 18% em altura e 52% (103 m³.ha⁻¹) em produtividade de madeira, em relação à testemunha.

Sette Júnior (2010), ao observar os efeitos da fertilização potássica em plantios de eucalipto, entre o 22º ao 70º mês, após o plantio, concluiu que o volume de madeira apresentou um incremento de 236 e 147%, em comparação com a testemunha e a fertilização sódica, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos em relação ao incremento em diâmetro, com ganhos de 89 e 22%, respectivamente.

Muianga (2013) analisou os efeitos da adubação potássica em clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, e concluiu que a resposta da adubação para as variáveis de crescimento (altura e DAP) inicia-se aos doze meses, após o plantio. O mesmo autor verificou, ainda, que, em relação às partes foliares, a adubação resultou em maiores áreas, estômatos maiores e menores densidades, além de maior crescimento, sugerindo maior eficiência no uso da água.

3.3 Possibilidade de substituição do potássio pelo sódio em plantações de *Eucalyptus*

A salinidade do solo, resultante de processos naturais e do mau uso da terra, ocorre em, aproximadamente 10% da superfície terrestre (SZABOLCS, 1994). Estima-se que, no Brasil, a área total de solos salinizados seja superior a quatro milhões de hectares, ocorrendo em regiões úmidas, semiáridas e costeiras (QUEIROZ, 2001; LACLAU et al., 2003).

Para a utilização de solos, com excesso de sais, visando à produção florestal, é preciso, preliminarmente, a seleção de genótipos que sejam tolerantes à salinidade ou sodicidade (MENDONÇA et al., 2010). Segundo Marschner (1995), essa característica de tolerância parece ser determinada pela capacidade da planta em impedir a translocação de Na para a parte aérea. Schachtman e Liu (1999) consideraram que os mecanismos de adaptação às condições salinas estão relacionados com a extrusão de Na^+ e de Cl^- .

Do ponto de vista químico, o Na se assemelha ao K, pois, ambos são elementos alcalinos. As funções que o Na pode desempenhar no metabolismo vegetal, no entanto, permanecem obscuras, uma vez que muitos processos metabólicos são afetados por estresses diversos (ALMEIDA, 2009).

Sob o ponto de vista funcional, admite-se que o Na possa substituir, parcialmente, o K no ajuste osmótico e, talvez, em algumas reações enzimáticas, a exemplo do que ocorre no metabolismo animal, onde o Na é considerado essencial na ativação de atpases (SUTCLIFFE; BAKER, 1989). Apesar de altas concentrações de sais nos solos reduzirem o rendimento das culturas agrícolas (MUNNS, 2005), verificou-se que o K e Na participam de funções fisiológicas similares (SUBBARAO et al., 2003; RODRIGUES-NAVARRO; RUBIO, 2006).

A substituição do K por Na, segundo Marschner (1995), é de interesse prático, econômico e científico. O K pode apresentar-se combinado com o Na e o uso desses minerais, em formas menos puras, representa uma economia de energia, que é normalmente requerida para o processo de purificação, permitindo uma redução sensível no preço dos fertilizantes potássicos. Esse é o caso das jazidas de K no Brasil, que se localizam, principalmente, no Estado de Sergipe, nas formas de kaliofilita e carnalita. O Brasil é o 10º produtor mundial de K, com 650 mil toneladas, em 2010. Este volume representa 2% da produção mundial, estimada em 25 milhões

de toneladas. Em 2011, o Brasil utilizou 8,5 milhões de toneladas de KCl, sendo 91% oriundos de importações, gerando custos na ordem de US\$ 3,4 bilhões anuais (IFA, 2011; ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA, 2012). Para amenizar esta dependência de fertilizantes importados, a substituição total ou parcial de K por Na diminuiria a dependência de fertilizantes importados.

O *Eucalyptus grandis* é considerado moderadamente tolerante ao estresse salino, tanto em ensaios conduzidos em casa de vegetação, quanto em condições de campo. Plantações do gênero *Eucalyptus* têm sido efetuadas em áreas salinas, principalmente na Austrália (MARCAR, 1993; MARCAR et al., 2002). Estudos comprovam a tolerância do *E. camaldulensis* à salinidade (MARCAR, 1993; SUN; DICKINSON, 1993, 1995b; RAWAT; BANERJEE, 1998; SU et al., 2005). O *E. tereticornis* também tem sido apontado como tolerante (MARCAR, 1993; SUN; DICKINSON, 1995a; TOMAR et al., 2003), e mostrou-se, inclusive, eficiente na melhoria das condições físicas e químicas de um solo, com elevado teor de Na, em plantios conduzidos na Índia (MISHRA et al., 2003).

Visando quantificar a concentração de Na nos componentes das árvores de *Eucalyptus* sp, Judd et al. (1996); Silveira et al. (1998) e Laclau et al. (2003) indicaram maiores concentrações nas folhas, embora, representem apenas 2% da biomassa de uma floresta madura, valor este considerado baixo. O tronco, que concentra 80% da biomassa, acumula grande quantidade de Na. Os mesmos autores verificaram que, em floresta nativa de *E. diversicolor* e *E. obliqua*, de 40 anos de idade, e em plantios de *E. grandis* e *E. saligna*, de 10 anos de idade, a produção de biomassa para as duas condições foi de 339,6 e 172,2 kg/ha, respectivamente; situação semelhante foi observada para o acúmulo de Na, com valores de 182,1 e 54,8 kg/ha, bem como o acúmulo de P, com valores de 42,8 e 49,8 kg/ha.

Sette Junior (2007, 2010) e Almeida (2009), realizando trabalhos com *E. grandis*, avaliaram a fertilização sódica em árvores de várias idades e identificaram a sua influência no aumento da densidade básica e aparente do lenho, incremento em diâmetro do tronco e biomassa. Os tratamentos submetidos apenas à fertilização potássica proporcionaram os melhores resultados para as variáveis citadas, porém, valores próximos aos obtidos pela fertilização sódica. Com isso, justificam-se os interesses, prático, econômico e científico para avaliar a possibilidade de substituição total ou parcial do K pelo Na.

3.4 Sazonalidade da atividade cambial e a formação do lenho das árvores

A formação do lenho das árvores, através das divisões periclinais e anticlinais do meristema secundário, ou câmbio, é fortemente influenciada pela sazonalidade climática e pelas características do solo. Essa influência é evidenciada em variações qualitativas e quantitativas na estrutura anatômica do lenho (MARCATI et al., 2001; METCALFE; CHALK, 1985).

Para a avaliação da sazonalidade da atividade cambial podem ser utilizados métodos dinâmicos e estáticos (FAHN et al., 1986). Os métodos dinâmicos utilizam dendrômetros permanentes. Os métodos estáticos, que utilizam avaliações anatômicas periódicas do caule, são destacados em alguns trabalhos, como os de Ajmal e Iqbal (1987); Cardoso, (1991); Worbes (1999); Tomazello Filho e Cardoso (1999); Marcati (2000); e Marcati et al. (2006), onde os autores determinaram os períodos de atividade e inatividade (dormência) do câmbio.

Callado et al. (2012), reportando os estudos de atividade cambial em árvores no Brasil, concluíram que, até a data em questão, apenas oito trabalhos tinham sido publicados, especificamente com árvores de espécies nativas: Silva et al. (1991) – *Swietenia macrophylla*; Dünisch et al. (2002) - *Cedrela odorata*; *Carapa guianensis*; *Swietenia macrophylla*; Dünisch et al. (2003) - *Cedrela odorata*; *Swietenia macrophylla*; Marcati e Angyalossy (2005) - *Citharexylum myrianthum*; Marcati et al. (2006) - *Cedrela fissilis*; Marcati et al. (2008) - *Schizolobium parahyba*; Callado (2010) - *Cariniana estrellensis* e Lima et al. (2010) - *Tynanthus cognatus*. Esses estudos foram desenvolvidos em diferentes fisionomias de dois biomas: Mata Atlântica e Amazônia.

Callado et al. (2012) citaram, ainda, que um dos principais desafios dos estudos de atividade cambial consiste no entendimento da complexidade nas inúmeras interações de fatores endógenos e externos, na formação dos tecidos vegetais, bem como na uniformização da metodologia aplicada a essas investigações, definindo, por exemplo, o processo de coleta e o delineamento experimental a ser adotado.

A partir da coleta de material, através de métodos não destrutivos é possível realizar a avaliação da sazonalidade da atividade cambial, através da análise anatômica de seções de tecido, retiradas na região do câmbio. Retiram-se as amostras contendo floema, câmbio e xilema, permitindo a observação das camadas

de células que estejam em formação na zona cambial (SHIGO; SHORTLE, 1985 apud WORBES, 1999).

Durante a fase ativa, o câmbio vascular possui dois tipos de divisão celular: o aditivo, que envolve a divisão periclinal ou derivado de células para produção do xilema secundário e floema, e o multiplicativo, que envolve a divisão anticlinal (radial) de células cambiais, permitindo a expansão da circunferência do câmbio vascular (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979).

A sazonalidade da atividade cambial é decorrente das alterações na precipitação, temperatura e fotoperíodo, com fatores endógenos inerentes a cada espécie, controlando o seu ritmo de crescimento (FAHN et al., 1986; WORBES, 1999; MARCATI et al., 2006). Chaffey (2002) afirmou que as respostas cambiais são difíceis de interpretar e generalizar, devido à complexidade e aos inúmeros fatores envolvidos no desenvolvimento da planta, incluindo o equilíbrio hormonal, fixação e alocação de carbono e, principalmente, a disponibilidade de água na planta.

Outro aspecto relevante ligado à atividade cambial está relacionado à importância da reativação do câmbio no controle da quantidade e qualidade da madeira (BEGUM et al., 2012). Essa relação, no entanto, ainda não está totalmente compreendida (LUPI et al., 2010), principalmente para as árvores de regiões tropicais.

O excesso ou escassez de água é um dos principais fatores que afeta a atividade cambial. O estresse hídrico ocasiona a interrupção do alongamento dos ramos jovens, levando a um decréscimo no suprimento de ácido indol acético (AIA), considerado um importante estimulador do câmbio. Segundo Iqbal (1990), muitas vezes, o estresse hídrico ocasiona a formação de "falsos anéis de crescimento"; na verdade, esses anéis refletem os períodos em que a disponibilidade de água estava mais escassa e não, necessariamente, ao período em que o câmbio esteve dormente, devido à interrupção de sua atividade. Segundo Kramer e Kozlowski (1960), Carlquist (1988) Coradin (2000) e Drew e Pammenter (2007), o estresse hídrico é o principal fator que interfere no declínio da atividade cambial. As células, que estão em divisão e em crescimento, necessitam de alto nível de turgescência, sendo este fator também necessário para a deposição da parede celular, mesmo em presença de hormônios (como as auxinas).

Worbes (1999) analisou a periodicidade de crescimento em espécies decíduas na Amazônia Central e verificou que a saturação de água no solo, causada

por intensa precipitação, provocou efeito adverso no crescimento das árvores, chegando, até mesmo, a cessar a atividade fisiológica. A temperatura atua diretamente sobre o início e a duração da atividade cambial; geralmente, o câmbio é ativado depois que atinge uma temperatura mínima, progredindo com o aumento da temperatura até alcançar um nível superior crítico; a partir daí, a atividade do câmbio começa a declinar (KRAMER; KOZLOWSKI, 1960; SANDERCOCK et al., 1995).

Went (1953) destacou a importância do "termoperiodismo" sobre o crescimento das plantas; no entanto, é difícil separar o efeito direto da alta temperatura daqueles efeitos decorrentes do estresse hídrico, que, muitas vezes, se encontram associados. O frio é igualmente danoso à atividade cambial, pois causa a formação de anéis de crescimento anormais, denominados de "*frost rings*" (anéis de gelo). Os anéis de crescimento consistem de células mortas (células-mães do xilema e derivadas cambiais em diferenciação) pelo frio, na parte mais interna, e de células anormais de xilema, produzidas depois do frio, na camada mais externa. Os "anéis de gelo", geralmente, ocorrem em plantas com casca fina, sem uma maior proteção contra o frio (KRAMER; KOZLOWSKI, 1960; IQBAL, 1990).

A atividade cambial é muito dependente da luminosidade, uma vez que os processos mitóticos e de crescimento das células cambiais são processos ativos, com grande consumo de carboidratos oriundos da fotossíntese. Esses carboidratos são usados na produção de células novas iniciais e acréscimo de xilema e floema. (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979).

A formação da madeira (xilema secundário) consome cerca de 40% da produtividade fotossintética e, segundo Kramer e Kozlowski (1979), depende de luz para o crescimento cambial e o aparelho fotossintético da planta, como um todo. Na verdade, os efeitos indiretos da luz sobre o câmbio não se restringem apenas à produção dos carboidratos, mas, também, numa complexa rede de interações de hormônios, que são produzidos nas gemas, ápices meristemáticos nas folhas. Vale ressaltar que vários fatores endógenos (hormônios, carboidratos, posição do câmbio etc.) e exógenos (água, luz, temperatura, vento, posição da planta etc.) agem sobre a atividade cambial e, na maioria das vezes, sinergicamente.

Para Drew et al. (2009), a taxa de crescimento e atividade cambial são fortemente regulados pela temperatura e disponibilidade hídrica do ambiente. Da mesma forma, Wimmer et al. (2002) e Drew et al. (2008) encontraram boas correlações entre a taxa de incremento do tronco, precipitação e temperatura. Nesse

aspecto, a atividade cambial é dependente do seu estágio fenológico (copa formada e folhas maduras, com limbo expandido), pela disponibilidade de água no solo, níveis de precipitação, temperatura e horas de luz/dia, induzindo a um aumento da taxa de fotossíntese. Assim, a atividade cambial é regulada pela ação dos hormônios e carboidratos que, ao deslocar-se no sentido do fluxo floemático descendente, induzem maiores taxas de divisões das células cambiais.

Sette Junior et al. (2010) avaliaram o incremento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis*, por um período de 24 meses, bem como a sua relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral; concluíram que o efeito da sazonalidade climática no incremento em diâmetro do tronco das árvores ocorre em períodos de máximo e de mínimo crescimento, com uma defasagem (“lag”) de 28 dias, em função da resposta da atividade cambial às variações climáticas. Da mesma forma, Wimmer et al. (2002) e Drew et al. (2008) encontraram boas correlações entre a taxa de incremento em diâmetro do tronco de eucalipto e a temperatura.

O crescimento sazonal de árvores de *Eucalyptus sp.*, submetidas ao estresse hídrico, apresenta limitação da atividade cambial; observa-se, também, uma interação entre as variáveis climáticas e o crescimento cambial, atuando de forma complexa e durante todo o ano (GREEN, 1969; DOWNES et al., 1999).

Os trabalhos que relacionam as fases fenológicas e a atividade cambial em espécies tropicais e subtropicais apresentam nítida relação entre a queda de folhas, fatores climáticos e atividade cambial (ROIG, 2000; CORADIN, 2000; BOTOSSO et al., 2001). A maioria dos trabalhos refere-se à influência da fenologia e das variáveis climáticas sobre a atividade cambial das árvores; no entanto, desconsidera aspectos importantes, como a nutrição mineral, principalmente a aplicação de K, importante para inúmeros processos fisiológicos das árvores, como a regulação do potencial osmótico.

3.5 Relação do diâmetro do tronco com as variáveis climáticas

As faixas dendrométricas são utilizadas para a avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e temperadas (MARIAUX, 1969; DÉTIENNE et al., 1988; DÉTIENNE, 1989; WORBES, 1999; BREITSPRECHER;

BETHEL, 1990; BOTOSSO; TOMAZELLO FILHO, 2001; SHEIL, 2003; BOTOSSO et al., 2005; SETTE JUNIOR, 2007; SETTE JUNIOR, 2010; LOBÃO, 2011).

Marcati (2000), ao utilizar as faixas dendrométricas, verificou que nem sempre tais faixas ofereciam precisão suficiente nas medições, pois, o material utilizado (em geral, fitas de aço) pode sofrer dilatação térmica, oriunda das variações climáticas, contraindo, no inverno (frio), e, dilatando, no verão (calor), causando variações dimensionais. Segundo Drew (2009), o uso de dendrômetros é uma metodologia de análise de incremento do tronco, de alta precisão temporal e espacial. O autor cita trabalhos de Dobbs (1969), Lapoint e Van Cleve (1971) e Pook e Hall (1976), onde estes autores obtiveram uma precisão de 0,038; 0,02 e 0,005 milímetros, respectivamente.

São escassas as informações sobre o uso de faixas dendrométricas em plantações de eucalipto, com objetivo de mensurar o incremento do tronco. Destacam-se alguns trabalhos, como o desenvolvido por Valenziano e Scaramuzzi (1967), em árvores de *E. camaldulensis* e *E. viminalis*, aos nove anos de idade, na Itália; Green (1969), em árvores de *E. pauciflora*, aos seis meses, em diferentes altitudes em Canberra, Austrália; Marien e Thibout (1980), em árvores de eucalipto entre 5 a 7 anos, na França; Pereira et al. (1989), em árvores jovens (1 ano), de *E. globulus*, em Portugal; Downes et al. (1999), em árvores de *E. globulus* e *E. nitens*, irrigadas; Wimmer, Downes e Evans (2002), em árvores de *E. nitens*, estabelecidas na Tasmânia, aos 17 anos; Laclau et al. (2005), em árvores de eucalipto, em plantações clonais do 6º ao 9º ano, estabelecidas em solos de savana no litoral do Congo; Sette Júnior (2007) e Sette Júnior et al. (2008, 2009), em árvores de *E. grandis*, aos 24 meses, submetidas a diferentes tratamentos, com fertilizantes minerais (K, Na, K +Na); Sette Júnior (2010), em árvores de *E. grandis*, aos 48 meses, submetidas a tratamentos com fertilização potássica e sódica.

Ao avaliar o uso das faixas dendrométricas no crescimento do tronco, verificou-se que as árvores sujeitas ao déficit hídrico severo mostraram os menores valores de incrementos, chegando a ser nulo, em alguns casos; os maiores incrementos, por sua vez, ocorreram no verão, no final da estação chuvosa, demonstrando a dependência de água, como fator limitante de crescimento.

A partir das conclusões dos trabalhos realizados, pode-se construir um padrão de crescimento em diâmetro do tronco com dois períodos distintos: i) baixo ou nulo, no outono/inverno, devido à limitação da precipitação e da temperatura, que

provocam a interrupção ou parada da atividade cambial; ii) alto, na primavera/verão, devido à retomada da atividade cambial, aliada à precipitação e à temperatura favoráveis (Figura 2).

Figura 2 - Precipitação e temperatura média (A) e o incremento corrente do DAP (B) de árvores de *E. grandis* controle, com K e Na de fevereiro/2006-fevereiro/2010 (SETTE JR., 2010 adaptado)

Os autores verificaram, também, que a temperatura teve grande efeito no incremento do tronco, observando a existência de um ponto crítico mínimo de temperatura para promover o crescimento. Os resultados indicaram que existe um forte efeito da sazonalidade climática, existindo, assim, a necessidade do melhor entendimento da interação entre as variáveis clima x fertilização mineral e o crescimento cambial da árvore, com o objetivo de compreender o seu efeito na atividade cambial e, desta forma, no crescimento do tronco.

3.6 Densidade básica e aparente da madeira de eucalipto

A densidade é considerada como uma das mais importantes características do lenho, relacionando-se com as demais propriedades tecnológicas. Comumente, é utilizada como índice para avaliar a qualidade da madeira para diferentes usos. A variação da densidade do lenho das árvores está relacionada com os parâmetros anatômicos (espessura da parede celular, frequência das fibras, vasos e parênquima radial e longitudinal), químicos, condições edafoclimáticas e manejo silvicultural. Outras variáveis indicadas na literatura referem-se à taxa de crescimento das árvores, espaçamento, idade, procedência e variação longitudinal-radial do tronco (TOMAZELLO FILHO, 1985; SOUZA et al., 1986; VALE et al., 1995; VIGNERON et al., 1995; BOUVET et al., 1999 apud VIANA, 2008). Apesar de sua grande relevância, a densidade apresenta grande variação entre espécies, dentro da mesma espécie e em posições distintas na mesma árvore, no sentido longitudinal ou transversal (BRASIL et al., 1977; LIMA et al., 1992; TOMAZELLO FILHO, 1987).

A densidade básica pode ser definida como a razão entre a massa absolutamente seca da madeira e o seu volume verde ou saturado. É uma variável de fácil determinação e utilizado como índice para avaliar a qualidade da madeira, pois se correlaciona diretamente com o rendimento em peso e propriedades físicas e mecânicas (SOUZA et al., 1986; BRASIL; FERREIRA, 1971).

Existem vários padrões de variação da densidade básica no sentido longitudinal da árvore (ALZATE et al., 2005; BRASIL et al., 1977; LIMA et al., 1992; PÁDUA, 2009; TRUGILHO et al., 2008), não ocorrendo um padrão específico para cada espécie. Panshin e De Zeew (1970), no entanto, apresentam uma síntese dos padrões de variação longitudinal: Modelo 1 - decréscimo uniforme com a altura; Modelo 2 - decréscimo até certo ponto e crescimento deste, até o topo da árvore. Algumas vezes, pode decrescer levemente nas partes superiores; Modelo 3 - crescimento da base para o topo, não obedecendo a um padrão uniforme de variação. Segundo Lima et al. (1992), para o *Eucalyptus* o primeiro padrão descrito anteriormente tem se mostrado mais comum; entretanto, Barrichello e Brito (1983) e Pádua (2009) indicaram o modelo 2 como o mais comum em *Eucalyptus grandis* x *urophylla*.

Lima et al. (1992) avaliaram a variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, com 3,5 anos de idade, ao longo do sentido longitudinal; a

densidade decresceu da base até 25% da altura da árvore e, a partir daí, cresceu até a altura máxima do tronco, com um valor médio de 0,44 g/cm³. Alzate et al. (2005), estudando a variação longitudinal da densidade básica do tronco de *E. grandis*, com oito anos de idade, verificaram um decréscimo da base até o DAP e, a partir daí, um aumento até o topo, apresentando um valor médio de 0,46 g/cm³.

Lopes (2003) encontrou valores de densidade básica média da madeira de 0,46 g/cm³, para árvores de *Eucalyptus grandis*, verificando uma variação longitudinal com decréscimo da base até o DAP e aumento na posição de 25% até 100% da altura comercial.

Moutinho (2012), avaliando a densidade básica de dez clones de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp., com idade entre 5 e 6 anos, proveniente da região do Alto Jequitinhonha (MG), encontrou variações de 0,443 a 0,610 g/cm³. Um dos clones, *Eucalyptus grandis*, apresentou a variação longitudinal com decréscimo da região da base até o DAP, seguindo-se de um aumento até 75% e, a partir daí, um decréscimo até o topo. Resultados similares foram encontrados por Arizapana-Almocinad (2013), em árvores de *E. urophylla*, com oito anos de idade.

Panshin e De Zeew (1970) apresentam um modelo geral de aumento da densidade na posição radial, sentido medula-casca, notadamente para madeiras adultas.

Brasil et al. (1979), estudando a densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis*, aos três anos de idade, concluíram que o modelo de variação foi crescente da medula para a casca, com valores de 0,42 (próximo à medula), 0,42 (região intermediária) e 0,46 g/cm³ (próximo à casca). Resultados similares foram encontrados por Tomazello Filho (1985b), para o *E. grandis* e *E. saligna*, bem como Silva (2002).

Oliveira et al. (2010) avaliaram um híbrido de *Eucalyptus grandis*, com cinco anos de idade, submetidos a dois regimes de precipitação, em duas regiões distintas do Estado do Espírito Santo: Aracruz e Alto Rio Novo, com precipitações de 1336,61 e 830,2 mm, respectivamente. O lenho das árvores oriundas das regiões de Aracruz e Alto Rio Novo apresentou valores de densidade básica de 0,480 e 0,513 g/cm³, respectivamente, notando-se uma superioridade no local de menor precipitação.

A densidade aparente da madeira é expressa pela razão da massa e volume, na condição de 12% de umidade, de acordo com a norma ABNT 7190 (1997). Para a determinação da densidade aparente, utilizam-se, em geral, os métodos

destrutivos; tal situação não possibilita avaliações em pequenos corpos de prova, como mensurações micrométricas entre os anéis de crescimento. Neste aspecto, o método radiográfico de atenuação de raios X, para a determinação da densidade aparente do lenho, destaca como vantagens: metodologia não destrutiva, otimização do tempo de análise, maior precisão e eficiência no processamento dos dados (ARIZAPANA-ALMOCINAD, 2013). A metodologia em questão permite, ainda, avaliar o efeito da deterioração provocada no lenho das árvores de eucalipto por fungos de podridão branca, além de detectar o limite do cerne-alburno, determinar o efeito do manejo florestal nas propriedades do lenho, bem como determinar a produção anual da biomassa de lenho e a relação com a sua estrutura anatômica (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

No Brasil, a aplicação da técnica de atenuação dos raios X, para a determinação da densidade aparente da madeira, foi implantada por Amaral (1994), sendo considerada importante ferramenta na avaliação do efeito dos tratamentos silviculturais na qualidade do lenho, bem como na caracterização tecnológica da madeira.

Alzate (2004) caracterizou a variação radial da densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* de oito anos, pela densitometria de raios X, obtendo uma densidade aparente média de 0,46 g/cm³ e um perfil densitométrico caracterizado pelo incremento da densidade no sentido radial.

Silva et al. (2004) obtiveram valores crescentes de densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, em relação à idade e variação radial, com valores de 0,46 e de 0,63 g/cm³, nas idades de 10 e 20 anos, respectivamente, utilizando a densitometria de raios X.

A variação radial da densidade aparente do lenho de árvores do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, com sete anos, foi analisada por Tomazello Filho (2006) pela técnica de densitometria de raios X, obtendo um perfil radial de densidade aparente do lenho característico para o gênero e valor médio de 0,65 g/cm³.

Benjamin (2006) aplicou a mesma técnica radiográfica na análise da variação da densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, com 28 anos de idade, confirmando o modelo radial e variação e 0,70 g/cm³ de densidade aparente média.

Os perfis de densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, de dois a quatro anos de idade, por microdensitometria de raios X, evidenciaram um modelo de variação radial caracterizado por valores que variaram de 0,50-0,65 g/cm³, na região da medula, de 0,40-0,50, na posição de 50% do raio e de 0,65-0,80 g/cm³, próximo à região da casca (SETTE JUNIOR et al., 2009; SETTE JUNIOR, 2010).

Henriques (2012) obteve valores de herdabilidade média das progênes de *Eucalyptus* sp. da região de Itamarandiba (MG) superiores a 80% para densidade aparente do lenho, a partir da metodologia de densitometria de raios X. Tal metodologia permitiu a seleção precoce aos dois anos de idade para a densidade aparente, na expectativa de se encontrar valores desejados de volume e densidade aos sete anos.

Arizapana-Almocinad (2013) utilizou a técnica radiográfica para avaliação do lenho à altura do DAP de *Eucalyptus* sp. e encontrou perfis de densidade com modelo similar da variação no sentido medula-casca. Além disso, verificou que a região interna de madeira juvenil apresentava um menor valor de densidade; a região externa de madeira adulta, por sua vez, apresentava um maior valor de densidade. O mesmo autor observou uma sequência de regiões do lenho que alternava valores de menor/menor densidade, correspondentes aos limites dos anéis de crescimento anuais.

Knapic et al. (2014) avaliaram a densidade média do anel de crescimento e do lenho inicial e tardio, bem como a porcentagem de lenho tardio e o índice de heterogeneidade de 19 espécies de *Eucalyptus* sp., utilizando a técnica de microdensitometria de raios X como perspectiva do potencial de produção de biomassa. Segundo os autores, a metodologia radiográfica possibilitou identificar as espécies com maior e menor densidade aparente, além de elencar as espécies com boa aptidão de produção de biomassa.

O método de análises de imagens radiográficas digitais utiliza os mesmos princípios da técnica de densitometria de raios X, fornecendo informações sobre as estruturas internas e a composição química das amostras, e se apresenta correlacionada com a densidade e o teor de umidade do material. O método que utiliza o equipamento de raios X digital é empregado para verificar as variações de densidade dentro e entre os anéis de crescimento, podendo ser associado ao histórico das condições climáticas, estoque e sequestro de carbono, influência de

fertilização e práticas silviculturais, bem como na qualidade da madeira para diversos fins (HUGHES, 1975; MANNES et al., 2007; KEUNECKE et al., 2012; CHERUBINI et al., 2013).

3.7 Anatomia do lenho sob estresse hídrico e fertilização mineral

A estrutura do lenho das árvores é caracterizada pelo arranjo e pela quantidade proporcional de diferentes tipos de células, como fibras, traqueídeos, vasos, parênquima axial e raios, influenciando, significativamente, as diversas propriedades da madeira (MARCATI, 1992; SILVA, 2002). Entre as variáveis anatômicas influenciadas pelo clima, solo, adoção de diferentes práticas silviculturais e alteração na idade de corte estão o comprimento das fibras e dos vasos, espessura da parede das fibras, diâmetro tangencial dos vasos, frequência de vasos por milímetro quadrado, presença de cristais prismáticos e sílica (MOREY, 1981; BAAS; SCHWEINGRUBER, 1987; CARLQUIST, 1988; ZOBEL; BUJTENEN, 1989 apud TREVIZOR, 2011).

Diversos autores, como Baas (1973); Carlquist (1975); Wimmer et al. (2002); Appezzato-da-Glória (2006); Drew et al. (2008, 2009), afirmam que os impactos ambientais influenciam a estrutura anatômica do lenho, alterando o desempenho fisiológico das árvores. Tais impactos, como seca, inundação, altitude, latitude, constituição do solo, estádios sucessionais da vegetação e poluição, possibilitam alterações nas características genéticas, promovendo adaptações das plantas às mudanças ambientais. Os elementos de vaso, por exemplo, estão associados à eficácia e garantia do transporte de água pela planta, sendo diretamente afetados pelas variações ambientais.

Estudos de anatomia do lenho, em plantas de ambientes mesofíticos e xerofíticos, demonstram que os elementos de vaso são maiores e ocorrem em menor número, quando se comparam plantas em que o suprimento hídrico é adequado. Nas plantas submetidas ao déficit hídrico, os elementos de vaso são menores, mais agrupados e numerosos (BAAS et al., 1985; ALVES et al., 2000). As fibras com paredes delgadas são mais frequentes em ambientes úmidos; por sua vez, as plantas que crescem em ambientes secos apresentam paredes mais espessas (FAHN et al., 1986; LUCHI et al., 2005).

Em experimento de Schuldt et al. (2011), com exclusão de chuvas em árvores de floresta úmida em Sulawesi (Indonésia), verificou-se uma redução de 30% na condutividade hidráulica no alburno, causada pela formação de vasos de menores diâmetros e/ou preenchidos por tilos. O diâmetro/frequência dos vasos influenciou a condutividade hidráulica, onde o aumento dessas características anatômicas proporcionou um aumento de produtividade. Em ambientes suscetíveis à seca, as células condutoras de elementos de vaso do lenho das plantas apresentam menor diâmetro, acarretando maior resistência à cavitação (ZHU; CAO, 2009; AWAD et al., 2010; BLACKMAN et al., 2010; CAI; TYREE, 2010; HACKE et al., 2010 apud SCHULDT et al., 2011). Avaliando o lenho de *Abies balsamea*, com seis anos de idade, sob condições de 65 a 80% de redução de chuva, durante dois anos consecutivos, D'Orangeville et al. (2013) concluíram que o estresse hídrico ocasionou impactos significativos na xilogênese, como traqueídeos, com menor comprimento e quantidade (26% menos) e parede celular mais espessa.

O efeito da disponibilidade hídrica nas dimensões das fibras do lenho de árvores de eucalipto tem sido reportado na literatura, sem consenso dos resultados. Estudos conduzidos por Beadle et al. (1997, 2001); Tomazello Filho (2006), analisando o lenho de árvores de *E. regnans*, *E. globulus*, *E. nitens*, *E. occidentalis*, *E. camaldulensis* e *E. grandis* demonstraram que a fertilização induz ao aumento do comprimento da fibra; Omran (1986); Pereira et al. (1992), analisando amostras de *E. globulus*, *E. camaldulensis*, *E. maculata* e *E. camaldulensis* não verificaram diferenças significativas para as dimensões de fibras.

A nutrição mineral é um dos fatores que afetam o crescimento da planta e as suas relações hídricas. Os resultados sobre o efeito da disponibilidade de nutrientes na formação do xilema e nas propriedades hidráulicas, no entanto, são contraditórios. A adubação nitrogenada, por exemplo, pode influenciar, de forma positiva ou negativa, nas dimensões dos vasos do xilema, vulnerabilidade à cavitação, condutividade hidráulica, eficiência do uso da água de diferentes espécies vegetais e condições de crescimento (HARVEY; DRIESSCHE, 1999; CLARKSON et al. 2000; EWERS et al., 2000; CLEARWATER; MEINZER, 2001; TRUBAT et al., 2006; GORSKA, et al., 2008; ATWELL et al., 2009; CRAMER et al. 2009; HACKE et al., 2010 apud ODDO et al., 2011). A alta condutância proporciona vasos de maior diâmetro tangencial no lenho das árvores, sendo esta característica necessária para manter as suas altas taxas de crescimento (TYREE, 2003).

A aplicação dos fertilizantes e o seu efeito nas dimensões das fibras do lenho de árvores de eucaliptos tem sido reportada na literatura sem, no entanto, haver um consenso dos resultados.

Fromm (2010), avaliando árvores de *Populus trichocarpa*, cultivadas em baixas concentrações de K ou Ca, concluiu que a sazonalidade do câmbio acarretou numa redução da taxa de incremento de lenho e das dimensões dos vasos.

Estudos realizados com *E. grandis*, aos 24 e 48 meses de idade, submetidos a tratamentos de fertilização sódica e potássica indicaram diferenças significativas nas dimensões e frequência de vasos (SETTE JUNIOR et al., 2009; SETTE JUNIOR, 2010).

Bamber et al. (1982) e Pereira et al. (1990) não verificaram diferenças nas dimensões das fibras do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, com 2,5 anos de idade, submetidas a altas taxas de crescimento, devido às condições de preparação do solo, fertilização, controle de insetos e ervas daninhas. No lenho destas árvores, também foram encontrados vasos de maior diâmetro e frequência.

Andrade et al. (1994), utilizando adubação fosfatada e/ou sulfatada e calagem, em árvores de *Eucalyptus grandis*, de seis anos, verificaram que (i) a aplicação de fosfato e gesso promoveu a formação de fibras de menor diâmetro e espessura da parede celular; (ii) a calagem promoveu a formação de maior diâmetro do lume e espessura de parede das fibras, bem como maior diâmetro dos vasos.

A fertilização não mostrou influência no comprimento das fibras do lenho de árvores de *Eucalyptus urophylla*, de nove anos de idade (JIANJU et al., 1995); verificou-se, no entanto, uma correlação positiva entre a largura das fibras e a fertilização aplicada nas árvores de eucalipto. Tomazello Filho (2006) não observou diferenças significativas das dimensões dos vasos no lenho de árvores de *Eucalyptus grandis x urophylla*, submetidas a tratamentos de fertilização e irrigação.

Estudos feitos por Sette Júnior (2007), relacionando as características anatômicas do lenho x efeito da aplicação de fertilizantes minerais (K, Na, K + Na) em árvores de *Eucalyptus grandis*, com 24 meses de idade, resultaram num modelo de variação radial das dimensões das fibras, caracterizado pelo aumento da sua largura, diâmetro do lume e comprimento, bem como a inexistência de um modelo de variação para a espessura da parede celular. Para os vasos, o modelo de variação foi caracterizado por um aumento do seu diâmetro tangencial e área

ocupada por vasos, bem como uma redução da sua frequência, com diferenças significativas para as variáveis e posições radiais entre tratamentos.

Comentando os resultados encontrados por Sette Júnior (2007), Almeida (2009) reitera que a inexistência de um modelo de variação para as características anatômicas devem-se às diferenças no padrão de transpiração relacionados ao sistema radicular (superfície absorvedora), área foliar (superfície evaporativa) e maior controle estomático, destacando que os íons K^+ e Na^+ para algumas espécies vegetais são imprescindíveis, baseando-se nos resultados obtidos por Marschner (1995); Taiz e Zeiger (2004); Epstein e Bloom (2006) apud Almeida (2009). A aplicação de K, segundo Sette Júnior (2010), influenciou nas características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto, de quatro anos de idade, resultando em fibras de parede mais espessa, menor diâmetro do lume, além de vasos de maior diâmetro e menor frequência.

3.8 composição química do lenho de eucalipto

A determinação da qualidade da madeira de eucalipto, especialmente para os usos para a produção de polpa celulósica e papel e de carvão vegetal, as características químicas como os teores de holocelulose, lignina e extrativos são considerados importantes parâmetros de qualidade, pois, influenciam nos processos de produção dos produtos finais (WALLIS et al., 1996).

Aliando a nutrição mineral nas características químicas no lenho juvenil de progênies *E. grandis*, Silveira e Malavolta (2003) determinaram os efeitos da aplicação do potássio. Os autores concluíram que os materiais genéticos apresentaram respostas distintas para a concentração e quantidade de holocelulose no lenho em função da dose de K na solução nutritiva: a adição de potássio aumentou a concentração de holocelulose nas progênies 1 e 2. Barreiros et al. (2007) avaliaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto tratado (0 a 40 t ha⁻¹ base seca) e uma dose de adubo mineral nos atributos químicos da madeira de *E. grandis* de árvores com cinco anos de idade: o lodo de esgoto não afetou os teores de celulose, lignina e extrativos da madeira. Assis (2013) estudou níveis de fertilização e seus efeitos nas características da madeira de híbridos de *E. grandis* x *urophylla*: o efeito da fertilização não afetou nenhuma das características químicas analisadas.

Segundo Vital (1990) a adubação pode ocasionar ligeiro aumento nos teores de lignina e extrativos e pequena redução no teor de celulose da madeira. Andrade et al. (1994) observaram aumento da concentração de extrativos em madeira de *E. grandis*, devido à aplicação de calcário. Por mais que os extrativos presentes na madeira são geralmente extraídos durante o processamento químico de polpação, altos teores podem ter efeitos significativos nas propriedades das polpas celulósicas, conduzindo, por exemplo, a baixos rendimentos e dificuldade no branqueamento e ainda, podem causar danos em equipamentos nas fábricas de celulose, por serem substância potencialmente formadoras de pitch (GOMIDE et al., 2005). Da mesma forma, madeiras com altos teores de lignina podem exigir um maior consumo de álcali durante a polpação, gerando maiores teores de sólidos para queima na caldeira, tendo um papel econômico importante no processo de produção de polpa celulósica.

A composição química do lenho de *E. saligna* avaliada por Trugilho et al. (1996), nas mesmas idades do presente estudo (1° ao 4° ano após plantio) variou significativamente, sendo observado queda dos teores de lignina e de extrativos e aumento dos teores de celulose com o aumento da idade da árvore. Da mesma forma, Moraes (2008) avaliou o efeito de diferentes idades (1° ao 8° ano após plantio) nas características químicas da madeira de clones de *E. grandis* e *E. grandis x urophylla* e obteve os mesmos resultados.

Considerando que as características químicas da madeira estão sujeitas a grande variações iniciais na madeira juvenil, tendendo a valores mais estáveis, na madeira adulta (TRUGILHO et al., 1996), recomenda-se a avaliação do lenho das árvores de *E. grandis* em idades mais avançadas para determinar a variação das suas características e caracterizar a fase de sua estabilização (formação do lenho adulto), importante para a sua adequada utilização tecnológica.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local

O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, (Figura 3) por meio do convênio do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento (CIRAD)/França. O experimento faz parte de um amplo grupo de pesquisas que compõe o Projeto Universal CNPq nº 471808/2012-1 “Mudanças climáticas globais: indução do estresse hídrico por exclusão de chuva e efeito no crescimento e formação e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* com fertilização potássica e sódica”. Além desse projeto, o mesmo experimento contempla outras pesquisas sobre fisiologia (FAPESP nº 10/50663-8), expressão genômica, ecologia, crescimento e qualidade do lenho que serão subsídios para uma rede de informações que serão integradas até o fim do ciclo (aproximadamente 7 anos de idade).

Figura 3 - Local de estudo no Horto Experimental de Itatinga, Itatinga-SP, do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP

O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo Köppen, com precipitação média anual de 1.635 mm e temperatura média de 16,2°C e 28,6°C, nos meses mais frio e mais quente, respectivamente. O solo é do tipo latossolo vermelho amarelo distrófico, de textura média, com a litologia composta por arenito, formação Marília, do grupo Bauru. Os resultados da análise do solo na fase de implantação do experimento foram avaliados por Maquère (2009), em qual caracterizou de forma detalhada os atributos químicos do solo até seis metros de profundidade, conforme pode ser observado na Tabela 1. Os resultados mostraram

que o teor médio de K e Na trocável no solo é de 0,02 cmol_c kg⁻¹ até cinco centímetros de profundidade e, inferior a 0,01 cmol_c kg⁻¹ entre 0,05 e 6 metros de profundidade, demonstrando deficiências severas dos nutrientes em todo o perfil do solo.

Tabela 1 – Atributos químicos do solo da área experimental

Profundidade	pH	K	Ca	Mg	Na	H+Al	SB	CTC	V	
metros	água	KCl	mmol.kg ⁻¹						efetiva	%
0 - 0,05	4,6	4,0	0,1246	0,2180	0,3115	0,0000	23,54	1,40	24,94	5
0,05 - 0,15	5,3	4,4	0,0467	0,0081	0,1003	0,0000	11,66	0,30	11,95	2
0,15 - 0,50	5,5	4,7	0,0286	0,0052	0,0316	0,0000	8,80	0,09	8,89	1
0,50 - 1,0	5,5	4,6	0,0161	0,0000	0,0124	0,0000	6,49	0,04	6,53	1
1,0 - 2,0	5,7	5,2	0,0305	0,0153	0,0153	0,0034	3,94	0,12	4,06	3
2,0 - 3,0	6,0	5,3	0,0133	0,0007	0,0103	0,0159	0,80	0,08	0,87	18
3,0 - 4,0	5,7	5,3	0,0393	0,0363	0,0375	0,0042	0,28	0,16	0,44	36
4,0 - 5,0	5,9	5,5	0,0298	0,0261	0,0539	0,0000	0,04	0,16	0,2	79
5,0 - 6,0	5,8	5,6	0,0287	0,0095	0,0164	0,0072	0,13	0,11	0,24	56

Fonte: Maquère (2008)

4.2 Área de estudo e delineamento experimental

A área de estudo foi utilizada anteriormente com plantios de *E. saligna*, no período de 1945 a 1998; posteriormente, a mesma área foi utilizada com plantações de *E. grandis*, no período de 1998 a abril de 2010. O plantio na área experimental ocorreu em maio de 2010. As mudas de *E. grandis* eram provenientes de um clone da empresa Suzano Bahia Sul, seguindo o alinhamento do cultivo anterior, no espaçamento 3 x 2 m, em covas abertas no intervalo entre as touças da rotação anterior.

A fertilização básica foi realizada no plantio para todos os tratamentos, sendo distribuída a lanço e sem incorporação no solo, à base de 2000 kg de calcário dolomítico/ha; posteriormente, aplicaram-se na cova os seguintes fertilizantes: 75 kg de P₂O₅, 80 kg de N (NH₄(SO₄)₂) e 20 kg de FTE (BR-12) por hectare.

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos subdivididos, tipo “*split-plot*”, com 3 blocos e 6 tratamentos, totalizando 18 subparcelas. Os tratamentos compreenderam: (i) 2 regimes hídricos: 100% e 66% das chuvas (exclusão artificial pela utilização de cobertura do solo de 1700 m² de lonas de polietileno transparente) e (ii) 3 doses de fertilizantes: 0 (controle); 4,5 kmol/ha e 4,5 kmol/ha na forma de KCl e NaCl, respectivamente, aplicados três meses, após o plantio. Para cada bloco,

foram sorteados, inicialmente, os dois tratamentos de regime hídrico (100 e 66% de chuvas) e, na sequência, os três tratamentos de nutrição (controle, K e Na) (Figura 4), assim identificados:

C/+A: controle + 100% de chuva;

Na/+A: sódio + 100% de chuva;

K/+A: potássio + 100% de chuva;

C/-A: controle + 66% de chuva;

Na/-A: sódio + 66% de chuva;

K/-A: potássio + 66% de chuva.

	108 metros						
BLOCO 1	C/+A	K/+A	Na/+A	K/-A	Na/-A	C/-A	96 metros
BLOCO 2	K/-A	Na/-A	C/-A	K/+A	C/+A	Na/+A	
BLOCO 3	K/-A	C/-A	Na/-A	K/+A	C/+A	Na/+A	

Figura 4 - Delineamento experimental ("split-plot"), ilustrando os 3 blocos, 18 subparcelas e 6 tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica)

As subparcelas apresentavam 12 linhas com 12 plantas/linha, avaliando-se, apenas, as 36 árvores centrais (6 x 6 árvores), que foram utilizadas na mensuração dos inventários contínuos. Para a amostragem destrutiva, instalou-se uma parcela de área maior (15 linhas de 15 plantas) em cada um dos seis tratamentos; para tanto, excluíram-se as árvores da bordadura, sem afetar o crescimento das 36 árvores centrais (Figura 5).

Figura 5 – Esquema de delineamento nas subparcelas com redução de chuva

O regime hídrico foi conduzido através de redução/exclusão artificial de 34% da chuva, por meio de calhas, confeccionadas com fios de arame que sustentavam as lonas de plástico. As calhas apresentavam uma largura de 40 cm e cobriam 34% da superfície total do solo (Figura 6) e foram apoiadas em estacas de madeira (altura de 1,5 a 0,30 m), em declive para a retirada da água das chuvas, a fim de reduzir o efeito da umidade do solo. A cada quinzena, eram retiradas as folhas e ramos retidos nas lonas plásticas, para fins de limpeza.

Figura 6 – Aspecto do experimento e do delineamento das árvores de *Eucalyptus grandis* e detalhe das calhas com as lonas de polietileno, apoiadas em estacas de madeira

4.3 Sazonalidade do crescimento e incremento do tronco das árvores

Na avaliação da sazonalidade do crescimento em altura e diâmetro do tronco e da atividade cambial das árvores de eucalipto foram aplicados os métodos dinâmico (com faixas dendrométricas) e estático (com a extração de amostras do lenho).

4.3.1 Crescimento em altura e incremento em diâmetro do tronco das árvores

A avaliação do crescimento em altura do tronco das árvores de eucalipto foi realizada a partir dos seis meses de idade, mensurando-se a altura total por meio de régua graduada de todas as plantas da área útil das subparcelas.

Na avaliação do incremento em diâmetro do tronco foram instalados dendrômetros de aço no DAP do tronco de três árvores/subparcela, sendo nove árvores com dendrômetros/tratamento, constituindo-se em um total de 54 árvores, avaliadas em um delineamento de blocos casualizados. As árvores selecionadas para a instalação dos dendrômetros localizavam-se na primeira linha da parcela útil, sendo intercaladas entre si, representando o tratamento aplicado nas 36 árvores centrais.

As faixas dendrométricas de aço foram confeccionadas segundo metodologia descrita por Botosso e Tomazello Filho (2001), utilizando-se fitas de aço inoxidável (12,7x0,15 mm, largura e espessura), com escala em mm e nônio, com precisão de 0,2 mm, mantidas sob tração por uma mola de aço inoxidável (100 x 8 mm, comprimento e diâmetro) (Figura 7A e D) no tronco das árvores. Para a obtenção do comprimento total das faixas dendrométricas determinou-se, previamente, a circunferência no DAP do tronco das árvores, incluindo-se + 17 cm (referentes à sobreposição da escala e do nônio). As graduações da escala de nônio foram demarcadas na fita de aço, através de gabarito (Figura 7B e C), com duas placas metálicas: (i) a primeira, na borda inferior, com escala de leitura de graduação de 80 mm e (ii) a segunda, na borda superior, com escala de 10 divisões do nônio.

Figura 7 - Faixa dendrométrica no tronco de árvore (A), sobreposição da escala-nônio (B), gabarito para gravação da escala-nônio (C), dendrômetro e escala/mola (D) (SETTE JR., 2010, adap.)

Para a avaliação do incremento em diâmetro do tronco das árvores foi mensurado o deslocamento das escalas sobrepostas das faixas dendrométricas mensalmente, no início de cada mês, no período da manhã (8:00-10:00h) e mesmo trajeto. Os dados da mensuração dos dendrômetros no tronco das árvores foram registrados no período de novembro de 2011 a novembro de 2013, correspondendo ao 18º e 43º mês de plantio, respectivamente; no período de dezembro de 2012 a novembro de 2013 as leituras dos dendrômetros foram realizadas semanalmente, de modo a obter uma maior precisão temporal da influência das variáveis climáticas sobre o incremento do tronco das árvores.

4.3.2 Sazonalidade da atividade cambial do tronco das árvores

Selecionou-se uma árvore de cada um dos seis tratamentos nos três blocos para a análise da sazonalidade da atividade cambial, totalizando dezoito árvores analisadas. No tronco das árvores selecionadas foram extraídas amostras do lenho no mesmo dia da leitura dos dendrômetros (frequência mensal): pela manhã, entre 10:00-12:00 h, no período de um ano, entre os meses de outubro de 2011 a setembro de 2012.

Com base nos dados de incremento em diâmetro do tronco pelos dendrômetros foi definido o período de maior e menor atividade cambial e sua relação com a precipitação e temperatura média. Utilizou-se o instrumento *Trephor* (Figura 8) para a coleta das amostras, contendo casca, floema, câmbio e xilema, que se apresentavam com formato cilíndrico, 2,5 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, para a análise da atividade cambial (ROSSI et al., 2006).

As amostras do lenho foram, inicialmente, extraídas na altura de 50 cm do tronco, em duplicata, distanciadas 5 cm ao longo do caule, na seção transversal; posteriormente, as amostras do lenho foram extraídas de posições espiradas ao longo do tronco, distanciadas de 5-10 cm da coleta anterior. As amostras do lenho foram armazenadas em recipientes fechados, com solução fixadora de FAA (formaldeído, ácido acético, álcool etílico, água destilada, nas proporções de 10:5:50:35) (BERLYN; MIKSCHE, 1976) e mantidas sob refrigeração (8 -10 °C) até o “emblocamento”.

Figura 8 – Extração da amostra do lenho do tronco de uma árvore de eucalipto com o extrator Trephor

A inclusão das amostras do lenho, fixadas em FAA, envolveu as seguintes etapas: (i) lavagem em água corrente (8-12 horas); (ii) de acordo com a metodologia proposta por De Magistris et al. (2000), utilizando o polietilenoglicol (PEG, peso molecular 1500), realizou-se a embebição das amostras do lenho em PEG 20%, em

estufa de circulação forçada (36 h, 60°C), para a sua impregnação; em seguida, transferiram-se as amostras para o PEG 60% (24 h, 60°C) e, finalmente, para o PEG 100% (24 h, 60°C).

As amostras do lenho foram orientadas no direção transversal, embebidas em PEG 100%, em estado líquido, solidificando-se à temperatura ambiente, formando um bloco; posteriormente, o bloco foi colado com adesivo, à base de éster de cianoacrilato, em blocos de madeira (1 x 2 x 0,5 cm) para fixá-lo no suporte do micrótomo de deslize. Na superfície transversal da amostra do lenho, aplicou-se uma camada de polivinila cloreto (PVC) para a sua plastificação, a fim de facilitar o corte com a espessura de 10 µm.

Os cortes histológicos foram colocados em água e, em seguida, corados, de acordo com metodologia proposta por Tolivia e Tolivia (1987), durante 5 a 10 minutos, com safranina e azul de astra (safrablau, 7 partes de azul de astra 1% aquoso + 3 de safranina 1% aquoso), que propiciou coloração vermelho intenso (tecidos lignificados, xilema), azul (tecidos não lignificados) e cores intermediárias (tecidos em processo de lignificação). Os cortes histológicos foram lavados (água destilada, retirada excesso de corante), desidratados (álcool 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100%) e montados em lâmina com Entellan® + acetato de butila.

Na análise da sazonalidade da atividade cambial avaliaram-se as lâminas histológicas do lenho das árvores de eucalipto sob microscopia de luz. Utilizou-se o *software* “*Image ProPlus*” para determinação de: (i) número e largura da camada de células da camada cambial e (ii) número e comprimento da camada de células do xilema recém-diferenciadas (sem a formação da parede secundária).

No presente trabalho, utilizou-se o termo “câmbio vascular”, considerando a camada de células iniciais juntamente com as camadas de células derivadas. Tal situação se deve à impossibilidade de separação das duas camadas de células, além da falta de alinhamento das células iniciais.

As etapas da análise da sazonalidade da atividade cambial do tronco das árvores envolveram as etapas metodológicas (Figuras 9 e 10) com a análise e interpretação, relacionadas com a leitura dos dendrômetros e variáveis climáticas.

Figura 9 - Metodologia da análise da atividade cambial do tronco das árvores

Figura 10 - Etapas da análise da atividade cambial: (A) amostra em solução de FAA; (B) amostra emblocada em PEG; (C) corte histológico para análise microscópica

4.4 Dados climáticos

Os valores da temperatura média, máxima e mínima e precipitação acumulada foram coletados, diariamente, no período de outubro de 2011 a novembro de 2013 na Estação Meteorológica da Estação Experimental de Itatinga/SP. O teor de umidade do solo em diferentes profundidades foi determinado, semanalmente, pela norma ASTM D2226-71. Os dados climáticos foram agrupados em períodos de 15, 30 e 45 dias, anteriores ao da avaliação do incremento do tronco pelos dendrômetros. Através da análise de correlação de Pearson, utilizaram-se os

valores de incremento em diâmetro do tronco das árvores, determinando-se (i) as variáveis climáticas que influenciaram no crescimento do tronco, em escala temporal, e (ii) período de resposta das árvores (*lag do crescimento*), em relação à ocorrência do evento climático.

4.5 Caracterização do lenho

No 12º e 24º mês de idade, selecionaram-se quatro árvores (1 dominada, 2 codominadas e 1 dominante) por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica), totalizando 48 árvores. No 36º mês de idade, selecionaram-se 8 árvores (3 dominadas, 3 codominadas e 2 dominantes) por tratamento, totalizando 48 árvores. As árvores das três idades (12, 24 e 36º mês) foram utilizadas na caracterização anatômica e física do lenho do tronco (Tabela 2).

Tabela 2 – Resumo do número de árvores selecionadas em cada idade

Idade (meses)	Número de árvores por tratamento	Número total de árvores coletadas
12	4	24
24	4	24
36	8	48

Dessas árvores, retiraram-se toretes com comprimentos de 10 a 15 cm nas posições da base; DAP; 3; 4,5; 6; 7,5; 9; 10,5 e 12 metros ao longo do tronco (Figura 11), para a determinação da densidade básica pelo método da balança hidrostática. Exclusivamente da posição do DAP foi retirado material para análise das características anatômicas do lenho (dimensões das fibras e dos vasos), da densidade aparente (densitometria de raios X), diferenciação cerne/alburno e composição química (36º mês de idade).

Figura 11 – Amostragem do lenho das árvores de *E. grandis* no 24º mês: análise anatômica e física

4.5.1 Densidade básica do lenho

Os discos das árvores das três idades e em diferentes posições, já mencionadas, foram cortados com a espessura de 1,0 cm e, posteriormente, foram imersos em água até a sua saturação completa. Utilizando-se a metodologia da balança hidrostática para a determinação da densidade básica (Eq. 1, NBR 11941), obteve-se a (i) massa úmida (M_u), (ii) massa imersa em água (M_i) e (iii) massa seca (M_s) ($103 \pm 2^\circ\text{C}$, 48 h). O valor da densidade básica média do lenho das árvores do 12º, 24º e 36º mês foi ponderado pelas equações 2, 3, e 4, considerando o valor da densidade básica média do lenho (torete) e o volume de cada seção (torete) pelo volume de cada seção (tora) de acordo com Arizapana-Almocinad (2013).

$$dB = \left(\frac{M_s}{M_u - M_i} \right) \quad (1)$$

$$dB_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N-1} V_{S(i)} x dB_{(i)}}{\sum_{i=1}^{N-1} V_{S(i)}} \right) \quad (2)$$

$$V_s = 0,00007854 * \left(\frac{D^2 + d^2}{2} \right) * L \quad (3)$$

$$dB_{(i)} = \left(\frac{dB_1 + dB_2}{2} \right) \quad (4)$$

Onde:

Db_p : densidade média ponderada da árvore;

V_s : volume da tora (Fórmula de Smalian);

D : diâmetro sem casca na base do torete;

d : diâmetro sem casca no topo do torete;

L : comprimento do torete;

$Db_{(i)}$: densidade média da tora;

Db_1 : densidade do disco retirado na base da tora;

Db_2 : densidade do disco retirado no topo da tora;

i : 1, 2, 3 ... N;

N: número de discos.

4.5.2 Densidade aparente do lenho através de imagens digitais de raios X

Seleção e preparação das amostras: selecionaram-se discos do lenho com três cm de espessura (Figura 10A), do DAP, com 12, 24 e 36 meses de idade. Os discos foram cortados em seções diametrais (20x10 mm, largura x espessura) (Figura 12B) e, posteriormente, colados em suportes de madeira; a seguir, foram retiradas amostras finas, transversalmente, com espessura de 2,0 mm, em equipamento de dupla serra circular paralela (Figura 12C e D) e acondicionadas em câmara de climatização (20°C, 24h, 60% UR, 12-15% umidade da madeira) (CASTRO, 2011; ARIZAPANA-ALMOCINAD, 2013).

Descrição do equipamento e princípio de funcionamento: as amostras do lenho e a escala de calibração de acetato de celulose foram inseridas no compartimento blindado do equipamento de raios X digital Faxitron modelo LX-60, calibrado para a leitura automática (30 Kv, 19 segundos); as imagens digitais com ultra-contraste e resolução foram salvas em formato DICOM (FAXITRON, 2009) (Figura 12E, F).

Montagem do perfil radial de densidade aparente: as imagens digitais em escala de cinza (Figura 12G) e da escala de calibração foram analisadas no *software ImageJ*, determinando-se os valores radiais de densidade aparente do lenho (a cada 50 μm), obtidos pelo software e transferidos para o planilha eletrônica, para a construção dos perfis diametrais de densidade aparente.

Figura 12 - Obtenção das imagens digitais do lenho de *E. grandis* em equipamento de raios X (A, B, C e D) corte e preparação da amostra transversal do lenho (2 mm, espes.); (E, F) equipamento de raios X LX-60; (G) imagem digital do lenho

4.5.3 Diferenciação das regiões do cerne x alburno por colorimetria

Na posição do DAP, com as três idades em estudo, foram cortados toretes, com 5 a 10 cm de comprimento, que foram submetidos à secagem natural até atingir a umidade de equilíbrio; posteriormente, foram submetidos a novo corte, com a espessura de 0,5 cm. Uma das faces foi pincelada com solução de *Dimethyl yellow* (0,2% em etanol) e seca ao ambiente. Em seguida, analisou-se a diferenciação de coloração do lenho, onde o alburno apresentava uma tonalidade amarelada e o cerne, variando de vermelho a róseo.

4.5.4 Composição química do lenho

Analisaram-se 18 amostras do lenho do DAP, com idade de 36 meses (3 árvores/tratamento, sendo 1 árvore por classe: dominante, codominada, dominada). As análises das características químicas no lenho foram realizadas no Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE) da Escola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ/USP. As amostras do lenho foram moídas em moinho tipo *Willey* e classificadas para obtenção da fração 40/60 mesh recomendada pelas normas TAPPI T 264 cm-97 e TAPPI T 257 cm-85 para análise química. Posteriormente, o material foi levado para a câmara de climatização com temperatura de 20 ± 3 °C e umidade relativa de $65 \pm 2\%$, permanecendo nesta condição para a homogeneização da umidade. Das amostras moídas foram determinados os teores de lignina solúvel e insolúvel, sendo o teor de lignina total a somatória destes dois teores, seguindo-se a norma TAPPI T 222 om-98 e os teores de extrativos totais e holocelulose de acordo com o preconizado nas normas TAPPI T 204 cm-94 e TAPPI T 19 om-54, respectivamente.

4.5.5 Características anatômicas do lenho

Para a análise das dimensões das fibras, inicialmente, foram selecionados discos do lenho do DAP com as idades de 12, 24 e 36 meses (Figura 13); em seguida, foram retiradas amostras para o processo de maceração, segundo o método Franklin (JOHANSEN, 1940); as lâminas histológicas com as fibras foram analisadas em microscopia de luz e coletadas 40 imagens de fibras por lâmina para a mensuração do comprimento (ampliação de 100 vezes), largura e diâmetro do

lume (ampliação de 400 vezes) totalizando 960 medições de fibras por idade de cada variável. A espessura da parede foi obtida pela razão da metade da diferença entre a largura e o diâmetro do lume. Para a mensuração das fibras foi utilizado o *software Image Pro Plus*, previamente calibrado para cada aumento e obtidos os valores de dimensões das fibras por tratamento.

Das amostras do DAP foram cortados corpos de prova orientados com dimensões de 20X10 mm de largura e espessura, respectivamente; em seguida, foram imersas em água, em ebulição, para a saturação e amolecimento e posterior fixação em micrótomo de deslize e corte das seções transversais, com espessura de 15 a 20 μm . Os cortes foram clarificados em água cândida (1:1), lavados em água destilada em mistura de ácido acético 1%, desidratados (série alcoólica, 30-100%), lavados (xilol) e montados sob lamínula, com bálsamo do Canadá.

Das lâminas foram coletadas imagens do plano transversal (6 imagens por amostra) para a mensuração do diâmetro, porcentagem de área e frequência dos vasos/ mm^2 , aplicando-se o *software Image Pro Plus*. As imagens da seção transversal foram calibradas de acordo com a ampliação e mensurado o diâmetro tangencial de 40 vasos, (Figura 14), totalizando 960 medições de vasos por idade. A porcentagem de área dos vasos foi obtida pelo *software Photoshop*, mensurados todos os pixels ocupados pelos vasos nas seis imagens por amostra e feita a conversão em porcentagem de área de vasos, com 144 medições por idade. A frequência dos vasos (número de vasos/ mm^2) foi obtida pela contagem dos vasos contidos em cada imagem por amostra e convertida em vasos/ mm^2 , com 144 medições por idade. O valor do diâmetro, porcentagem de área e frequência dos vasos/ mm^2 foram relacionados com os tratamentos de nutrição x disponibilidade hídrica, idade das árvores e propriedades do lenho.

Figura 13 – Esquema de retirada das amostras do disco na altura do DAP para determinação das características anatômicas do lenho (fibras e vasos)

Figura 14 – Mensuração do diâmetro dos vasos com a utilização do software *Image Pro Plus*. Barra: 100 μ m

4.6 Análises estatísticas

Na análise estatística, utilizaram-se os programas SAS (SAS INSTITUTE, 1999), SPSS (*Social Package Social Science*) e SISVAR, para comparação de resultados. Na análise do incremento em diâmetro do tronco e da atividade cambial das árvores utilizou-se o delineamento em blocos casualizados; o diâmetro do tronco das árvores foi correlacionado com os parâmetros climáticos (coeficiente de *Pearson*) e, através da análise de regressão “*stepwise*”, foram selecionadas as variáveis climáticas que explicam o incremento do tronco. Para as propriedades anatômico-físico-químicas do lenho foram aplicadas duas análises de variância (ANOVA): uma, para verificar o efeito dos tratamentos: nutrição x disponibilidade hídrica, e outra, para verificar o efeito dos fatores isolados: nutrição (controle, Na e K) e disponibilidade hídrica (66 e 100% de chuva); para tanto, foi aplicado o teste de Tukey, ajustado a 95% de probabilidade.

Durante o primeiro ano de avaliação mensal do incremento corrente do DAP, verificaram-se valores de máximo incremento, variando de 0,22 a 0,50 cm, nos meses de novembro de 2011, janeiro, abril e outubro de 2012; no segundo ano de avaliação, os valores encontrados variaram de 0,16 a 0,28 cm, nos meses de novembro/2012, abril e maio de 2013. Por sua vez, os valores de mínimo incremento no primeiro ano de avaliação variaram de 0,08 a 0,32 cm, nos meses de dezembro/2011, fevereiro, março e de junho a setembro/2012; no segundo ano, variaram de 0,04 a 0,20 cm, nos meses de dezembro/2012, janeiro, fevereiro e de junho a setembro de 2013 (Figura 15A).

A avaliação semanal do incremento do DAP (Figura 15B) possibilitou uma caracterização mais detalhada em relação às variações climáticas, principalmente, da precipitação e temperatura. Por meio de testes estatísticos, verificou-se que a disponibilidade hídrica exerceu influência no incremento do DAP em semanas isoladas, durante o período de avaliação. O fator nutrição e a interação entre os dois fatores, por sua vez, exerceram maior influência na avaliação semanal, compreendendo os meses de dezembro de 2012 a maio de 2013, sendo este um período de chuvas mais frequentes. Durante o período analisado, conclui-se que a nutrição foi o fator determinante para a ocorrência de diferenças significativas entre os tratamentos.

De modo geral, as diferenças do incremento corrente do DAP, nos seis tratamentos, mostraram-se significativas nos períodos de maior taxa de incremento. Nesse período, as árvores se encontram no estágio fenológico com folhas maduras e limbo expandido, dispondo de maior volume de água no solo, bem como de temperatura e fotoperíodo favoráveis, estimulando taxas mais altas de fotossíntese e de biossíntese de seiva. Os hormônios e carboidratos deslocam-se pelo floema, proporcionando maiores taxas de divisão das células cambiais e, em consequência, maior crescimento em diâmetro do tronco.

Os períodos de menor taxa de incremento do tronco coincidiram com os de menor precipitação, temperatura, fotoperíodo e disponibilidade de água nas camadas mais profundas do solo. Esses resultados corroboram com os obtidos por Valenziano e Scaramuzzi (1967); Sette Junior (2007) e Sette Júnior et al. (2010, 2012) para as árvores de eucalipto, nos períodos de precipitação e de estresse hídrico; Laclau et al. (2013) observaram que as raízes de árvores de *E. grandis*, com

doze meses de idade podem atingir seis metros de profundidade, em solos tropicais profundos.

Nos doze meses iniciais de avaliação, as árvores adubadas com K e Na apresentaram, de modo geral, maiores taxas de incremento corrente do tronco, independente do tratamento de disponibilidade hídrica. No início do segundo ano de avaliação (outubro/2012), no entanto, após a recarga de água no lençol freático, as árvores submetidas à redução de chuva apresentaram maior taxa de crescimento do tronco. Possivelmente, tal situação se deve às seguintes hipóteses: **(i)** nos dois anos iniciais, as lonas de plástico propiciaram um aumento da temperatura, propiciando um microclima favorável ao crescimento das árvores, com redução de chuva – hipótese comprovada por Cheesman e Winter (2013); **(ii)** nos primeiros anos, havia água depositada nas camadas profundas do solo; **(iii)** desenvolvimento de raízes finas nas camadas mais profundas do solo, estimuladas pela redução de chuva, como resposta adaptativa ao estresse hídrico uma vez que as raízes finas são mais sensíveis à menor quantidade de chuvas no período mais seco, absorvendo a água disponível, de forma mais rápida e eficiente - hipótese comprovada por Laclau et al. (2013); **(iv)** a porcentagem de redução de chuva (34%), provavelmente, não foi suficiente para promover um forte estresse hídrico que afetasse o crescimento das plantas.

De acordo com Battie Laclau et al., (2013, 2014), utilizando a mesma área experimental do presente estudo, essas hipóteses são fundamentadas por variáveis que afetam o crescimento e desenvolvimento das árvores de eucalipto, como a sua área e queda foliar (tempo de vida das folhas), atividade fotossintética, densidade e área dos estômatos (trocas gasosas), alocação do carbono nas partes da planta, potencial de base e osmótico, déficit de pressão de vapor e porcentagem de umidade ao longo da profundidade do solo, temperatura mínima do ar, entre outros.

No período de junho a setembro de 2012, ocorreu a menor taxa de crescimento do diâmetro do tronco das árvores; a taxa mais intensa ocorreu a partir de agosto de 2012, com uma precipitação e temperatura de 0,2 mm e 17,6°C, respectivamente. Em agosto de 2012, as árvores submetidas aos tratamentos sem redução de chuva apresentaram um aumento no incremento corrente; as árvores com redução de chuva, ao contrário, apresentaram uma diminuição do incremento, nos meses de julho e setembro de 2012 (Figura 15A). No mês de agosto de 2012, sugere-se que, as árvores que não apresentavam redução de chuva (100%),

possuíam uma maior disponibilidade de água armazenada e mais prontamente disponível nas camadas mais profundas do solo para as raízes (Figura 16), principalmente na camada entre 450 a 600 cm. Os tratamentos que possuíam redução de chuva (66%) detinham menor quantidade de água armazenada no solo e, em períodos de déficit hídrico, resultaram em diminuição de incremento em diâmetro. Em setembro e outubro de 2012, com o início do período das chuvas, os solos voltam à recarga de água, recuperando o ritmo de incremento do tronco de todos os tratamentos.

Embora a redução do diâmetro do tronco fosse caracterizada em agosto de 2012, observou-se o mesmo comportamento nos meses de dezembro dos anos de 2011 e 2012, além de fevereiro e junho de 2012 e 2013, cujas precipitações nos meses citados foram de 107; 191; 212; 228; 157 e 214 mm, respectivamente; situação semelhante foi observada para as temperaturas: 21; 23; 23; 21 e 16; 17°C, para os meses citados. Verifica-se que a redução do diâmetro do tronco observada em agosto de 2012 também ocorreu nos períodos mencionados, a despeito de maior precipitação e temperatura. As reduções do crescimento em diâmetro do tronco nos meses de dezembro de 2011 e janeiro de 2013 estão de acordo com os resultados observados por Laclau et al. (2005), Sette Júnior (2007) e Sette Júnior et al. (2010, 2012). Segundo esses autores, cerca de dois meses, após o início das primeiras chuvas, ocorre um decréscimo de incremento em diâmetro, interpretado como uma resposta das árvores que alocam, preferencialmente, os nutrientes e carboidratos para os meristemas das folhas e formação de raízes finas, em detrimento do meristema cambial. Além disso, pode-se atribuir, parcialmente, a diminuição do crescimento, nesta época, ao elevado teor de umidade do solo (Figura 16) e ao maior número de dias nublados, afetando a transpiração das árvores e a fotossíntese, com reflexo no incremento do tronco.

As reduções do crescimento em diâmetro do tronco, nos meses de fevereiro e junho de 2012 e 2013, podem ser atribuídas à quantidade de dias nublados nos referidos meses, além dos elevados teores de umidade remanescente no solo, afetando, possivelmente, os processos fisiológicos das árvores como a fotossíntese, com reflexo no incremento do tronco. Outros fatores relacionados com a dilatação/contração da casca, em função da umidade do ambiente, poderiam, da mesma forma, estar relacionados com este comportamento, embora não quantificados neste estudo.

As árvores apresentaram uma tendência do crescimento em diâmetro do tronco comumente observada em plantios comerciais (MELLO, 1998; GONÇALVES et al., 1997; ALMEIDA, 2009; SETTE JUNIOR, et al., 2010, 2012), com elevada taxa de incremento do tronco nos primeiros meses, após o plantio, seguida de estabilização, pelo aumento da demanda dos fatores de crescimento, como água, nutrientes, luz etc.

Figura 16 – Variação semanal de umidade volumétrica a diferentes profundidades do solo da área experimento no período de junho de 2010 a outubro de 2013. A área em sombreada em cinza representa a estação seca (de julho a setembro)

O incremento acumulado em diâmetro do tronco indica as curvas de crescimento, refletindo a diferença dos tratamentos, exceto para os tratamentos submetidos à nutrição controle, com e sem redução de chuva (C/-A e C/+A) (Figura 17). O incremento acumulado em diâmetro do tronco, no período inicial de avaliação, correspondente ao mês de novembro de 2011, é similar para todos os tratamentos, devido à presença de água no solo; nos meses subsequentes, verificam-se diferenças entre os tratamentos, com maior taxa de incremento do diâmetro do tronco, submetido ao tratamento de nutrição potássica, com e sem redução de chuva (K/+A e K/-A), seguindo a nutrição sódica, com e sem redução de chuva (Na/+A e Na/-A) e, finalmente, submetido à nutrição controle, com e sem redução de chuva (C/-A e C/+A). Independente da disponibilidade hídrica (com e sem redução de chuva), o maior incremento do tronco ocorreu nas árvores com aplicação de K, em relação ao Na e, deste, em relação ao controle.

O tempo de avaliação do crescimento do tronco foi de 24 meses, mas verificou-se a necessidade da continuidade das mensurações até o final da rotação,

o que possibilitaria o monitoramento das árvores e a projeção da produtividade dos plantios florestais, submetidos ao estresse nutricional e hídrico.

Figura 17 - Incremento acumulado do tronco nos seis tratamentos de nutrição e disponibilidade hídrica. A área em sombreada em cinza representa a estação seca (de julho a setembro)

O efeito da precipitação pode ser detectado pelos períodos de máximo e mínimo crescimento do tronco, conforme já mencionado. O crescimento mínimo ocorreu nos meses de dezembro de 2011, março, maio, julho a setembro de 2012, com precipitação limitante e valor mensal acumulado de 107; 77; 74; 25; 0 e 72 mm, respectivamente. A temperatura média diminuiu nos períodos de abril a julho de 2012 e de abril a julho de 2013, apresentando valores de 21,5 a 14,6°C e de 19 a 14,2°C, respectivamente. Os períodos que apresentaram menor precipitação e temperatura correspondem aos períodos de redução do crescimento em diâmetro do tronco (Figura 18). Durante o período do estudo considera-se que os valores de precipitação e temperatura foram normais, corroborando os trabalhos de Laclau et al. (2005), Sette Júnior et al. (2012) e de Battie Laclau (2013), em estudos realizados nas mesmas condições e local de experimentação.

Figura 18 – Precipitação e temperatura mensais locais, no período de estudo. A área em sombreada em cinza representa a estação seca (de julho a setembro)

O incremento corrente do diâmetro do tronco e a média das variáveis climáticas (Tabela 3) não apresentou uma correlação significativa, exceto para a precipitação, que se mostrou positiva e significativa (95% probabilidade), de 0,61, indicativa de que o mês com maior incidência de chuva resulta em maior incremento do tronco, em função do aumento do teor de água no solo.

Tabela 3 - Coeficiente de correlação das variáveis climáticas e o incremento em diâmetro do tronco, antes e depois da defasagem (lag) de 15, 30 e 45 dias

Parâmetro	Coeficiente de correlação	
	Antes	Depois
Precipitação	0,61	
U (300)		Lag 45 (0,62) *
		Lag 15 (0,66) *
U (450)		Lag 30 (0,70) *
		Lag 45 (0,75) *
U (600)		Lag 15 (0,68) *
		Lag 45 (0,73) *
Temperatura		Lag 30 (0,63) *

* significativo a 95% de probabilidade; U300, 450, 600: teor de umidade do solo a 300, 450 e 600 cm

Ressalta-se a importância de se determinar o período de ocorrência do evento climático (*lag*) e a resposta do crescimento do diâmetro das árvores; em períodos de 15, 30 e 45 dias de antecedência (Tabela 3), observou-se uma correlação significativa do incremento em diâmetro com a temperatura e com o teor de umidade, a diferentes profundidades do solo. Este fato é corroborado por inúmeros autores (WIMMER et al., 2002; BOTOSSO et al., 2005; DREW et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011; YU et al., 2011, SETTE JUNIOR et al., 2010, 2012) que relacionaram o efeito das variações climáticas (precipitação, temperatura) e do teor de umidade do solo com o incremento do tronco, em tratamentos de fertilização mineral, desbaste, altitude do terreno etc.

Foi baixa a correlação entre as variáveis climáticas e o incremento em diâmetro do tronco por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica), no mês de avaliação (*lag* 0) (Tabela 4). Os tratamentos com redução de chuva (C/-A; Na/-A; K/-A) indicaram que as árvores, submetidas a déficit hídrico induzido (redução de chuva), foram mais sensíveis às variações de precipitação. Com a defasagem (*lag*), no entanto, a correlação aumentou, em resposta ao incremento em diâmetro do tronco às variáveis climáticas, ocorridas anteriormente. A defasagem de 15 dias apresenta alta correlação entre as variáveis em questão; quando a defasagem altera para 45 dias, a correlação aumenta, apresentando maiores valores entre o

incremento do tronco e o teor de umidade do solo, como 450 e 600 cm de profundidade. Verifica-se, assim, que quanto maior for o período de defasagem (lag) maiores os valores de correlação com o crescimento em diâmetro do tronco. Por outro lado, o teor de umidade nas camadas mais superficiais do solo indicam baixa ou inexistente correlação com o crescimento em diâmetro do tronco, devido à perda de água no solo por evaporação ou percolação. Resultados similares foram apresentados por Almeida (2009), Oliveira et al. (2011) e Sette Jr. et al. (2010).

Tabela 4 - Coeficiente de correlação das variáveis climáticas e incremento em diâmetro do tronco nos seis tratamentos, antes e depois da defasagem (lag) de 15, 30 e 45 dias

Parâmetro	Lag (dias)	Antes						Depois					
		C/+A	Na/+A	K/+A	C/-A	Na/-A	K/-A	C/+A	Na/+A	K/+A	C/-A	Na/-A	K/-A
U150	0						0,58*						
U300	45							0,61*	0,67*	0,65*			0,60*
U450	0		0,64*										
	15							0,66*	0,73**	0,68*		0,61*	0,62*
	30							0,66*	0,71**	0,70*	0,59*	0,67*	0,71**
	45							0,68*	0,73**	0,74**	0,63*	0,72**	0,76**
U600	0	0,58*	0,64*										
	15							0,61*	0,67*	0,65*	0,58*	0,69*	0,72**
	30							0,63*	0,66*	0,67*	0,64*	0,74**	0,78**
	45							0,63*	0,65*	0,68*	0,62*	0,74**	0,79**
Temp.	15											0,61*	0,62*
	30							0,64*			0,58*	0,65*	0,67*
	45							0,62*			0,59*	0,67*	0,71**
Precipit.					0,60*	0,73**	0,67*						0,61*

*signific. a 95% prob.; **signific. a 99% prob.; U: Teor umidade diferentes profundidades do solo

Excluindo-se as variáveis climáticas não significativas (teor de umidade do solo; temperatura média, máxima e mínima), a precipitação foi a variável climática que se relacionou com o incremento médio do diâmetro do tronco dos tratamentos, através de regressão *Stepwise* (95% probabilidade). Cerca de 30% da variação do total do incremento em diâmetro do tronco pode ser explicada pela precipitação, em função do modelo de regressão (Equação 6).

$$IC = 0,156 + 0,001 * \text{Precipitação} \quad (6)$$

Os modelos ecofisiológicos das árvores devem ser desenvolvidos para explicar as variações do seu crescimento e desenvolvimento, em resposta às condições climáticas, embora não sejam objetivo do presente trabalho. É importante analisar, no entanto, a interação do crescimento cambial das árvores com as variações climáticas. Diversos trabalhos relacionam o incremento radial do tronco com a precipitação, uma vez que os efeitos diretos do déficit hídrico afetam a

atividade cambial, reduzindo a produtividade dos plantios florestais (JACOBY, 1989; LIPHSCHITZ, 1995; MATTOS et al., 2004; ZUIDEMA, 2005; SOUZA et al., 2006; FERRAZ, 1993 apud OLIVEIRA et al., 2011; BOTOSSO et al., 2005).

De acordo com Taiz e Zeiger (1998), o processo de fotossíntese nas plantas exige uma faixa de temperatura ótima; quando a temperatura ambiente está acima ou abaixo dessa faixa ocorre uma diminuição da produtividade florestal. Nesse contexto, os resultados do presente trabalho indicam uma plasticidade das árvores pela adaptação às variações da temperatura, mantendo a produtividade, desde que outros fatores de crescimento não sejam limitantes. Nas regiões tropicais, a água e os nutrientes são os principais fatores restritivos à produção florestal (BARROS; COMERFORD, 2002).

Inúmeros trabalhos demonstram a redução da produção da biomassa nas árvores de espécies de rápido crescimento, como resultado do estresse hídrico (STAPE et al., 2004). Analisando cinco regiões do Estado de São Paulo, Santana et al. (2008) verificou uma maior produção de biomassa nos locais de maior precipitação. Da mesma forma, Reis et al. (2006) observaram maior crescimento em diâmetro do tronco e volume do lenho de eucalipto, submetido à irrigação. Segundo Jarvis (1985), o estresse hídrico reduz a eficiência da conversão de energia solar em biomassa, diminuindo a quantidade de luz interceptada pela copa, resultando em menor produtividade florestal.

O fechamento dos estômatos constitui-se em um dos mecanismos fisiológicos das plantas, sendo responsável pela redução do seu crescimento em situações de déficit hídrico, reduzindo a absorção de CO₂ (BLAKE; TSCHAPLINSKI, 1992). Segundo os mesmos autores, as árvores possuem mecanismos para minimizar o efeito do estresse hídrico, presentes em *E. grandis*, que reduzem a condutância estomática, apresentando diminuição da transpiração em relação à absorção de CO₂. Com isto, a redução da transpiração é maior do que a observada na fotossíntese, aumentando, desta forma, a eficiência de utilização da água. Esse comportamento fisiológico das árvores de eucalipto está relacionado com sua produtividade, mesmo em condições de estresse hídrico não muito pronunciado.

No trabalho de Battie Laclau (2013), verificou-se que o maior crescimento e o aumento da demanda de água das árvores de eucalipto do tratamento com adubação potássica e sem redução de chuva (K/+A) resultou em árvores mais vulneráveis ao estresse hídrico severo. As mudanças climáticas e consequente

redução do regime pluviométrico, em situações de risco de seca prolongada, exigirão um manejo silvicultural adequado, através de: (i) redução da densidade de plantio, (ii) diminuição da dosagem de fertilizantes potássicos, (iii) plantio de clones resistentes à seca e com maior eficiência no uso da água, visando à manutenção da produtividade e da sobrevivência das árvores.

A avaliação da altura média do tronco e sua relação com o crescimento em diâmetro, no período de três anos de idade, detectou aumentos significativos com a aplicação de K e, em seguida, de Na (Figura 19). A aplicação de K e de Na, associados aos tratamentos de redução de chuva, acarretou em menor altura do tronco, principalmente, a partir do 22^o mês. Não se observou o efeito das lonas sobre a temperatura do solo nos tratamentos com aplicação de K e Na, quando as árvores de eucalipto desenvolveram a sua copa. Cheesman e Winter (2013) verificaram que, sob tratamento de redução de chuva, árvores de eucalipto apresentaram maior crescimento em altura do tronco, nos meses iniciais, após o plantio, devido ao aquecimento do ar e do solo, sob as lonas de plástico.

Figura 19 – Altura acumulada das árvores nos seis tratamentos de nutrição e disponibilidade hídrica

As alturas do tronco das árvores, aos 36 meses de idade, nos tratamentos, submetidos à nutrição controle, com e sem redução de chuva (C/-A e C/+A), foram de 11,36 e 10,74 m, respectivamente; para os tratamentos submetidos à nutrição potássica, com e sem redução de chuva (K/-A e K/+A), as alturas médias do tronco foram de 15,25 e 15,76 m, respectivamente; e para os tratamentos submetidos à nutrição sódica, com e sem redução de chuva (Na/-A e Na/+A), foram de 13,61 e 14,25 m, respectivamente.

A resposta positiva do crescimento das árvores de eucalipto à adição de Na, em solos com deficiência de K, foi verificada por Almeida et al. (2010), que descreveram o efeito positivo desses elementos no crescimento em altura do tronco das árvores, aos 48 meses de idade; os mesmos autores aplicaram 34 kg de Na/ha e 58 kg de K/ha, após o plantio e verificaram um aumento de 14 e 33%, respectivamente. Sugerem, ainda, a aplicação de Na+K, na forma conjunta, partindo de observações em empresas florestais localizadas nas regiões costeiras, onde observaram uma maior resposta do crescimento das árvores de eucalipto, submetidas à aplicação de K, considerando a deposição do Na pela brisa do mar, acarretando menor necessidade de fertilizantes potássicos.

Battie-Laclau (2013) verificou que, independente do regime hídrico, a aplicação de K aumentou em 45% a altura do tronco das árvores de eucalipto, no 954º dia, após o plantio; contudo, observou uma interação entre a disponibilidade de K e água, a partir de 824º dia, após o plantio; a redução de chuva, no entanto, diminuiu o efeito da aplicação de K sobre o crescimento em altura e circunferência do tronco.

O diâmetro do tronco, avaliado nas três idades, nos seis tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica) (Tabela 5), indicou que: (i) no primeiro ano não houve diferença significativa no DAP do tronco das árvores em nenhum tratamento; por sua vez, a redução de chuva não afetou o crescimento pela disponibilidade de água no solo; verificou-se, no entanto, que a aplicação de K e Na foi superior ao controle; (ii) no segundo e terceiro anos verificaram-se diferenças significativas no DAP do tronco das árvores com K, em relação com Na, independente da disponibilidade hídrica (com e sem redução de chuva). O incremento do tronco do 12º ao 36º mês de idade, no período correspondente a maio de 2011 a maio de 2013, aumentou de 59, 55, 54, 63, 62 e 52% nos tratamentos C/+A, Na/+A, K/+A, C/-A, Na/-A e K/-A, respectivamente.

Em relação ao volume real do tronco, verificou-se que: (i) no primeiro ano, não houve diferença estatística para nenhum tratamento; (ii) no 2º e 3º anos, os tratamentos submetidos à adubação potássica foram estatisticamente superiores aos tratamentos realizados com a adubação sódica, independente da disponibilidade hídrica (com e sem redução de chuvas). No terceiro ano, os tratamentos sem redução de chuva (K/+A) indicaram um aumento de 2,6 e 2,4 vezes em relação aos tratamentos controle (C/+A e C/-A). Por sua vez, no tratamento com redução de

chuva (K/-A), verificou-se uma produção de 2,3 e 1,2 vezes maior que a adubação controle mais volume de lenho do que C/+A e C/-A. O tratamento K/+A produziu 1,2 vezes mais madeira em relação ao K/-A.

Tabela 5 – Diâmetro e volume médio do lenho nas três idade analisadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Variável	Idade (meses)	Tratamentos					
		C/+A	Na/+A	K/+A	C/-A	Na/-A	K/-A
Diâmetro (cm)	12	4,1 a (0,9)	4,6 a (0,8)	5,3 a (0,7)	4,3 a (0,8)	5,3 a (0,6)	4,7 a (0,9)
	24	5,8 a (1,0)	6,6 ab (1,0)	7,5 b (0,6)	5,8 a (0,3)	6,3 ab (0,9)	7,4 ab (0,2)
	36	6,9 a (1,3)	8,4 ab (1,3)	9,9 b (1,3)	6,8 a (1,3)	8,5 ab (0,8)	9,1 b (1,2)
	Incres.médio (% de incres.)	2,8	3,85	4,6	2,5	3,2	4,4
		41	46	46	37	38	48
Volume (m³)	12	0,0035 a (0,002)	0,0037 a (0,002)	0,0037 a (0,002)	0,0037 a (0,002)	0,0035 a (0,002)	0,0040 a (0,002)
	24	0,0120 a (0,004)	0,0182 ab (0,007)	0,0255 b (0,004)	0,0122 a (0,002)	0,0157 ab (0,005)	0,0237 b (0,003)
	36	0,0231 a (0,010)	0,0446 cd (0,010)	0,0604 d (0,017)	0,0255 ab (0,010)	0,0416 bc (0,009)	0,0520 cd (0,014)
	Incres.médio (% de incres.)	0,0196	0,0409	0,0567	0,0218	0,0381	0,048
		85	92	94	85	92	92

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na linha**, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

No primeiro ano, não se verificou diferença significativa entre os seis tratamentos, nem interação dos dois fatores, para o DAP e o volume do lenho; no segundo e terceiro anos, no entanto, foram verificadas diferenças, em relação aos tratamentos de nutrição mineral. Em resumo, a redução da precipitação não afetou o diâmetro do tronco e o volume do lenho das árvores nas três idades; apenas a nutrição teve efeito no segundo e terceiro anos.

O efeito positivo da interação do K e a disponibilidade hídrica no crescimento das árvores de eucalipto é discutido por poucos pesquisadores. Battie-Laclau (2013), avaliando o segundo ano de plantio, concluiu que, nas árvores submetidas ao tratamento K/+A, madeira, casca, galhos, folhas e “toco” foram 1,8, 2,6, 1,4, 1,6 e 3,2, vezes maior, respectivamente, em relação ao C/+A. Para a mesma idade, as árvores submetidas aos tratamentos com K/+A e C/+A representaram 54% e 41% de madeira, respectivamente.

A redução de chuva não resultou em efeito negativo na produção de biomassa das árvores do tratamento controle. No segundo ano, a biomassa do lenho diminuiu 8% nas árvores submetidas ao tratamento K/-A, em comparação com K/+A. Verificou-se que a condição hídrica não limitante (100% de chuvas), acrescida da adubação potássica, aumentou, expressivamente, a produção de biomassa do lenho, pelo aumento da assimilação de carbono, em função do aumento da superfície e da alocação da biomassa. No período de déficit hídrico, a adubação

potássica melhorou os mecanismos de adaptação das árvores à seca, com aumento da sensibilidade estomática ao déficit hídrico do solo e déficit de pressão de vapor, além do ajuste osmótico.

A importância da aplicação isolada do K para a obtenção de elevada produtividade de biomassa das árvores foi demonstrada por Valeri et al. (1996), Stape e Benedettic (1997), Higashi et al. (1999), Faria et al. (2002), Sette Junior (2007), Almeida (2009), Sette Jr. et al. (2010). Para compreender a função do Na na fisiologia das árvores, sugere-se a necessidade de pesquisas para a viabilidade da substituição parcial do K no controle osmótico e em reações enzimáticas.

5.2 Sazonalidade da atividade cambial do tronco

A análise microscópica da camada cambial do lenho das árvores em dois períodos (chuvoso: janeiro de 2012; seco: julho de 2012) apresentou as regiões de células fusiformes, iniciais radiais e suas derivadas (Figura 20 e 21). Identificaram-se, ainda, as células do xilema (elementos de vaso, parênquima radial e axial, fibras) e do floema (tubos crivados e células companheiras, além do parênquima axial e radial). As extremidades das células fusiformes e os raios cambiais não estavam alinhados entre si, caracterizando um câmbio não estratificado.

Na camada cambial, do mês de julho de 2012, observou-se menor comprimento da camada de células do xilema recém-diferenciado, com ausência da parede secundária, além de menor número de células e divisões periclinais (Figura 18). Em janeiro de 2012, observou-se maior número de camadas e expansão das células fusiformes cambiais e divisões periclinais, resultando em novas células do xilema e floema, acarretando o crescimento em comprimento e largura das células.

No lenho das árvores amostrado em janeiro de 2012, verificaram-se células com a formação de camada gelatinosa, característica de lenho de tração, comum nas árvores jovens e susceptíveis ao vento. Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), as principais diferenças anatômicas, associadas ao lenho de tração, estão relacionadas às fibras (maior ângulo de inclinação da grã e comprimento de fibras).

Figura 20 - Seção transversal da região cambial do material coletado em janeiro de 2012 no tratamento K/+A. Células fusiformes (CF) e Radiais (R); Tecido xilemático ainda com parede primária (Xp); Tecido xilemático maduro, com parede secundária lignificada (Xs); Floema (FI); Elemento de vaso (Ev)

Figura 21 – Seção transversal da camada cambial das árvores de eucalipto dos 6 tratamentos de nutrição e de disponibilidade hídrica no período chuvoso e seco. Barra = 100 μ m

A análise quantitativa (Figura 22) indicou que a (i) maior atividade cambial do tronco das árvores ocorreu no período de maior índice pluviométrico (200 mm/mês), maior temperatura média (20°C) e a (ii) menor atividade cambial no período de menor índice pluviométrico (25 mm/mês) e menor temperatura média (15°C).

No tronco das árvores submetidas aos tratamentos com redução de chuva, verificou-se, na camada cambial, um menor número de células e menor largura da camada de células, em relação aos tratamentos sem a redução de chuva. Tal situação reflete a sazonalidade do incremento do diâmetro do tronco, conforme o resultado da mensuração com os dendrômetros (Figura 15 A).

As árvores, submetidas à adubação potássica e 100% de disponibilidade hídrica (K/+A), no período chuvoso (janeiro de 2012), apresentaram a camada cambial com o maior número e largura de células, em fase de diferenciação, quando comparadas com o período de déficit hídrico (julho de 2012). Tais resultados corroboram com os encontrados na avaliação do diâmetro do tronco com os dendrômetros (Figura 15 A).

A periodicidade da atividade do câmbio resulta no crescimento em diâmetro do tronco, influenciada pela alteração da temperatura, comprimento do dia e precipitação pluviométrica, além de fatores endógenos inerentes a cada espécie, controlando o seu ritmo de crescimento (MARCATI, 2006). Desta forma, o estímulo do crescimento do tronco das árvores se deve à ação de hormônios e carboidratos que, ao deslocar-se no sentido do fluxo no floema, propiciam maior taxa de divisão das células cambiais. O fluxo do floema foi constatado por Battie-Laclau (2013), onde a adubação potássica refletiu no aumento da fotossíntese líquida e da condutância estomática das folhas adultas, da estação chuvosa para a seca, resultado em maior valor de incremento do diâmetro do tronco.

A disponibilidade hídrica e outros fatores relacionados ao clima promovem significativas alterações no ritmo do incremento do diâmetro do tronco e nas características do lenho (DREW et al., 2009, 2010; SETTE Jr., 2010). Em árvores de clones de eucalipto, cultivadas na Austrália, Drew e Pammenter (2007) observaram o aumento do diâmetro do tronco e da atividade cambial com a maior disponibilidade de água; Drew et al. (2009) reiteraram que esses parâmetros do crescimento são, da mesma forma, fortemente regulados pela temperatura. Wimmer et al. (2002), Laclau et al. (2005), Drew et al. (2008) e Sette Jr. et al. (2010) demonstraram correlação entre a taxa de incremento do tronco das árvores de eucalipto com a precipitação e

a temperatura, concluindo que essas variáveis induzem ao aumento da taxa de fotossíntese e, na sequência, da atividade cambial. Nesse aspecto, na avaliação de árvores de *Abies balsamea*, de seis anos, com 65 a 80% de redução de chuva, no período de dois anos, D'Orangeville et al. (2013) verificaram que o estresse hídrico ocasionou um atraso de mais de uma semana no início do processo de diferenciação dos derivativos cambiais, em relação aos tratamentos sem redução de chuva.

Os eventos fenológicos nas árvores estavam associados à sazonalidade da atividade cambial, em todos os tratamentos, como: (i) perda parcial das folhas e menor área foliar, principalmente, nos ramos basais do tronco, no período de estresse hídrico e de menor atividade cambial; (ii) desenvolvimento de novas folhas e maior área foliar, no período de maior atividade cambial e de excedente hídrico.

Avaliando o potencial hídrico foliar e o índice de área foliar das árvores de eucalipto, Battie-Laclau (2013) concluiu que a variação sazonal do potencial hídrico foliar relaciona-se com a variação da precipitação, com menor valor, no período seco (junho a setembro de 2011); nos tratamentos com redução de chuva, o efeito foi mais drástico. A fertilização potássica influenciou o estado hídrico das folhas, indicando um menor valor do potencial hídrico, quando comparado com o tratamento controle, resultando num maior déficit hídrico foliar.

Da mesma forma, Battie-Laclau (2013) verificou que o índice de área foliar variou com a sazonalidade da precipitação, durante o período de déficit hídrico de 2011 e 2012 (16º e 27º mês, após o plantio). Nesse período, houve uma redução de 17% e 20% do índice para as árvores submetidas aos tratamentos, com e sem aplicação de K, respectivamente, em relação ao período de excedente hídrico (11º e 24º mês, após o plantio). A autora concluiu que a adubação potássica influenciou outros mecanismos fisiológicos, como o aumento da área foliar individual e total, duração da vida foliar, tamanho e turgescência foliar, espessura foliar e espaço intercelular no mesófilo foliar, capacidade fotossintética, condutância dos estômatos e do mesófilo, além da exportação dos fotoassimilados produzidos nas folhas-fontes. Comprova-se, desta forma, que a fenologia das árvores de eucalipto, principalmente as mudanças foliares, está relacionada com a atividade cambial do tronco.

As árvores de *E. grandis* não perdem totalmente as folhas em relação às caducifólias, respondendo mais prontamente à reativação do câmbio, favorecendo o crescimento do tronco. Face à disponibilidade de água no solo, as árvores de

eucalipto não precisam deslocar os recursos energéticos recém-produzidos pela fotossíntese para a ativação dos meristemas vegetativos e formação de novas folhas; com maior eficiência, destinam a seiva orgânica (hormônios + carboidratos) para induzir maior taxa de divisão cambial e, conseqüentemente, maior crescimento em diâmetro do tronco.

Os resultados de pesquisas com árvores tropicais, realizadas no Brasil e outros países, (AMOB, 1973; DAVE; RAO, 1982; WORBES, 1985; VENUGOPAL; KRISHNAMURTHY, 1987; RAO, 1988; SIDDIQI, 1991; BORCHERT, 1999 apud MARCATI, 2000; SILVA et al., 1991; CARDOSO, 1991) relacionam o início da atividade do câmbio vascular com a fenologia (desenvolvimento de novas folhas) e o início da estação chuvosa. A dormência do câmbio está relacionada com a queda das folhas, no início da estação seca, de acordo com os resultados obtidos com árvores de eucalipto do estudo em questão.

A interação entre os nutrientes minerais com as variáveis climáticas e com o crescimento cambial do tronco é complexa, sendo necessária a análise dos princípios e fundamentos da fisiologia florestal.

Figura 22 – Avaliação da camada cambial das árvores de eucalipto em dois períodos: janeiro/com chuva e julho/com seca de 2012. (A) número e (B) espessura da camada de células do xilema em diferenciação, sem o espessamento da parede secundária; (C) número e (D) espessura da camada das células fusiformes da camada cambial

5.3 Propriedades físicas do lenho

5.3.1 Densidade básica do lenho

Para a densidade básica do lenho, no primeiro e segundo anos de plantio, não se verificaram diferenças entre os tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica) (Tabela 6, Figura 23). A ausência de diferenças está associada à idade e atividade cambial das árvores, formando um tronco com lenho homogêneo e com características de juvenilidade. No lenho das três idades avaliadas, nos tratamentos submetidos à nutrição controle, com e sem redução de chuva, o valor da densidade básica foi maior em comparação às árvores dos tratamentos submetidos à adubação sódica e potássica, independente da disponibilidade hídrica. Recomenda-se a avaliação da densidade básica do lenho das árvores, em idades mais avançadas, a fim de determinar as fases de formação da madeira juvenil-transição-adulta.

Tabela 6 – Valor médio da densidade básica ponderada do lenho, nas três idades analisadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Tratamento	Densidade básica ponderada (g/cm ³)		
	12 meses	24 meses	36 meses
C/+A	0,385 a (0,01)	0,407 a (0,01)	0,462 b (0,01)
Na/+A	0,355 a (0,02)	0,367 a (0,01)	0,416 a (0,02)
K/+A	0,364 a (0,01)	0,388 a (0,01)	0,439 ab (0,04)
C/-A	0,379 a (0,01)	0,409 a (0,01)	0,453 b (0,02)
Na/-A	0,362 a (0,01)	0,399 a (0,01)	0,438 ab (0,02)
K/-A	0,365 a (0,03)	0,370 a (0,05)	0,435 ab (0,02)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Figura 23 – Densidade básica ponderada do lenho, nas três idades avaliadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Os valores de densidade básica do lenho das árvores de eucalipto, encontrados no presente trabalho, são menores do que os citados por Kollmann e Côte (1968); Souza et al. (1986); Lima et al. (1992); Mallan e Hoon (1992); Alzate et al. (2005); Trevisan et al. (2008, 2012), Gonçalves et al. (2009) e Moutinho (2012). Tal diferença pode ser associada, dentre outros fatores, à idade das árvores. O modelo de variação de densidade básica mais comum reportado na literatura indica o aumento da densidade do lenho com a idade das árvores, face às mudanças das células cambiais e à formação da madeira adulta (TOMAZELLO FILHO, 1985b, 1987).

Os valores e modelos de variação da densidade do lenho com a fertilização mineral mostram que a aceleração do ritmo de crescimento pode aumentar a densidade básica (DOWNES et al., 1997; VIGNERON; GERARD; BOUVET, 1995). Esse resultado não é unânime, no entanto, em árvores de eucalipto, pois tratamentos que aumentam o volume do lenho podem, da mesma forma, reduzir a sua densidade (DEBELL et al., 2001; LIMA, 2005).

A relação da densidade do lenho com a disponibilidade hídrica corrobora os resultados de Oliveira et al. (2010), já citados anteriormente. Os autores associam as diferenças de densidade na taxa de crescimento, onde a densidade tem sido uma característica amplamente estudada como um parâmetro de qualidade da madeira; na maioria das espécies, existe a tendência de diminuição da densidade com o aumento da taxa de crescimento (BERGER, 2000).

A densidade do lenho das árvores está relacionada com as características edafoclimáticas e fisiográficas do sítio; em áreas de maior pluviosidade (ou de períodos de maior pluviosidade), existe a tendência de uma maior atividade cambial das árvores, com um aumento do seu crescimento e formação de fibras de parede delgada e vasos de maior diâmetro, bem como lenho de menor densidade. Da mesma forma, verifica-se que, em áreas ou período do ano de menor pluviosidade, o tronco é caracterizado por um crescimento mais lento, formando lenho com fibra de parede espessa, vasos de menor diâmetro e de maior densidade.

Tendência similar foi relatada por Albino (1983) para a densidade básica do lenho de doze espécies de eucalipto, sendo o menor valor encontrado no tronco das árvores de maior crescimento. Ribeiro e Zani Filho (1993) encontraram maior densidade básica do lenho de espécies/procedências de eucalipto, em Itararé, Estado de São Paulo, em condições edafoclimáticas menos favoráveis. Bouriaud et

al. (2005) verificaram um aumento da densidade básica e a formação de anéis de crescimento falsos no lenho de árvores de *Picea abies* em condições de déficit hídrico.

Outros autores, como Downes et al. (2004) e Wimmer et al. (2002), demonstraram que a densidade da madeira de árvores de *E. nitens* diminui com o aumento da disponibilidade de água. Em árvores de *E. globulus*, em sítio irrigado e não irrigado, Drew et al. (2009) verificaram um aumento significativo da densidade do lenho em resposta à diminuição da disponibilidade de água; com a irrigação contínua, a densidade foi significativamente mais homogênea. Sansígolo e Ramos (2011), avaliando árvores de *E. grandis*, com quatro anos de idade, em três solos de diferentes fertilidades, obtiveram maior valor de densidade da madeira e da casca, em solos de menor fertilidade.

A densidade básica do lenho das árvores de eucalipto, na produção de celulose e papel, de acordo com Shimoyama (1990), afeta o rendimento e o custo de produção da polpa. Segundo sua análise, o lenho de maior densidade básica implica em aumento da massa em relação à capacidade do digestor, com consequente aumento do rendimento gravimétrico; por outro lado, o lenho de elevada densidade básica dificulta o processo de transformação, gerando cavacos de madeira de maior dimensão, maior consumo de reagentes, afetando a impregnação do lenho e, consequentemente, produzindo maior quantidade de rejeitos no processo de polpação. A faixa de densidade básica da madeira de eucalipto recomendada na produção de celulose de fibra curta varia de 0,45 a 0,55 g/cm³ (BARRICHELO et al., 1976).

A análise da variância detectou diferença apenas para o fator nutrição no 12º e 36º mês, após o plantio. Não foi verificada diferença para nenhum dos fatores analisados (nutrição e disponibilidade hídrica), nem para a interação, no 24º mês após o plantio. Os resultados indicaram que a densidade do lenho das árvores não foi afetada no 36º mês pela redução da precipitação (Tabela 7). As árvores de eucalipto, submetidas à adubação potássica e sódica, formaram um lenho de densidade básica equivalente; a literatura, no entanto, reporta a redução ou aumento da densidade do lenho das árvores, com a aplicação de fertilizantes.

Tabela 7 – Densidade básica ponderada do lenho nas três idades avaliadas, por tratamento (nutrição e de disponibilidade hídrica)

Tratamento	Densidade básica ponderada (g/cm ³)		
	12 meses	24 meses	36 meses
Controle	0,382 b (0,01)	0,408 a (0,01)	0,457 b (0,02)
Na	0,359 a (0,02)	0,383 a (0,02)	0,426 a (0,02)
K	0,364 ab (0,02)	0,379 a (0,04)	0,437 a (0,03)
100%	0,368 a (0,02)	0,387 a (0,02)	0,438 a (0,03)
66%	0,369 a (0,02)	0,393 a (0,03)	0,442 a (0,02)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

As árvores de eucalipto nas três idades analisadas apresentaram um aumento significativo da densidade básica do seu tronco do 12º para o 36º mês, independente dos tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica) (Tabela 8). Os resultados observados corroboram com os reportados na literatura (VITAL et al., 1984; TOMAZELLO FILHO, 1985b; TRUGILHO et al., 1996; CRUZ, 2000; SILVA et al., 2004), em função da alteração do câmbio e do lenho, decorrente do aumento da espessura da parede das fibras e da frequência/redução dos vasos, bem como das exigências biomecânicas do tronco das árvores.

Tabela 8 – Valor médio da densidade básica ponderada do lenho nas três idades analisadas

Idade (meses)	Densidade básica lenho (g/cm ³)
12	0,368 a (0,02)
24	0,393 b (0,03)
36	0,440 c (0,03)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

A variação da densidade básica do lenho ao longo do sentido longitudinal do tronco no 36º mês, após o plantio, nos seis tratamentos, indicou um mesmo padrão de variação de densidade básica, independente do tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica). O padrão de variação caracteriza-se pelo decréscimo da base até o DAP (0,38-0,41→0,36-0,39 g/cm³) e, a partir daí, um aumento até o topo (0,41-0,37→0,39-0,43 g/cm³) (Figura 24). Esse modelo de variação é descrito por inúmeros autores, como Lopes (2003); Alzate et al. (2005); Calvo et al. (2006); Sette Júnior (2007, 2010); Lopes et al. (2011); Omonte e Valenzuela (2011), Trevisan et al. (2012) e Moutinho (2012). A maior densidade básica do lenho na base do tronco das árvores se deve à exigência mecânica de sua sustentação e, no topo, pelo tipo/ângulo de inserção dos ramos na copa e a ação dos ventos, conforme Barrichelo et al. (1983), Sette Júnior (2007, 2010), Trevisan et al. (2012).

Figura 24 - Variação da densidade básica do lenho, no 36º mês, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

5.3.2 Densidade aparente do lenho

A densidade aparente do lenho no DAP, no primeiro e segundo ano de avaliação não apresentou diferenças entre os tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica), exceto para o tratamento C/+A, no 12º mês. No 12º mês, após o plantio, a densidade aparente do lenho foi maior nos tratamentos submetidos à nutrição controle, com e sem chuva, seguida dos tratamentos submetidos à aplicação de K e Na, independente da disponibilidade hídrica. No 24º mês, após o plantio, verificou-se a mesma tendência entre os tratamentos, embora, os valores fossem mais homogêneos entre si. No 36º mês, após o plantio, observou-se a mesma tendência entre os tratamentos, com maior valor nos tratamentos submetidos à nutrição controle, com e sem redução de chuva, embora, estatisticamente se mostrasse similar ao tratamento K/-A (Tabela 9, Figura 25).

A densidade aparente mínima e máxima do lenho, nos dois primeiros anos de avaliação, nos seis tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica), não apresentaram diferenças estatísticas. Os valores variaram de 0,19 a 0,39 g/cm³ e 0,61 a 0,82 g/cm³ para densidade aparente mínima e máxima, respectivamente. Tal variação indica regiões do lenho com fibras de parede mais/menos espessa e de maior/menor frequência de vasos, detectadas pelo método da densitometria de raios X, com leitura a cada 50 µm.

Tabela 9 – Densidade aparente média, máxima e mínima do lenho, nas três idades analisadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Densidade aparente (g/cm ³)				
Tratamento	Idade (meses)	Média	Máximo	Mínimo
C/+A	12	0,49 b (0,04)	0,73 a (0,06)	0,33 a (0,06)
Na/+A		0,42 a (0,04)	0,66 a (0,11)	0,25 a (0,05)
K/+A		0,43 ab (0,03)	0,63 a (0,04)	0,27 a (0,05)
C/-A		0,41 a (0,02)	0,66 a (0,05)	0,24 a (0,05)
Na/-A		0,37 a (0,05)	0,60 a (0,05)	0,19 a (0,08)
K/-A		0,41 a (0,03)	0,62 a (0,02)	0,25 a (0,07)
C/+A	24	0,48 a (0,01)	0,65 a (0,04)	0,35 a (0,01)
Na/+A		0,45 a (0,01)	0,61 a (0,04)	0,30 a (0,06)
K/+A		0,45 a (0,02)	0,62 a (0,02)	0,30 a (0,06)
C/-A		0,48 a (0,01)	0,65 a (0,02)	0,33 a (0,02)
Na/-A		0,46 a (0,02)	0,68 a (0,02)	0,31 a (0,03)
K/-A		0,46 a (0,01)	0,67 a (0,08)	0,31 a (0,02)
C/+A	36	0,54 b (0,01)	0,72 a (0,04)	0,39 b (0,01)
Na/+A		0,50 a (0,01)	0,71 a (0,04)	0,36 b (0,06)
K/+A		0,50 a (0,02)	0,82 a (0,02)	0,28 a (0,06)
C/-A		0,55 b (0,01)	0,76 a (0,02)	0,37 b (0,02)
Na/-A		0,52 ab (0,02)	0,79 a (0,02)	0,34 ab (0,03)
K/-A		0,54 b (0,01)	0,80 a (0,08)	0,34 ab (0,02)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Figura 25 – Densidade aparente média do lenho, nas três idades analisadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

A densidade aparente média do lenho de eucalipto no 12º, 24º e 36º mês foi inferior à mencionada para o gênero, por inúmeros autores, utilizando a mesma metodologia. As diferenças se devem, possivelmente, à idade das árvores, associada à formação de madeira juvenil-adulta (DELLA LUCIA; VITAL, 1980; CARVALHO, 1997; ACOSTA, 1998; LIMA, BREESE; CAHALAN, 2000; ASHLEY; OZARSKA, 2000; ROCHA, 2000; SILVA, 2002; SILVA et al., 2004; ALZATE, 2004; BENJAMIN, 2006; TOMAZELLO FILHO, 2006; HENRIQUES, 2012; OLIVEIRA et al., 2011, 2012). As pesquisas referentes ao efeito de fertilizantes minerais nas propriedades da madeira de árvores de eucalipto, em idades avançadas (até trinta anos), indicam o aumento (VIGNERON et al., 1995; BOUVET et al., 1999) e a

redução (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989; WASHUSEN et al., 2005) da densidade do lenho. Em árvores jovens (1 a 4 anos de idade) de eucalipto, destacam-se os resultados de Bamber et al. (1982), Pereira e Araújo (1990), Sette Júnior (2007, 2010) e Sette Júnior et al. (2009), que não verificaram efeito significativo da fertilização mineral na densidade aparente do lenho, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho.

A análise da variância no 12º e 36º mês após o plantio, apresentou diferença entre os tratamentos para a nutrição e para a disponibilidade hídrica, embora não se observasse interação significativa entre os dois fatores. No 24º mês após o plantio, verificou-se diferença apenas para o fator nutrição. Em resumo, a nutrição mineral influenciou a densidade aparente do lenho das árvores de eucalipto no 12º, 24º e 36º mês, enquanto a disponibilidade hídrica manifestou-se no 12º e 36º mês.

O teste de médias para a densidade aparente do lenho, em relação aos tratamentos de nutrição, indicou que a aplicação de K e Na resultou na homogeneidade da densidade aparente, a exemplo do obtido para a densidade básica. O lenho das árvores de eucalipto no tratamento controle apresentou um valor de densidade aparente mais alto, seguindo-se dos tratamentos com aplicação de K e Na (Tabela 10). Embora a literatura indique a possibilidade de redução ou aumento da densidade do lenho das árvores de eucalipto, pela aplicação de fertilizantes, o presente trabalho verificou, apenas, a redução da densidade aparente.

Em relação ao tratamento de disponibilidade hídrica, quando analisado de forma isolada, verificou-se que a densidade aparente média do lenho, no 12º e 24º mês, após o plantio, ocorreu de maneira similar à observada na avaliação conjunta (nutrição e disponibilidade hídrica). No 36º mês, após o plantio, o tratamento com redução de chuva apresentou maiores valores de densidade aparente.

Tabela 10 – Densidade aparente média do lenho, nas três idades, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Tratamento	Densidade aparente média (g/cm³)		
	12 meses	24 meses	36 meses
Controle	0,46 b (0,06)	0,48 b (0,01)	0,54 b (0,01)
Na	0,39 a (0,05)	0,46 a (0,01)	0,51 a (0,02)
K	0,42 ab (0,03)	0,46 a (0,02)	0,52 a (0,03)
100%	0,45 b (0,05)	0,46 a (0,01)	0,52 a (0,02)
66%	0,40 a (0,04)	0,46 a (0,02)	0,54 b (0,02)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

O perfil radial da densidade por densitometria de raios X apresenta respostas do crescimento em diâmetro do tronco nos tratamentos, relacionando-se com a formação de faixas de lenho de menor e maior densidade. A precisão da metodologia, com leitura a cada 50 μm , possibilita a avaliação de regiões do lenho de menor atenuação (fibras de parede delgada, maior frequência/diâmetro dos vasos) e maior atenuação dos raios X (fibras de parede espessa, menor frequência/diâmetro dos vasos). Dessa forma, identificou-se a formação do primeiro anel de crescimento no lenho das árvores de eucalipto no 24º mês de idade, indicativa da idade cambial (Figura 26).

A maior variação da densidade aparente foi verificada na região do lenho correspondente a 85 a 100% do raio, referente ao incremento do diâmetro do tronco das árvores no 24º e 36º mês, após o plantio, nos tratamentos de redução da chuva. Independente do tratamento de nutrição, as árvores sob estresse hídrico induzido apresentaram maior variação da densidade aparente do lenho.

O modelo de variação radial da densidade aparente do lenho, nas três idades, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica), caracterizou-se pelo seu menor valor na região próxima da medula (0,35-50 g/cm^3), com aumento e estabilização na região mediana (0,50-0,55 g/cm^3), seguindo-se de um aumento, próximo à casca (0,55-0,70 g/cm^3). Essa variação indica, de modo geral, as seguintes conclusões: (i) aumento da densidade do lenho no sentido medula-casca; (ii) caracterização da madeira juvenil e (iii) variação intra e inter-anual da densidade nas zonas fibrosas, de coloração variada. A alternância de coloração clara e escura do lenho, de acordo com Tomazello Filho (2006), caracteriza a resposta da atividade cambial à sazonalidade das variáveis ambientais (temperatura, precipitação, luminosidade, etc.), com reflexo na anatomia e na qualidade do lenho.

O perfil densitométrico das árvores de eucalipto, nas três idades avaliadas, apresentou diferenças com os observados em árvores adultas, de acordo com Ferraz e Tomazello Filho (1978); Rezende e Ferraz (1985); Coutinho e Ferraz (1998); Oliveira (1997), Silva (2002), Silva et al. (2004), Alzate (2004), Benjamin (2006) e Tomazello Filho (1985, 2006); Sette Júnior (2007, 2010); Tomazello Filho et al. (2008); Sette Júnior et al. (2009); Oliveira et al. (2012); Couto et al. (2012) e Ferreira (2013). Essas diferenças se devem, possivelmente, às diferenças de idade, material genético, local de crescimento, entre outros.

A avaliação contínua da formação do lenho nas árvores de eucalipto possibilitará avaliar, com precisão, as alterações na estrutura anatômica e densidade, os efeitos da fertilização de K e Na, frente à restrição hídrica, bem como a caracterização da madeira para diferentes usos.

Figura 26 - Perfil radial da densidade aparente do lenho no DAP, aos 36 meses de idade, por tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica)

A regressão múltipla avaliou a relação entre a densidade média do lenho e as demais componentes: densidade máxima e mínima, bem como a sua ordem de importância, considerando os valores médios por posição radial nas três idades analisadas, como repetição.

Os resultados indicaram que, no primeiro ano de idade, a densidade mínima, compôs o modelo de regressão (Equação 7), que explicou 84% da variação da densidade aparente média; tal componente foi responsável por 88,4% da variação total. No segundo ano de idade, a densidade mínima, também, compôs o modelo de regressão (Equação 8), que explicou 64% da variação total da densidade aparente média do lenho; tal componente foi responsável por 74,8% da variação. No terceiro ano de idade, a densidade mínima compôs o modelo de regressão, explicando 49% da variação total da densidade aparente média do lenho (modelo de regressão, Equação 9), sendo responsável por 48% da variação total (Tabela 11).

$$D_{\text{média}} = 0,092 + 0,582 \cdot D_{\text{mín}} \quad (7)$$

$$D_{\text{média}} = 0,269 + 0,355 \cdot D_{\text{mín}} \quad (8)$$

$$D_{\text{média}} = 0,459 + 0,199 \cdot D_{\text{mín}} \quad (9)$$

Tabela 11 – Análise da regressão múltipla da densidade aparente média (variável dependente) e seus componentes: densidade máxima e mínima (variáveis independentes), baseada no valor médio, por posição radial no lenho nas três idades analisadas

Passos	Idade	Dmín	Dmáx	R ²
1	12	80,2	28,2	0,77
2		88,4	--**	0,84
1	24	67,2	34,8	0,54
2		74,8	--**	0,64
1	36	53,3	28,1	0,56
2		48	--**	0,49

* Os valores colocados abaixo das variáveis independentes são os coeficientes estandarizados (betas), expressos em porcentagem e representam a proporção com que cada variável contribui para a determinação da variável dependente, explicada pela regressão; --** Indica que a variável independente se manifestou NS (não significativa) para o nível de probabilidade de $\alpha=0,05$

5.4 Avaliação macroscópica da seção transversal do lenho

Na análise macroscópica do lenho, na seção transversal do DAP, das três idades analisadas, não foi possível evidenciar regiões distintas de cerne e alborno, devido à juvenilidade do material (Figuras 27, 28 e 29). Faixas de crescimento na seção transversal do lenho, no entanto, foram visualizadas, no 24º e 36º mês, nos tratamentos submetidos à redução de chuva, principalmente, para os tratamentos Na/-A e K/-A. Tais faixas de crescimento distintas no lenho são caracterizadas

anatomicamente pela formação de regiões de fibra de parede celular mais espessa e vasos de menor diâmetro. Como as árvores submetidas à redução de chuva são mais sensíveis às variações de precipitação, não foi possível determinar, com clareza, a anuidade do anel.

Para a determinação da anuidade da formação dos anéis de crescimento em árvores de eucalipto, Arizapana-Almocinad (2013) indicou realização de injúrias cambiais no lenho; o processo de cicatrização, por sua vez, forma um tecido traumático de coloração escura, que possibilita a sua datação.

Brookhouse (2006) afirma que a formação e a demarcação dos anéis de crescimento no lenho das árvores de eucalipto são influenciadas pela variação da disponibilidade hídrica das estações do ano, que afetam a atividade cambial, formando os anéis de crescimento e reduzindo o crescimento em diâmetro do tronco. Nesse aspecto, Argent et al. (2004) relatam que a variação sazonal da disponibilidade de água no solo induz, da mesma forma, à formação de anéis de crescimento anuais no lenho das árvores de eucalipto. Arizapana-Almocinad (2013) observou anéis de crescimento distintos no lenho de árvores de *E. urophylla*, de oito anos de idade, na região de Itamarandiba, MG, caracterizada pela variação significativa de precipitação. A anuidade da formação dos anéis de crescimento foi comprovada pelas injúrias cambiais, em consequência da retirada da casca para a aplicação do *Pylodin*.

A análise da imagem do lenho, através da exposição da seção transversal do DAP, em equipamento de raios X digital, permitiu a identificação de regiões com variações de densidade, em diferentes tonalidades de escala de cinza. (Figuras 24, 25 e 26). No lenho das árvores de eucalipto, no 24º e 36º mês de idade, detectaram-se regiões características dos anéis de crescimento com tonalidade mais clara (indicativas de maior densidade, maior atenuação dos raios X, fibras de parede espessa, menor lume e vasos de menor diâmetro) e escura (menor densidade, menor atenuação dos raios X, fibras de parede delgada e vasos de maior diâmetro).

Da mesma forma, na região da medula do lenho das árvores de eucalipto, nas três idades, a tonalidade cinza claro indica maior atenuação à passagem dos raios X, possivelmente, pela presença de amido e/ou cristais nas células do parênquima, atingindo valores de 0,70-0,85 g/cm³ de densidade (SETTE JUNIOR et al., 2009).

A possibilidade de diferenciação, demarcação, contagem e mensuração da largura dos anéis de crescimento, através da imagem digital do lenho das árvores,

exposta nos raios X, ressalta a importância dessa ferramenta para os estudos de dendrocronologia.

Cherubini et al. (2013), em estudo de datação os anéis de crescimento de árvores de oliveira, na região do Mediterrâneo, verificou que a demarcação dos anéis de crescimento, através dos raios X digital, não foi suficiente para a definição de sua anuidade; para tanto, necessitou da aplicação de técnicas de dendrocronologia, como o “cross-dating”.

Mannes et al. (2007), comparando a microdensitometria de raios X com imagens digitais radiográficas do lenho de árvores de abetos, indicaram semelhanças entre os resultados dos dois métodos; enquanto a densitometria de raios X propicia uma leitura linear da seção transversal do lenho, a imagem digital permite avaliar toda a sua seção transversal; sugere-se, dessa forma, a aplicação conjunta das duas metodologias para a análise dos anéis de crescimento e densidade da madeira.

A análise da imagem pela aplicação do corante “*Dimethyl yellow*” na seção transversal do DAP, possibilitou a delimitação da região do xilema funcional (alburno) e não funcional (cerne). Usualmente, a análise visual da seção transversal do lenho de árvores jovens, sem a aplicação de corantes específicos, não permite a visualização das regiões do cerne, em fase inicial de formação, e do alburno. O corante, que é um indicador de acidez, através de sua reação com as substâncias presentes na formação do cerne (ácidos, taninos etc.), possibilita a delimitação das regiões do xilema não funcional, com tonalidade vermelho-róseo, indicativo do pH mais baixo; as regiões do xilema funcional, por sua vez, apresentam a tonalidade amarelada, indicativa de pH mais alto.

Com a aplicação do corante na seção transversal do lenho das árvores do primeiro e segundo anos de plantio, constatou-se a tonalidade amarelada, indicativa da inexistência ou baixa quantidade de substâncias produzidas pelo cerne. No terceiro ano, após o plantio, as árvores de eucalipto, submetidas ao tratamento com adubação potássica e redução de chuva (K/-A), apresentaram tonalidade vermelho-róseo na região interna do lenho, no entorno da medula, indicativa da impregnação das substâncias do cerne. A análise química do lenho das árvores de eucalipto do tratamento K/-A no 36º mês (item 5.7) comprova o maior teor de extrativos totais, que reagiram com indicador *Dimethyl yellow*.

Trat.	Imagem polida/escaneada	Imagem de raios X digital	Imagem de corante/indicador
C/+A
Na/+A
K/+A
C/-A
Na/-A
K/-A

Figura 27 – Seção transversal do lenho das árvores – 12^o mês. Barra = 1 cm

Figura 28 – Seção transversal do lenho das árvores – 24º mês. Barra = 1 cm

Figura 29 – Seção transversal do lenho das árvores – 36º mês. Barra = 1 cm

5.5 Composição química do lenho

Os resultados da análise de composição química do lenho das árvores aos 36 meses de idade, avaliando os tratamentos de nutrição e disponibilidade hídrica (Tabelas 12 e 13), demonstraram, de maneira geral, que a aplicação de K é o fator determinante na biossíntese dos extrativos totais em relação aos demais tratamentos.

Tabela 12 - Composição química das amostras dos lenho aos 36 meses avaliadas por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Tratamento	Análise de composição química (%)				
	Extrativos Totais	Lignina Klason Residual	Lignina Klason Solúvel	Lignina Klason Total	Holocelulose
C/+A	1,42 a (0,99)	24,61 a (0,80)	2,41 b (0,29)	27,00 a (0,54)	73,22 a (0,47)
Na/+A	1,70 ab (0,19)	24,47 a (0,77)	2,27 ab (0,09)	26,86 a (0,72)	73,14 a (0,72)
K/+A	1,55 a (0,80)	24,64 a (0,39)	2,27 ab (0,03)	26,73 a (0,40)	73,62 ab (0,47)
C/-A	1,18 a (0,76)	24,04 a (1,03)	2,08 a (0,05)	26,05 a (1,13)	74,12 ab (0,97)
Na/-A	1,75 ab (0,13)	23,83 a (0,37)	2,32 ab (0,03)	26,12 a (0,64)	74,06 ab (0,41)
K/-A	2,77 b (0,76)	23,68 a (0,54)	2,23 ab (0,07)	25,87 a (0,62)	74,47 b (0,56)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

O lenho das árvores de eucalipto, submetidas ao tratamento com adubação potássica e redução de chuva (K/-A), apresentou o maior teor de extrativos totais e de holocelulose; em árvores com idade mais avançada, tal situação deverá ser avaliada, quando a madeira for destinada à fabricação celulose, pela maior demanda de reagentes, afetando o rendimento em polpa e quantidade de sólidos (SEGURA, 2012).

Tabela 13 - Composição química das amostras do lenho aos 36 meses avaliada por tratamento de nutrição

Tratamento	Análise de composição química (%)				
	Extrativos Totais	Lignina Klason Residual	Lignina Klason Solúvel	Lignina Klason Total	Holocelulose
Controle	1,30 a (0,84)	24,33 a (0,93)	2,25 a (0,27)	26,52 a (0,98)	73,67 a (0,86)
Na	1,73 ab (0,22)	24,06 a (0,73)	2,30 a (0,17)	26,49 a (0,75)	73,60 a (0,73)
K	2,16 c (0,84)	24,15 a (0,67)	2,25 a (0,12)	26,30 a (0,67)	74,04 a (0,66)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna**, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

O teor de extrativos no lenho, no 36º mês, após o plantio, sob o efeito da disponibilidade hídrica, não mostrou diferença significativa; para a lignina residual e total, bem como para a holocelulose houve diferença significativa no lenho, com e sem redução de chuva, indicando a influência da disponibilidade hídrica (Tabela 14).

Tabela 14 - Composição química das amostras do lenho aos 36 meses, avaliada por tratamento de disponibilidade hídrica

Tratamento	Análise de composição química (%)				
	Extrativos Totais	Lignina Klason Residual	Lignina Klason Solúvel	Lignina Klason Total	Holocelulose
100%	1,56 a (0,70)	24,57 b (0,64)	2,32 a (0,22)	26,86 b (0,55)	73,33 a (0,57)
66%	1,90 a (0,81)	23,79 a (0,69)	2,21 a (0,16)	26,01 a (0,79)	74,21 b (0,67)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Nas árvores de eucalipto, o teor dos componentes químicos encontrados no lenho jovem (36º mês) e em fase inicial do processo de formação do cerne foi menor do que o relatado na literatura, por diversos autores (SILVA, 2002; GOMIDE et al., 2005; DUARTE, 2006 apud SEGURA, 2012). As diferenças detectadas se devem, provavelmente, às idades do material analisado. Desta forma, a avaliação contínua das alterações químicas do lenho das árvores de eucalipto permite verificar a interação do K e Na com a disponibilidade hídrica, bem como a preconização do uso futuro da madeira (energia, celulose e papel, painéis etc) (TRUGILHO et al., 1996, SEGURA, 2012).

5.6 Características anatômicas do lenho

5.6.1 Dimensões de fibras

Os resultados dos valores médios das dimensões das fibras do lenho no DAP, nas três idades, nos seis tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica) estão apresentados na Tabela 15 e Figura 30.

Tabela 15 – Dimensão das fibras do lenho nas três idades, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Tratamento	Idade	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Diâmetro do lume (μm)	Espessura da parede (μm)
C/+A	12	745,86 a (93,37)	14,04 ab (2,77)	10,12 a (2,03)	1,92 ab (0,30)
Na/+A		703,85 a (99,37)	14,62 ab (2,50)	11,38 ab (2,11)	1,76 a (0,29)
K/+A		748,73 a (107,81)	12,68 a (1,95)	10,01 a (2,30)	2,02 abc (0,38)
C/-A		626,35 a (112,51)	13,54 ab (1,82)	10,42 a (2,51)	2,23 c (0,37)
Na/-A		722,34 a (121,02)	15,64 b (2,41)	12,67 b (2,29)	2,08 bc (0,35)
K/-A		747,69 a (98,22)	13,73 ab (1,96)	11,79 ab (2,02)	2,07 bc (0,34)
C/+A	24	815,98 a (124,16)	14,38 ab (2,13)	11,44 a (2,48)	2,20 a (0,40)
Na/+A		878,76 ab (114,71)	14,97 b (2,08)	12,02 a (1,75)	2,13 a (0,32)
K/+A		933,80 b (126,45)	13,82 ab (1,81)	11,94 a (1,95)	2,04 a (0,31)
C/-A		859,37 ab (120,84)	13,68 a (1,90)	11,05 a (1,78)	2,09 a (0,40)
Na/-A		845,83 ab (120,98)	14,55 ab (2,20)	12,84 a (2,31)	2,06 a (0,45)
K/-A		897,86 ab (120,02)	13,91 ab (2,04)	11,87 a (2,22)	2,06 a (0,38)
C/+A	36	860,31 a (115,16)	19,46 ab (3,71)	11,64 a (3,29)	3,91 a (0,60)
Na/+A		988,07 b (102,71)	21,26 bc (4,31)	13,30 bc (3,47)	3,98 a (0,78)
K/+A		1048,52 d (136,45)	18,16 a (3,57)	12,87 ab (2,97)	3,71 a (0,61)
C/-A		882,21 a (119,77)	21,39 c (3,77)	13,58 bc (3,51)	3,90 a (0,54)
Na/-A		990,27 bc (125,48)	22,16 c (4,05)	14,42 bc (3,47)	3,87 a (0,54)
K/-A		1037,27 cd (130,90)	22,16 c (3,69)	14,74 c (3,46)	3,72 a (0,47)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Figura 30 – Dimensão das fibras do lenho nas três idades, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Os maiores comprimentos de fibra do lenho das árvores, submetidas aos tratamentos com adubação potássica, sem e com redução de chuva, no 12º, 24º e 36º mês, foram de 748,73-747,69, 933,80-897,86 e 1048,52-1037,27 μm, respectivamente. Não houve diferença significativa para os tratamentos, no 12º mês, após o plantio; o tratamento K/+A, no 24º mês, e os tratamentos K/+A e K/-A, no 36º mês, destacaram-se dos demais, em relação ao comprimento de fibras.

Os maiores valores de largura das fibras do lenho das árvores, submetidas aos tratamentos com adubação sódica, sem e com redução de chuva, no 12º, 24º e 36º mês, foram de 14,62-15,64; 14,97-14,55 e 21,26-22,16 μm, respectivamente. No lenho das árvores de eucalipto nas três idades, para o tratamento de nutrição e disponibilidade hídrica, com fertilização controle e K, não foram detectados padrões de variação definidos.

De forma semelhante à largura das fibras, os maiores valores de diâmetro do lume no lenho das árvores, submetidas aos tratamentos com adubação sódica, sem e com redução de chuva, no 12º, 24º e 36º mês, foram de 11,38-12,67; 12,02-12,84 e 13,30-14,42 μm, respectivamente. Os valores encontrados no tratamento controle, com e sem redução de chuva, foram menores que os encontrados para os tratamentos submetidos à adubação potássica, nas três idades analisadas.

Os maiores valores de espessura de parede das fibras do lenho das árvores, submetidas aos tratamentos controle, sem e com redução de chuva, no 12º, 24º e 36º mês, foram de 1,92-2,23; 2,20-2,09; 3,91-3,90 μm , respectivamente. No lenho das árvores de eucalipto no 24º e 36º mês, não foi verificada tendência de variação, bem como diferença estatística entre os tratamentos.

A exemplo dos demais parâmetros de qualidade do lenho, a dimensão média das fibras, no lenho das árvores de eucalipto, do presente estudo, difere da apresentada por inúmeros autores, como Tomazello Filho (1985, 2006); Silva (2002); Alzate (2004); Sette Júnior et al. (2009, 2012); Sette Júnior (2007, 2010).

A principal causa da diferença do comprimento das fibras no lenho das árvores de eucalipto, segundo Andrade (1987); Wilkes (1988); Oliveira et al. (2012), deve-se ao período de transição do lenho juvenil para o adulto, em função da interação do potencial genético e mudanças fisiológicas das células do câmbio, bem como dos fatores ambientais. De acordo com Panshin e De Zeeuw (1980), Tsoumis (1991), as diferenças anatômicas do lenho juvenil e adulto devem-se ao estágio de maturação das células do meristema cambial.

As dimensões das fibras do lenho juvenil das árvores de eucalipto foram avaliadas na região do entorno da medula, uma vez que não possuíam lenho adulto, em função do reduzido diâmetro, principalmente no primeiro ano de avaliação; por isso, os valores apresentados foram menores que os encontrados na literatura, que utilizaram amostras do lenho adulto e próximo da região da casca das árvores adultas, conforme destacado por inúmeros autores (TOMAZELLO FILHO, 1985b, 2006; BHAT et al., 1990; SHIMOYAMA, 1990; TRUGILHO et al., 1996; OLIVEIRA, 1997; SILVA et al., 2004; SETTE JUNIOR et al., 2009, 2012; SETTE JUNIOR, 2007, 2010; OLIVEIRA, et al., 2012).

O comprimento das fibras apresentou uma tendência de menor valor no lenho das árvores submetidas à redução hídrica, sendo escassas as informações na literatura sobre efeito da disponibilidade hídrica (irrigação) e da aplicação de fertilizantes em plantios florestais. Pesquisas realizadas por Beadle et al. (1997, 2001), Clark et al. (2004), Tomazello Filho (2006) indicaram que a maior disponibilidade hídrica promove a formação de fibras mais longas no lenho de árvores de *E. globulus*, *E. nitens*, *E. occidentalis*, *E. camaldulensis* e *E. grandis*; por outro lado, Tischler e Heth (1985) não detectaram influência da disponibilidade hídrica no comprimento das fibras do lenho de *E. maculata* e *E. camaldulensis*;

situação semelhante foi observada por Omran (1986), com *E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. gomphocephala*, *E. rudis*; e Pereira et al. (1992), com *E. globulus*.

O valor médio da largura das fibras no lenho das árvores de eucalipto é influenciado pelos fatores genéticos e ambientais e pela atividade sazonal do meristema cambial (LARSON, 1963, 1969, 1973; ZOBEL; VAN BUIJTENEM, 1989; SHIMOYAMA, 1990). Na estação da primavera-verão, a nova brotação da copa das árvores fotossintetizada produz maior quantidade de carboidratos e hormônios, como auxinas, promovendo o aumento da largura, diâmetro das células, arranjo das fibrilas e do ângulo fibrilar.

A espessura de parede das fibras, representada pela formação da parede secundária, pela deposição de microfibrilas, relaciona-se com os níveis de carboidratos do processo de fotossíntese e a deposição dos carboidratos, quando ocorre a diminuição do crescimento das árvores (SHIMOYAMA, 1990; RUY 1998; MOREIRA, 1999; PANSIN; DE ZEEUW; 1970; LARSON, 1963, 1969, 1973). Os carboidratos depositados na parede interna das fibras possuem alto grau de polimerização e peso molecular, tornando a madeira mais densa. Hillis e Brown (1984) afirmaram que a parede da fibra pode variar entre espécies, lenho inicial e tardio, bem como entre madeira normal e de tração.

As dimensões das fibras no lenho das árvores de eucalipto até o terceiro ano apresentaram diferenças no tratamento de nutrição e de disponibilidade hídrica, embora sem um padrão de variação entre os tratamentos, corroborando com os resultados de Sette Júnior (2007), avaliando o efeito da fertilização mineral.

A análise de variância com dois fatores para as dimensões das fibras no lenho das árvores de eucalipto nas três idades indicaram situações distintas (Tabela 16). No 12º mês, após o plantio, houve diferença para todas as variáveis analisadas nos dois fatores (nutrição e disponibilidade hídrica); no 24º mês, verificaram-se diferenças para o comprimento e largura das fibras, bem como o diâmetro do lume no fator nutrição; para o fator disponibilidade hídrica, tal diferença somente foi observada a largura das fibras; no 36º mês, após o plantio, todas as variáveis analisadas apresentaram diferenças para os dois fatores: (nutrição e disponibilidade hídrica), exceto para a espessura de parede

Tabela 16 – Dimensão das fibras do lenho nas três idades, por tratamento de nutrição

Tratamento	Idade (meses)	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Diâmetro do lume (μm)	Espessura de parede (μm)
Controle	12	686,11 a (119,31)	13,79 b (2,35)	10,23 a (2,28)	2,07 b (0,37)
Na		713,10 b (110,94)	15,13 c (2,50)	12,03 c (2,29)	1,92 a (0,35)
K		748,21 c (102,97)	13,20 a (2,02)	10,89 b (2,34)	2,04 a (0,36)
Controle	24	837,93 a (124,30)	14,03 a (2,05)	11,24 a (2,16)	2,15 a (0,40)
Na		862,29 b (118,85)	14,78 b (2,15)	12,43 c (2,09)	2,10 a (0,39)
K		915,83 c (124,40)	13,86 a (1,92)	11,90 b (2,08)	2,05 a (0,35)
Controle	36	870,67 a (117,97)	20,17 a (2,05)	12,61 a (3,53)	3,91 b (0,57)
Na		989,33 b (116,11)	21,42 b (4,20)	13,86 b (3,51)	3,92 b (0,67)
K		1043,39 c (133,84)	20,16 a (4,14)	14,04 b (3,78)	3,72 a (0,54)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

No 12^o e 24^o mês, após o plantio, nas árvores submetidas aos tratamentos com redução de chuva (66%) foram mensuradas as fibras mais curtas, com valores de 698,79 e 867,69 μm , respectivamente. No 12^o mês, após o plantio, as árvores submetidas à redução de chuva diferiram das árvores com disponibilidade total de chuva para as variáveis largura média, diâmetro e espessura da parede das fibras. No lenho das árvores no 24^o mês, após o plantio, apenas a largura da fibra mostrou diferença entre os tratamentos, com chuva (14,04 μm), e sem redução (14,39 μm) (Tabela 17).

Tabela 17 – Dimensão das fibras do lenho nas três idades avaliadas, por tratamento de disponibilidade hídrica

Tratamento	Idade (meses)	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Diâmetro do lume (μm)	Espessura de parede (μm)
100%	12	732,81 b (102,23)	13,78 a (2,55)	10,48 a (2,31)	1,90 a (0,37)
66%		698,79 a (122,48)	14,30 b (2,28)	11,63 b (2,45)	2,12 b (0,36)
100%	24	876,35 a (130,81)	14,39 b (2,06)	11,79 a (2,04)	2,13 a (0,36)
66%		867,69 a (122,37)	14,04 a (2,08)	11,92 a (2,23)	2,07 a (0,41)
100%	36	960,81 a (145,06)	19,63 a (4,06)	12,56 a (3,41)	3,83 a (0,68)
66%		967,43 a (140,17)	21,93 b (3,84)	14,24 b (3,50)	3,87 a (0,52)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Avaliando o efeito da idade nas dimensões das fibras no lenho, verificou-se um aumento significativo com o incremento da idade das árvores de eucalipto (Tabela 18), indicando uma maturação dos elementos de sustentação do tronco. Tal resultado demonstra que a interação da nutrição com a disponibilidade hídrica possui fundamental importância na formação e dimensão das fibras, bem como na formação do lenho das árvores.

Tabela 18 – Dimensão das fibras do lenho das árvores, nas três idades avaliadas

Idade (meses)	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Diâmetro do lume (μm)	Espessura da parede (μm)
12	715,80 a (114,03)	15,29 b (3,88)	11,17 a (3,61)	2,06 a (0,55)
24	872,02 b (126,67)	14,45 a (3,13)	10,79 a (2,87)	2,83 b (0,47)
36	899,18 c (111,39)	20,78 c (4,11)	13,06 b (3,64)	3,85 c (0,92)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Como as dimensões das fibras variaram significativamente no lenho das árvores de eucalipto, submetidas à fertilização e disponibilidade hídrica, ressalta-se a sua importância para avaliar o efeito dos tratamentos e preconização do uso da madeira, em idade idades mais avançadas.

5.6.2 Dimensões dos elementos de vaso

Os resultados dos valores médios do diâmetro tangencial, porcentagem de área ocupada e frequência dos vasos no lenho do DAP, nas três idades avaliadas, nos seis tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica) estão apresentados na Tabela 19 e Figura 31.

Tabela 19 – Diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho, nas três idades avaliadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

Tratamento	Idade (meses)	Diâmetro tangencial (μm)	% de área	Frequência (n^0/mm^2)
C/+A	12	86,94 a (14,00)	14,45 a (2,28)	17,19 a (9,10)
Na/+A		93,01 a (11,53)	12,78 a (1,22)	14,70 a (1,97)
K/+A		103,05 a (13,09)	14,42 a (2,17)	15,10 a (2,04)
C/-A		92,05 a (11,89)	14,48 a (1,51)	17,18 a (1,96)
Na/-A		101,49 a (12,55)	12,53 a (1,37)	14,78 a (1,52)
K/-A		94,43 a (13,52)	13,12 a (1,76)	14,77 a (1,72)
C/+A	24	106,44 a (13,01)	16,75 a (1,99)	15,70 a (9,10)
Na/+A		114,06 ab (14,88)	18,28 a (1,75)	14,38 a (1,97)
K/+A		127,79 c (14,06)	19,37 a (2,32)	13,34 a (2,04)
C/-A		103,65 a (13,98)	17,62 a (1,92)	16,42 a (1,96)
Na/-A		111,67 a (14,37)	18,62 a (3,42)	14,31 a (1,52)
K/-A		126,86 bc (13,37)	19,80 a (2,57)	13,26 a (1,72)
C/+A	36	116,33 a (11,60)	17,52 a (1,32)	15,19 b (1,96)
Na/+A		117,00 ab (4,00)	18,21 a (1,06)	14,15 ab (1,21)
K/+A		132,79 c (5,51)	19,70 a (2,32)	12,87 a (2,04)
C/-A		111,67 a (6,35)	17,76 a (1,40)	15,47 b (2,08)
Na/-A		113,67 a (8,96)	18,30 a (0,49)	14,21 ab (1,45)
K/-A		131,33 bc (4,51)	19,93 a (1,45)	12,50 a (1,32)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Figura 31 - Diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho, nas três idades avaliadas, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica)

O diâmetro médio dos vasos no lenho, nas três idades avaliadas, apresentou maiores valores para os tratamentos submetidos à nutrição potássica, com e sem redução de chuva. No 12º mês, após o plantio, não verificou-se diferenças entre os tratamentos, possivelmente devido à presença de lenho juvenil nas árvores e mudanças ecofisiológicas, durante a fase inicial do seu crescimento. No 24º mês, após o plantio, verificaram-se diferenças entre os tratamentos, com menores valores para os tratamentos submetidos à nutrição controle, seguidos da aplicação de Na e K. No 36º mês, após o plantio, os tratamentos com aplicação potássica, com e sem redução de chuva, diferenciaram-se dos demais, por apresentarem os maiores valores.

Para a porcentagem de área e frequência dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, nas três idades analisadas, não foram verificadas diferenças entre os tratamentos, exceto para a frequência dos vasos, no 36º mês, em que os tratamentos com aplicação da nutrição controle, com e sem chuva, diferiu dos demais, apresentando os maiores valores. A partir do 24º mês, após o plantio, verificou-se que os tratamentos submetidos à aplicação potássica, com e sem redução de chuva, foram superiores aos demais tratamentos. No lenho das árvores de eucalipto das três idades, observou-se um padrão de variação, em que a frequência dos vasos nos tratamentos de nutrição controle, com e sem chuva, foram superiores aos tratamentos com aplicação de Na e de K, independente da disponibilidade hídrica.

A relação entre a fertilização e as características dos vasos, em árvores de eucalipto, é controversa e discutida por diversos autores. Segundo Bamber et al. (1982), a aplicação de fertilizantes propiciou a formação de vasos de menor diâmetro

e menor frequência, em árvores de *E. grandis* de 2,5 anos de idade, na Austrália. Andrade et al. (1994) verificaram a formação de vasos de maior diâmetro no lenho de árvores de *E. grandis*, de seis anos de idade, como consequência da calagem. Tomazello Filho (2006) não observou diferença das dimensões dos vasos no lenho de árvores de *E. grandis x urophylla*, de sete anos, em tratamentos com fertilização e irrigação.

Bamber et al. (1969); Tomazello Filho (1985a, 1985b, 1987); Foelkel et al. (1983); Chen e Evans (2004); Leal et al. (2004); Veenin et al. (2005); Sette Júnior (2007, 2010); Sette Júnior et al. (2009, 2012) relacionaram os maiores valores de diâmetro e frequência de vasos, na posição periférica do lenho, com o tecido lenhoso funcional (alburno) e com o processo ascendente de fluxo da seiva bruta; da mesma forma, encontraram uma relação dos vasos com as propriedades de utilização da madeira, afetando a penetração do licor e dos preservativos, bem como a secagem, densidade e qualidade superficial dos papéis de impressão.

O aumento do diâmetro tangencial e porcentagem de área, bem como a diminuição da frequência dos vasos, na direção medula-casca do lenho de árvores de *E. grandis*, no 48º mês de idade, com tratamentos submetidos à fertilização sódica e potássica foram observados por Sette Júnior (2010). Tais resultados corroboram com os encontrados por Drew et al. (2009), Florshein et al. (2000), para as árvores de eucalipto, submetidas às condições de rápido e lento crescimento.

A análise dos vasos do lenho em idades mais avançadas pode seguir os modelos de variação da frequência e dimensão dos vasos, preconizados por inúmeros autores, como Panshin e De Zeuw (1970), Dadswell (1972); Bamber et al. (1969); Foelkel et al. (1983); Santos e Santin (1984); Wilkes (1988); Veenin et al. (2005); Silva (2002); Tomazello Filho (1985a, 1985b, 1987, 2006).

Na análise de variância, verificou-se que no 12º mês, após o plantio, houve diferença no fator nutrição para a frequência e porcentagem da área de vasos. No 24º e 36º mês, após o plantio, verificou-se diferença no fator disponibilidade hídrica para o diâmetro de vasos. Desse modo, a redução de chuva influenciou as características dos vasos no lenho, apenas, após o segundo ano de idade.

A análise das variáveis anatômicas dos vasos, nas três idades, considerando o efeito da nutrição, demonstrou que os resultados variaram da mesma forma, independente do efeito da disponibilidade hídrica (Tabela 20).

Tabela 20 – Diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho, nas três idades analisadas, por tratamento de nutrição

Tratamento	Idade (meses)	Diâmetro tangencial (μm)	% de área	Frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)
Controle	12	89,50 a (13,22)	14,47 b (1,91)	17,72 b (3,30)
Na		97,25 a (12,76)	12,66 a (1,29)	14,74 a (1,74)
K		92,75 a (13,97)	13,77 ab (2,06)	14,94 a (1,87)
Controle	24	105,04 a (13,55)	17,19 a (1,98)	15,87 b (1,62)
Na		112,86 a (14,65)	18,45 a (2,70)	14,35 ab (2,20)
K		127,33 b (13,88)	18,97 a (2,43)	13,59 a (1,52)
Controle	36	113,07 a (13,63)	17,62 a (1,74)	15,31 b (1,86)
Na		115,48 a (13,44)	18,25 a (1,37)	14,18 b (2,05)
K		132,17 b (12,90)	19,80 a (1,60)	12,69 a (1,71)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Nas três idades avaliadas, o tratamento submetido à nutrição controle apresentou os vasos com menor diâmetro e equivalente ao tratamento com aplicação de Na. A partir do segundo ano de avaliação, verificou-se um aumento no diâmetro tangencial dos vasos no tratamento submetido à adubação potássica, diferindo dos demais tratamentos de nutrição.

A porcentagem de área e frequência de vasos no lenho das árvores de eucalipto não constituíram um modelo estatístico definido; mesmo assim, verificou-se que o tratamento com aplicação de K propiciou a maior área de vasos e diminuição da sua frequência de vasos, com o aumento da idade das árvores.

A frequência dos vasos no lenho das árvores foi superior ao relatado por Sette Júnior (2010), devido à sua diminuição com a idade das árvores. Lima et al. (2010) verificaram uma diferença da frequência de vasos no lenho das árvores de *E. grandis*, com 21 anos de idade, em situações de aplicação e ausência de fertilizantes.

Avaliando o efeito da disponibilidade hídrica, verificou-se que a variação das características dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, nas três idades, ocorreu da mesma forma, independente do efeito da nutrição (Tabela 21).

Tabela 21 – Diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho, nas três idades avaliadas, por tratamento de nutrição

Tratamento	Idade (meses)	Diâmetro tangencial (μm)	% de área	Frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$)
100%	12	94,33 a (14,50)	13,88 a (2,08)	17,38 a (6,47)
66%		95,99 a (13,27)	13,38 a (1,74)	15,58 a (2,06)
100%	24	116,10 b (16,54)	18,13 a (2,28)	14,81 a (2,15)
66%		114,06 a (17,00)	18,68 a (2,82)	16,36 b (3,87)
100%	36	121,43 b (15,38)	18,40 a (1,72)	13,58 a (2,08)
66%		118,61 a (17,08)	18,64 a (2,03)	13,85 a (2,23)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna, por idade**, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

A análise estatística dos parâmetros dos vasos, no lenho das árvores de eucalipto, no 12º mês, não mostrou diferença no tratamento de disponibilidade hídrica; nas árvores no 24º mês, no entanto, houve diferença estatística para o diâmetro tangencial e frequência de vasos. De modo geral, os vasos no lenho das árvores de eucalipto submetidas ao déficit hídrico são de menor diâmetro tangencial e maior frequência, podendo afetar a produtividade, conforme discutido.

Baas et al. (1985); Alves et al. (2000) relataram que vasos menores, mais agrupados e mais numerosos são formados no lenho das árvores, sob estresse hídrico. Schuldt et al. (2011); D'Orangeville et al. (2013) reiteram que a redução da precipitação pode comprometer a condutividade hídrica no alburno, resultando em menor produtividade. Fonti et al. (2013), avaliando o lenho de árvores de carvalho, expostas ao estresse hídrico, verificaram uma redução do crescimento cambial secundário, devido à formação de vasos de menor diâmetro no xilema, como estratégia para evitar a cavitação e embolia, no fluxo de seiva.

A formação de vasos de menor diâmetro no lenho das árvores de eucalipto no tratamento com redução de chuva é característico a partir do 24º mês, associado à menor quantidade de água presente no solo, corroborando os resultados de Schuldt et al. (2011) e de Fonti et al. (2013).

Avaliando o efeito da idade, em relação das características dos vasos, verificaram-se diferenças para o diâmetro tangencial e porcentagem de área de vasos (Tabela 22, Figura 32). A frequência de vasos diminuiu com a idade, embora sem diferença entre si. Os resultados evidenciaram um aumento do diâmetro tangencial e da área ocupada dos vasos, bem como uma diminuição da sua frequência, em função da idade das árvores, demonstrando a importância do estudo da interação da nutrição com a disponibilidade hídrica, no início e durante o crescimento.

Tabela 22 – Diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho nas três idades

Idade (meses)	Diâmetro tangencial (μm)	% de área	Frequência (n°/mm²)
12	95,16 a (13,91)	13,63 a (1,93)	15,64 b (2,63)
24	115,08 b (16,79)	18,41 b (2,57)	15,58 b (3,21)
36	120,21 c (16,38)	18,76 b (2,01)	14,53 a (2,62)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, **na coluna**, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Figura 32 - Diâmetro tangencial e frequência dos vasos no lenho das árvores, nas três idades, por tratamento (nutrição e disponibilidade hídrica) 2,5x. Barra = 500 μ m

5.7 Características anatômicas e a densidade aparente do lenho

O perfil radial da densidade aparente e a estrutura microscópica do lenho das árvores dos seis tratamentos de nutrição e disponibilidade hídrica (Figuras 33, 34, 35, 36, 37 e 38) indicaram que:

- a primeira região do lenho, comum às árvores dos seis tratamentos, a 90% do raio do lenho das árvores, no 12º mês, após o plantio, possui características de madeira juvenil, como: (i) menor valor de densidade aparente média (0,37 a 0,49 g/cm³); (ii) menor dimensão das fibras (comprimento de 626 a 748 μ m; largura de 12 a 15 μ m; diâmetro do lume de 10 a 12 μ m; espessura da parede de 1,76 a 2,23 μ m); (iii) menor característica dos vasos (diâmetro tangencial de 86 a 103 μ m; frequência de 14 a 22 vasos/mm²; área de 12 a 14 %).
- a segunda região do lenho, a 90% do raio do lenho das árvores, no 24º mês, após o plantio, apresentou uma camada com crescimento da densidade aparente média (0,45 a 0,48 g/cm³). A densidade do lenho inicial e tardio dessa camada relaciona-se com sua estrutura anatômica, apresentando vasos de maior diâmetro tangencial (103 a 127 μ m), menor frequência (13 a 15 vasos/mm²) e maior porcentagem de área (16 a 19 %), em relação às regiões anteriores do lenho.
- a terceira região do lenho, a 90% do raio do lenho das árvores, no 36º mês, após o plantio, apresentou várias camadas de crescimento, com alterações de densidade. A última camada de crescimento possui maior densidade aparente do lenho (0,50 a 0,55 g/cm³, além do aumento do diâmetro tangencial (111 a 131 μ m), porcentagem de área (16 a 19 %) e alteração da frequência dos vasos (12 a 17 %), em relação às regiões anteriores do lenho.

Figura 33 - Perfil radial da densidade aparente do lenho do tratamento C/+A

Raio (cm)

Figura 34 - Perfil radial de densidade aparente do lenho do tratamento Na/+A

Figura 35 - Perfil radial de densidade aparente do lenho do tratamento K/+A

Figura 36 - Perfil radial de densidade aparente do lenho do tratamento C/-A

Figura 37 - Perfil radial de densidade aparente do lenho do tratamento Na/-A

6 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A síntese dos resultados das variáveis do lenho das árvores de eucalipto analisadas, em relação aos tratamentos (nutrição e disponibilidade hídrica) e à idade das árvores é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Resumo dos resultados das variáveis analisadas

Variável	Idade	Tratamento		Nutrição		Disponib. Hidr.		Idade
		Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	
Densidade básica	12	C/+A	Na/+A	C	Na	100%	66%	Cresce
	24	C/-A	Na/+A	C	Na	66%	100%	
	36	C/+A	Na/+A	C	Na	66%	100%	
Densidade aparente	12	C/+A	Na/-A	C	Na	100%	66%	Cresce
	24	C/+A	K/-A	C	Na	IGUAIS		
	36	C/-A	K/-A	C	Na	66%	100%	
Comprimento de fibras	12	K/+A	C/-A	K	C	100%	66%	Cresce
	24	K/+A	C/+A	K	C	100%	66%	
	36	K/+A	C/+A	K	C	66%	100%	
Largura de fibras	12	Na/-A	K/+A	Na	K	66%	100%	Cresce
	24	Na/+A	C/-A	Na	K	100%	66%	
	36	K/-A	K/+A	Na	K	66%	100%	
Diâmetro do lume	12	Na/-A	K/+A	Na	C	66%	100%	Cresce
	24	Na/-A	C/-A	Na	C	66%	100%	
	36	K/-A	C/+A	K	C	66%	100%	
Espessura de parede	12	C/-A	Na/+A	C	Na	66%	100%	Cresce
	24	C/+A	K/+A	C	K	100%	66%	
	36	C/+A	K/+A	C	K	66%	100%	
Diâmetro de vaso	12	K/+A	C/+A	Na	C	66%	100%	Cresce
	24	K/-A	C/-A	K	C	100%	66%	
	36	K/-A	C/-A	K	C	100%	66%	
% de área ocupada por vasos	12	C/-A	Na/-A	C	Na	100%	66%	Cresce
	24	K/-A	C/+A	K	C	66%	100%	
	36	K/-A	C/+A	K	C	66%	100%	
Frequência de vasos	12	C/+A	K/-A	C	Na	100%	66%	Decresce
	24	C/-A	K/-A	C	K	66%	100%	
	36	C/-A	K/-A	C	K	66%	100%	
Extrativos totais	36	K/-A	C/-A	K	C	66%	100%	
Lignina Residual	36	K/+A	K/-A	C	Na	100%	66%	
Lignina solúvel	36	C/+A	C/-A	NA	C	100%	66%	
Lignina Total	36	C/+A	K/-A	C	K	100%	66%	
Holocelulose	36	K/-A	Na/+A	K	Na	66%	100%	

Em negrito e sombreado - Houve diferença estatística pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$)

Com relação à taxa de incremento: (i) taxa de incremento em diâmetro do tronco foi afetado pela sazonalidade climática principalmente pela precipitação; (ii) mais alta e significativa nas árvores com K, em relação ao controle e Na, com e sem redução de chuva; (iii) maior valor de incremento acumulado nas árvores do tratamento sem redução de chuva; (iv) período de defasagem (*lag*) de 45 de resposta do incremento em diâmetro do tronco às variáveis climáticas.

Com relação à atividade cambial: (i) no período de estresse hídrico houve menor atividade cambial, em relação ao período chuvoso; (ii) a redução da chuva

(66%) induziu menor atividade cambial em relação ao tratamento sem redução de chuva (100%); (iii) o tratamento K/+A induziu maior atividade cambial no período chuvoso e na estação seca; (iv) o período de maior e menor atividade cambial corresponde ao do incremento em diâmetro do tronco; (v) a fenologia das folhas acompanhou o sazonalidade da atividade cambial.

Com relação às árvores no 12º, 24º e 36º mês: (i) no 12º mês, não houve diferença estatística nos tratamentos para o DAP e volume do lenho; (ii) no 24º e 36º mês o tratamento de nutrição-K foi superior e equivalente estatisticamente ao de nutrição-Na, com/sem redução de chuva para o DAP e volume do lenho das árvores, indicando sua utilização em associação com o K.

Com relação à densidade aparente do lenho do DAP: (i) houve diferença estatística no lenho das árvores no 12º e 36º mês nos seis tratamentos; (ii) maior valor no tratamento controle, seguido do K e Na, com e sem redução de chuva no lenho das árvores nas três idades; (iii) aumento com a idade das árvores; (iv) nas árvores de 12º e 36º mês a disponibilidade de hídrica afetou a densidade; (iii) o perfil radial de densidade indica maiores picos de densidade no lenho do 36º mês.

Com relação à densidade básica do lenho: (i) não houve diferença estatística no lenho das árvores no 12º e 24º mês nos seis tratamentos; (ii) aumento com a idade das árvores; (iii) maior valor no lenho das árvores do tratamento nutrição-controle e redução de chuva; (iv) no lenho das três idades a disponibilidade hídrica afetou a densidade; (v) o perfil longitudinal de densidade mostra decréscimo da base-DAP e aumento até o ápice do tronco.

Com relação à composição química do lenho: (i) houve diferença significativa dos extrativos totais, lignina solúvel e teor de holocelulose no lenho dos seis tratamentos; (ii) houve diferença significativa na lignina residual/total e holocelulose no lenho com disponibilidade hídrica.

Com relação às fibras do lenho; (i) não houve diferença consistente nos seis tratamentos com diferença estatística na largura, diâmetro de lume e espessura da parede das fibras no 12º mês e comprimento/largura das fibras no lenho ao 24º e 36º mês; (ii) comprimento de fibra com aumento significativo com a idade das árvores.

Com relação aos vasos do lenho: (i) diferença estatística entre tratamentos para o diâmetro tangencial dos vasos no lenho no 24º e 36º mês; (ii) aumento significativo do diâmetro tangencial e % de área dos vasos com a idade das árvores;

(iii) nutrição influencia a frequência e % de área dos vasos no lenho no 12º mês; fator disponibilidade hídrica influencia a frequência/diâmetro dos vasos no lenho no 24º e 36º mês.

7 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados pode-se concluir que:

a) A aplicação de potássio, associada à maior disponibilidade hídrica, promoveu maiores taxas de incremento em diâmetro, altura e volume de lenho, bem como maior atividade cambial das árvores de eucalipto em relação aos demais tratamentos.

b) As árvores de eucalipto que receberam aplicação de sódio apresentaram incremento em diâmetro, altura e volume de lenho superiores ao das árvores controle, sugerindo uma oportunidade prática e econômica de substituição ou utilização conjunta deste nutriente associado ao potássio, para os plantios florestais.

c) A fertilização potássica e sódica influenciou o crescimento das árvores, independentemente da disponibilidade hídrica.

d) A nutrição influenciou o aumento das densidades básica e aparente, teor de extrativos, além do comprimento e largura de fibras, bem como o diâmetro e área ocupada por vasos, nas três idades avaliadas.

e) A menor disponibilidades hídrica, bem como as variáveis climáticas (principalmente a precipitação), influenciaram o crescimento acarretando em menores valores de diâmetro e altura das árvores, bem como em menor atividade cambial.

f) O crescimento em diâmetro do tronco se deve ao período de resposta (defasagem) em relação às variáveis climáticas.

g) A redução da precipitação promoveu o aumento da densidades aparente, teor de extrativos, bem como das dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede), além da frequência de vasos.

h) A aplicação de potássio apresentou maior quantidade de extrativos, independente da disponibilidade hídrica.

i) A aplicação da adubação sódica e potássica, associada a níveis de disponibilidade hídrica, promoveu em todas as características físicas e anatômicas analisadas, à exceção da frequência de vasos, uma tendência de aumento com a idade.

j) As alterações de crescimento, formação e propriedades do lenho observadas e quantificadas que foram causadas pela fertilização e/ou pela disponibilidade hídrica podem direcionar melhor o uso final da madeira em grande partes das plantações florestais de eucalipto de rápido crescimento no Brasil e outras regiões do mundo.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, M.S. Estado de la tecnología en usos no tradicionales de la madera de eucalipto en el Mercosur y otros países. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SOLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA; ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais....** Viçosa: SIF; UFV, DEF, 1998. p. 82-105.

AJMAL, S.; IQBAL, M. Annual rhythm of cambial activity in *Streblus asper*. **IAWA Bulletin**, Leiden, v.8, p.275-283, 1987.

ALBINO, J.C. **Características de crescimento e variação da densidade básica em doze espécies de *Eucalyptus* em três regiões do Estado de Minas Gerais**. 1983. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

ALLEN, C.D. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? **Unasylva**, Rome, v. 60, p. 231-232, 2009.

ALMEIDA, J.C.R. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso da água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 112 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

ALMEIDA, J.C.R.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; RANGER, J.; SAINT-ANDRE, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1786–1795, 2010.

ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 1. Growth rings and vessels. **IAWA Journal**, Leiden, v. 20, n. 1, p. 3-30, 2000.

ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ALZATE, S.B.A.; TOMAZELHO FILHO, M.; PIEDADE, S.M.S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **IPEF**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, ago. 2005.

AMARAL, A.C.B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

ANDRADE, A.M.; VITAL, B.R.; BARROS, N.F.; DELLA LUCIA, R.M.; CAMPOS, J.C.C.; VALENTE, O.F. Efeitos da fertilização mineral e da calagem do solo na produção e qualidade da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 18, n. 1, p. 69-79, 1994.

ANDRADE, M.C.D. **Variação das características das fibras em função da densidade básica de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex.Maiden**. 1987. 43 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1987.

APPEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S.M. **Anatomia vegetal**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 430 p.

ARIZAPANA-ALMONACID, M.A. **Avaliação do crescimento e da qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus urophylla*, de 8 anos, de teste de progênies, visando a produção de carvão vegetal**. 2013. 159 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

ASHLEY, P.N.; OZARSKA, B. Furniture from young, plantation grown *Eucalyptus*. In: THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS. Launceston. **Proceedings...** Launceston: IUFRO, 2000. p. 150-158.

ASSIS, C.O. **Níveis de fertilização e seus efeitos no crescimento, nas características da madeira e do carvão em clone de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*** Tese (doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília, 2012. 142 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2011**. São Paulo. 2012. 178p.

BAAS, P. The wood anatomical range in *Ilex* (Aquifoliaceae) and its ecological and phylogenetic significance. **Blumea**, Leiden, v. 21, p. 193-258, 1973.

BAAS, P.; CARLQUIST, S. A comparison of the ecological wood anatomy of the floras of Southern California and Israel. **IAWA Bulletin New Series**, Utrecht, v. 6, n. 4, p. 141-159, 1985.

BAAS, P.; SCHWEINGRUBER, F.H. Ecological trends in the wood anatomy of trees, shrubs and climbers from Europe. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 8, n. 3, p. 245-274, 1987.

BAMBER, R.K.; FLOYD, A.G.; HUMPHREYS, F.R. Wood properties of flooded gum. **Australian Forestry**, Canberra, v. 33, n. 1, p. 3-12, 1969.

BAMBER, R.K.; HORNE, R.; GRAHAM-HIGGS, A. Effect of fast growth on the wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Australian Forestry Research**, Canberra, v. 12, n. 2, p. 163-167, Dec. 1982.

BARREIROS, R.M. et al. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.1, p.103-111. 2007.

BARRICHELLO, L.E.G.; BRITO, J.O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel. **PRODEPEF – Projeto de desenvolvimento e pesquisa Florestal**, Brasília, n. 13, p. 1-145, 1976.

_____. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 17., 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1983. v. 2, p. 403-409.

BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 487-592.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. *Eucalyptus* nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. (Ed.). **Nutrition of *Eucalyptus***. Melbourne: CSIRO, 1996. p. 335-356.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-181.

BATTIE LACLAU, P. R. F. **Efeitos da adubação potássica sobre a adaptação à seca do *Eucalyptus grandis***. 2013. 132 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

BATTIE-LACLAU P.; LACLAU, J.P.; PICCOLO, M.C.P. Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. **Plant and Soil**, The Hague, v. 371, p.19–35, 2013.

BATTIE-LACLAU P.; LACLAU, J.P.; BERI, C.; MUNIZ, M.R.; ARENQUE, B.C.; PICCOLO M.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J.P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v.37, n.1, p.70-81, 2014.

BEADLE, C.L.; BANHAM, P.W.; WORLEDGE, D.; RUSSEL, S.L.; HETHERINGTON, S.J.; HONEYSETT, J.L.; WHITE, D.A. Irrigation increases growth and improves fiber quality of *Eucalyptus globulus* and *E. Nitens*. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 15., 1997, Salvador. **Proceedings...** Colombo: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1997. v. 4, p. 154.

_____. Effect of irrigation on growth and fiber quality of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. **Appita Journal**, Victoria, v. 54, n. 2, p. 144-147, 2001.

BENJAMIN, C.A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus)* e *Eucalyptus grandis***. 2006. 158 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. 126 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

BERLYN, G.P.; MIKSCH, J.P. **Botanical microtechnique and cytochemistry**. Ames: The Iowa State University Press, 1976. 121 p.

BHAT, K.M.; BHAT, K.V.; DHAMODARAN, T.K. Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 22, n. 1, p. 54-61, 1990.

BOTOSSO, P.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Aplicação de faixas dendrométricas na dendrocronologia: avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e subtropicais. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H.L.; BARRELLA, W. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC, 2001. cap. 7, p. 145-171.

BOTOSSO, P.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MARIA, V.R.B.; FEDELE, L.F. Les lianes et l'accroissement de *Centropogon tomentosum* Guill. Ex-Benth. (Papilionoideae) au Brésil. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 284, n. 2, p. 71-75, 2005.

BOURIAUD, O.; LEBAN, J.-M.; BERT, D.; DELEUZE, C., Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. **Tree Physiology**, Oxford, v. 25, p. 651–660, 2005.

BOUVET, J.M.; BOUILLET, J. P.; VIGNERON, P.; OGNOUABI, N. Genetic and environmental effects on growth and wood basic density with two *Eucalyptus* hybrids. In: CONGRESS ON CONNECTING BETWEEN SILVICULTURE AND WOOD QUALITY, 1999, Nancy. **Proceedings...** Nancy: IUFRO, 1999. p. 15-19.

BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. Saligna* Smith e *E. grandis* Hill ex-Maiden aos 5 aos de idade, em função do local e do espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 129-149, 1971.

BRASIL, M.A.M.; VEIGA, R.A.A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas secções transversais do caule da base do tronco para a copa de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 73-82, 1977.

BRASIL, M.A.M.; VEIGA, R.A.A.; MELLO, H.A. Densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos 3 anos de idade. **IPEF**, Piracicaba, n. 19, p. 63-76, dez. 1979.

BRANDO, P.M.; NEPSTAD, D.C.; DAVIDSON, E.A.; TRUMBORE, S.E.; RAY, D.; CAMARGO, P. Drought effects on litter fall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a through fall reduction experiment. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**. London, v. 363, p. 1839-1848, 2008.

BREITSPRECHER, A.; BETHEL, J.S. Stem-growth periodicity of trees in a tropical wet forest of Costa Rica. **Ecology**, New York, v. 71, p. 1156-1164, 1990.

CABRAL, O.M.R., ROCHA, H.R., GASH, J.H.C., LIGO, M.A.V., FREITAS, H.C., TATSCH, J.D., The energy and water balance of a *Eucalyptus* plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 388, p. 208-216, 2010.

CALLADO, C.H.; COSTA, M.S.; VASCONCELLOS, T.J. Estudos sobre atividade cambial no Brasil: avanços, desafios e perspectivas. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 63., 2012, Joinville. **Anais...**

CALVO, C.F.; COTRINA, A.D.; CUFFRÉ, A.G.; PITER, J.C.; STEFANI, P.M.; TORRÁN, E.A. Variación radial y axial del hinchamiento, del factor anisotrópico y de la densidade, en el *Eucalyptus grandis* de Argentina. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 8, n. 3, p. 159-168, 2006.

CARDOSO, N.S. **Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de teca (*Tectona grandis* L.F.) – Verbenaceae**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CARLQUIST, S. **Ecological strategies in xylem evolution**. Berkeley: University of California Press, 1975. 259 p.

_____. **Comparative wood anatomy: systematic ecological and evolutionary aspects of Dicotyledonean wood**. Berlin: Springer Verlag, 1988. 436 p.

CARVALHO, H. G. **Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto.** 1997. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1997.

CASTRO, V.R. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação de propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* Barr. Et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.).** 2011. 106 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CHAFFEY, N.; CHOLEWA, E.; REGAN, S.; SUNDBERG, B. Secondary xylem development in *Arabidopsis*: a model for wood formation. **Plant Physiology**, Rockville, v. 114, p. 594–600, 2002.

CHEESMAN, A.W.; WINTER, K. Elevated night-time temperatures increase growth in seedlings of two tropical pioneer tree species. **New Phytologist**, London, v. 197, p. 1185-1192, 2013.

CHEN, F.; EVANS, R. A robust approach for vessel identification and quantification in eucalypt pulpwoods. In: APPITA ANNUAL CONFERENCE, 2004, Canberra. **Proceedings...** Canberra: APPITA, 2004. p. 4.

CHERUBINI, P.; HUMBEL, T.; BEECKMAN, H.; GARTNER, H.; MANNES, D.; PEARSON, C.; SCHOCH, W.; TOGNETT, R.; Olive tree-ring problematic dating: a comparative analysis on Santorini (Greece). **Plos One**, Berkeley, v. 8, n. 1, p. 1-5, 2013.

CLARK, D.A. Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 359, p. 477–491, 2004.

COOPMAN, R.E.; JARA, J.C.; BRAVO, L.A.; SÁEZ, K.L.; MELLA, G.R.; ESCOBAR, R. Changes in morpho-physiological attributes of *Eucalyptus globulus* plants in response to different drought hardening treatments. **Electronic Journal of Biotechnology**, Valparaíso, v. 11, n. 2, p. 30-39, 2008.

COUTINHO, C.A.; FERRAZ, E.S.B. Perfil da densidade da madeira de *Eucalyptus saligna* em função do diâmetro das árvores. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 66, p. 39-43, 1998.

COUTO, A.M.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A. Validation of a X-Ray densitometry method for the determination of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* radial density profile. In: 2012 IUFRO CONFERENCE DIVISION 5 FOREST PRODUCTS, 2012, Estoril. **Final program, proceedings and abstracts book.** Estoril: IUFRO, 2012.

CRUZ, C.R. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus* para utilização na indústria madeireira.** Curitiba. 2000. 61p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

DADSWELL, H.E. The anatomy of eucalypt wood. **CSIRO Forest Products Laboratory**, Melbourne, n. 66, p. 1-28, 1972.

DE MAGISTRIS, A.A.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V.; CASTRO, M.A. Técnica histológica modificada para el estudio anatómico de cortezas. **Boletín Sociedad Argentina Botánica**, Corrientes, v. 35, p. 85-90, 2000.

DELLA LUCIA, R.M.; VITAL, B.R. Características físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 4, n. 1, p. 70-74. 1980.

DÉTIENNE, P. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. **IAWA Bulletin**, Leiden, n. 10, p. 123-132, 1989.

DÉTIENNE, P.; BARBIER, C.; AYPUASSORHO, H.; BETIN, F. Rythmes de croissance de quelques essences de Guyane Française. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 217, p. 63-76, Jul. 1988.

D'ORANGEVILLE, L.; CÔTÉ, B.; HOULE, D.; MORIN, H. The effects of through fall exclusion on xylogenesis of balsam fir. **Tree Physiology**, Oxford, v. 33, p. 516-526, 2013.

DOWNES, G.M.; BEADLE, C.; WORLEDGE, D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. Nitens* in relation to climate. **Trees**, Darmstadt, v. 14, p. 102-111, 1999.

DOWNES, G.M.; WIMMER, R.; EVANS, R., Interpreting sub-annual wood property variation in terms of stem growth. In: SCHMITT, U.; ANDER, P.; BARNETT, J.R.; EMONS, A.M.C.; SARANPÄÄ, P.; TSCHEGG, S. (Ed.). **Wood fiber cell walls: methods to study their formation, structure and properties.** Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Wood Science, 2004. p. 267-283.

DOWNES, G.M.; HUDSON, I.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, L.R.; EVANS R.; MUNERI, A. **Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties.** Melbourne: CSIRO Publ., 1997. 132 p.

DREW, D.M, DOWNES, G.M. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: a review. **Dendrochronologia**, New York, v. 27, p. 159-172, 2009.

DREW, D.M.; GRADY, A.P.; DOWNES, G.M.; READ, J.; WORLEDGE, D. Daily patterns of stem size variation in irrigated and no irrigated *Eucalyptus globulus* **Tree Physiology**, Oxford, v. 28, p. 1573-1581, 2008.

DREW, D.M.; GEOFFRE, Y.M.; DOWNES, G.M.; GRADY, A.P.; READ, J.; WORLEDGE, D. High resolution temporal variation in wood properties in irrigated and non-irrigated *Eucalyptus globulus*. **Annals of Forest Science**. Les Ulis, v. 66, p. 1-10, 2009.

DYE, P.J. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. **Tree Physiology**. Oxford, v. 16, p. 233-238, 1996.

FAHN, A.; WERKER, E.; BAAS, P. **Wood anatomy and identification of trees and shrubs from Israel and adjacent regions**. Jerusalém: The Israel Academy of Sciences and Humanities, 1986. 221 p.

FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L; TEIXEIRA, J.L.R. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 577-584, set./out. 2002.

FAXITRON. **User manual Faxitron DX radiography system**. Lincolnshire, 2009. 95 p.

FERRAZ, E.S.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Uso de métodos nucleares no estudo da qualidade da madeira. **Revista Silvicultura**, São Paulo, n. 14, p. 17-27, 1978.

FERREIRA, A.T.B. **Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de *Eucalyptus* sp. E de *Corymbia* sp.** 2013. 131 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2013.

FLORSHEIN, S.M.B.; COUTO, H.T.Z.; SPEGIORIN, L. ROCHA, F.T. Variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* aos 7 anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 179-191, dez. 2000.

FOELKEL, C.E.B.; BUSNARDO, C.A.; DIAS, C.; SCHIMDT, C.; SILVA, R.M.R.; VESZ, J.B. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 782-791, 1983.

FONTI, P.; HELLER, O.; CHERUBINI, P.; RIGLING, A.; AREND.M. Wood anatomical responses of oak saplings exposed to air warming and soil drought. **Plant Biology**, London, n. 1, p. 210-219, 2013.

FROMM, J. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. **Tree Physiology**, Victoria, v. 30. p. 1140–1147, 2010.

GAMA-RODRIGUES, E. F. **Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo e da serapilheira de povoamentos de eucalipto**. 1997. 108 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 1997.

GAVA, J.L. Efeito de adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, abr.1997.

GONÇALVES, F.G.; OLIVEIRA, J.T.S.; DELLA LUCIA, R.M.; NAPPO, M.E.; SARTÓRIO, R.C. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 277-288, 2009.

GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. 427 p.

GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S.; NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short rotation plantations In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed.). **Management of soil, water and nutrients in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 379-418. (Monograph, 43).

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 13-64.

GREEN, J.W. Continuous measurements of radial variation in *Eucalyptus pauciflora* Sieb. Ex. Spreng. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 17, n. 2, p. 191-198, 1969.

GROENIGEN, K.J.; VAN; OSENBERG, C.W.; HUNGATE, B.A. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂. **Nature**, London, v. 475, p. 214-217, July 2011.

HENRIQUES, E.P. **Variabilidade genética de caracteres de produção e qualidade da madeira, para carvão vegetal, em progênies de *Eucalyptus urophylla*** S. T. Blake. 2012; 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

HIGASHI, E.N.; SILVEIRA, R.L.V.A.; MOREIRA, A.; GONÇALVES, A.N.; RAGOZZINI, P.E.A.; FRANÇA, F.S. Exportação de macronutrientes através da exploração da madeira de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. 1 CD-ROM.

HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. ***Eucalyptus for wood production***. Sydney: Academic Press, 1984. 434 p.

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

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007 –the physical science basis**: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

I_____. **Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (Ar5), Climate Change 2013**: the physical science basis. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 2013. 521 p.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **Fertilizers, climate change and enhancing agricultural productivity sustainably**. Paris, 2009. 30 p.

_____. **Production and international**: trade “World Agriculture and Fertilizer Demand, Global Fertilizer Supply and Trade 1999-2010”. Paris, 2011. 7 p.

IQBAL, H. (Ed.) **The vascular cambium**. Chichester: John Wiley, 1990. 246 p.

JARVIS, P.G. Increasing productivity and value of temperate coniferous forest by manipulating site water balance. In: BALLARD, R.; FARNUM, P.; RITCHIE, G.A.; WINJUM, J.K. (Ed.). **Forest potentials-productivity and value**. Tacoma: Proceedings Weyerhaeuser, 1985. p. 39-74.

JARVIS, P.G.; WANG, Y.P.; BORRALHO, N.M.G. Simulation of the role of stress on radiation absorption, assimilation, transpiration and water use efficiency of stands of *Eucalyptus globulus*. In: PEREIRA, J.S.; LANDSBERG, J.J. (Ed.). **Biomass production by fast-growing trees**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 169-179.

JIANJU, L.; WENBIN, F.; XIUZHEN, D. Fertilization effect on fiber dimensions of *Eucalyptus urophylla*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREE ANATOMY AND WOOD FORMATION, 1995, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: IUFRO, 1995. p. 189-196.

JUDD, T.S.; ATTIWWIL, P.M.; ADANS, A.M. Nutrient concentration in *Eucalyptus*: a synthesis in relation to differences between taxa, sites and components. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. **Nutrition of *Eucalyptus***. Melbourne: CSIRO, 1996. p. 123-153.

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

KEUNECKE, D.; NOVOSSELETZ, K.; LANVERMANN, C.; MANNES, D.; NIEMZ, P. Combination of X-ray and digital image correlation for the analysis of moisture-induced strain in wood: opportunities and challenges. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, p. 407-413, 2012.

KOLLMANN, F.F.P.; COTÉ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.

KRAMER, P.J.; KOZLOWSKI, T.T. **The physiology of trees**. New York, McGraw Hill, 1960. 642 p.

_____. **Physiology of wood plants**. Orlando: Academic Press, 1979. 192 p.

LACLAU, J.P.; SILVA, E.A.; LAMBAIS, G. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, Rockville, v. 4, p. 1-12, 2013.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; NIZIA, J.D.; DELEPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo: chemical composition of rainfall trough fall and stem flow solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, p. 105-119, 2003.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J.P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, n. 1/3, p. 375-391, May 2005.

LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; SAINT-ANDRÉ, L.; VENTURA, M.; RANGER, J.; RILDO, M.; MOREIRA, R.M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, Oxford, v. 29, p. 111-124, 2009.

LANA, M.C.; NEVES, J.C.L. Capacidade de suprimento de potássio sob reflorestamentos com eucalipto do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.18, p.115-122, 1994.

LARSON, P.R. Evaluating the environment for studies of the inheritance of wood properties. In: WORLD CONSUL. FOR GEN. TREE IMPROVEMENT STOCKHOLM, 1, 1963. 6p.

LARSON, P.R. **Wood formation and the concept of wood quality**. New Haven: Yale University, 1969. 54 p.

_____. The physiological basis for wood specific gravity in conifers. In: IUFRO, 5., 1973, South Africa. 1973. p. 672-680.

LEAL, S.; PEREIRA, H.; GRABNER, M.; WIMMER, R. Clonal and site variation of vessels in 7 year old *Eucalyptus globulus*. **IAWA Journal**, Leiden, v. 24, n. 2, p. 185-195, 2004.

LIMA, I.L. do. **Influência do desbaste e da adubação na qualidade serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maden**. 2005. 137 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LIMA, I.L. do; LONGUI, E.L.; SANTINI JUNIOR, L.; GARCIA, J.N.; FLORSHEIM, S.M.B. Effect of fertilization on cell size in wood of *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 465-472, out./dez. 2010.

LIMA, J.T.; BREESE, M.C.; CAHALAN, C.M. Variation in wood density and Mechanical properties in *Eucalyptus* clones. In: THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, 2000, Launceston. **Proceedings...** Launceston: IUFRO. 2000. p. 282-291.

LIMA, J.T.; ROSADO, S.C.S; OLIVEIRA, A.D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* e *Eucalyptus camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 1, n. 16, p. 123-127, 1992.

LOBAO, M.S. **Dendrocronologia, fenologia, atividade cambial e qualidade do lenho de árvores de *Cedrela odorata* L., *Cedrela fissilis* Vell. E *Schizolobium parahyba* var. *Amazonicum* Hub. Ex. Decke, no estado do Acre, Brasil**. 2011. 216 p. Tese (Doutor em Ciências, Área de concentração; Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

LOPES, C.S.D.; NOLASCO, A.M.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C.T.S.; PANSINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, abr./jun. 2011.

LOPES, M.C. **Agrupamento de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis* em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira**. 2003. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

LUCHI, A.E.; SILVA, L.C.P.; MORAES, M.A. Anatomia comparada do lenho de *Xylopia aromatica* (Lam.) Mart. Em áreas de cerrado e de plantação de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 809-820, out./dez. 2005.

MANNES, D.; LEHMANN, E.; CHERUBINI, P.; NIEMZ, P. Neutron imaging versus standard X-ray densitometry as method to measure tree-ring wood density. **Trees**, Berlin, v. 21, p. 605–612, 2007.

MARCAR, N.E. Waterlogging modifies growth, water use and ion concentration in seedlings of salt treated *Eucalyptus camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. Robusta* and *E. globulus*. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 20, p. 1-13, 1993.

_____. Genetic variation among and within provenances and families of *E. grandis* W. Hill and *E. Globulus* Labil, subsp. globules seedlings in response to salinity and waterlogging. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 162, n. 2/3, p. 231-249, 2002.

MARCATI, C.R. **Estudo da anatomia e das propriedades tecnológicas da madeira do angico-vermelho (*Piptadenia peregrina* Benth)**. 1992. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1992.

_____. **Sazonalidade cambial em espécies tropicais**. 2000. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.

MARCATI, C.R.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V.; EVERT, R.F Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). **IAWA Journal**, Leiden, v. 27 p. 100-211, 2006.

MARCATI, C.R.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V.; BENETATI, L. Anatomia comparada do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae-Caesalpinioideae) de floresta e cerrado. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 24, p. 311-320, 2001.

MARIAUX, A. La périodicité des cernes dans les bois de limba. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 128, p. 39-53, 1969.

_____. La périodicité de formation des cernes dans les bois de l'Oukoume. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 131, p. 37-50, 1970.

MARIEN, J.N.; THIBOUT, H. Les eucalyptus en France: rythmes de croissance en fonction des conditions climatiques. **Recherches Sylvicoles**, Paris, v. 4, n. 2, p. 273-299, 1980.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MEDONÇA, A.V.R.; CARNEIRO, J.G.A.; FREITAS, T.A.S.; BARROSO, D.G. Características fisiológicas de mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a estresse salino. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 255-267, 2010.

MELLO, J.L.P. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO**. 1998. 78 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

MELLO, H.A. **Aspectos do emprego de fertilizantes minerais no reflorestamento de solos de cerrado do estado de São Paulo com *Eucalyptus saligna***. 1968. 176 p. Tese (Mestrado em Silvicultura) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

MERCHANT, A.; CALLISTER, A.; ARNDT, S.; TAUSZ, M.; ADAMS, M. Contrasting physiological responses of six *Eucalyptus* species to water deficit. **Annals of Botany**. Oxford, v. 7, n. 100, p. 1-9, 2007.

METCALFE, C.R.; CHALK, L. **Anatomy of the dicotyledons**. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1985. 2 v.

MIELKE, M.S.; OLIVA, M.A.; BARROS, N.F.; PENCHEL, R.M.; MARTINEZ, C.A.; ALMEIDA, A.C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees**, Darmstadt, v. 13, p. 152-160, 1999.

MISHRA, A.; SHARMA, S.D.; KHAN, G.H. Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantations of *Eucalyptus tereticornis*: biorejuvenation of sodic soil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 184, n. 1/3, p. 115-124, 2003.

MORAIS, P. H. D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa**. 2008. 149p. Dissertação (mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

MOREIRA, W.S. **Relação entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 107 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

MOUTINHO, V.H.P. **Influência da variabilidade dimensional e da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. 2012. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance. **New Phytologist**, London v. 167, p. 645-663, 2005.

MUIANGA, M. R. D. **Relação entre crescimento e respostas ecofisiológicas em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* submetidos à diferentes doses de adubação potássica**. 2013. 53 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

NEPSTAD, D.C.; TOHVER, I.M.; RAY, D.; MOUTINHO, P.; CARDINOT, G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. **Ecology**, Oxford, v. 88, p. 2259-226, 2007.

NGUGI, M.R.; DOLEY, D.; HUNT, M.A.; RYAN, P.; DART, P. Physiological responses to water stress in *Eucalyptus cloeziana* and *E. Argophloia* seedlings. **Trees**, Darmstadt, v. 18, p. 381-389, 2004.

NOL, L.; VERBURG, P.H.; MOORS, E.J. Trends in future N₂O emissions due to land use change. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 94, n. 1, p. 78-90, June 2011.

ODDO, E.; INZERILLO, S.; LA BELLA, F.; GRISAFI, F.; SALLEO, S.; NARDINI, A. Short-term effects of potassium fertilization on the hydraulic conductance of *Laurus nobilis* L. **Tree Physiology**, Oxford, v. 3, p. 131–138, 2011.

OLIVEIRA, B.R.U.; LATORRACA, J.V.F.; TOMAZELLO FILHO, M.; GARCIA, R.A.; CARVALHO, A.M. Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 499-508, jul./set. 2011.

OLIVEIRA, B.R.U.; LATORRACA, J.V.F.; TOMAZELLO FILHO, M.; PALERMO, G.P.M.; CARVALHO, A.M.; PASTRO, M.S. Microdensitometria de raios X aplicada na determinação da variação da densidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. **IPEF**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 103-112, mar. 2012.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLBRICH, B.W.; ROUX, D.L.; POULTER, A.G.; BOND W.J.; STOCK, W.D. Variation in water use efficiency and ¹³C levels in *Eucalyptus grandis* clones. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v. 150, p. 615–633, 1993.

OLIVEIRA, J.T.S.; ABAD, J.I.M.; RODRIGUES, B.P.; OLIVEIRA, J.G.L.; BRAZ, R.L. Influência da precipitação na densidade básica da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. **Anais...** Lavras, 2010.

OMONTE, M.; VALENZUELA, L. Variación radial y longitudinal de La densidade básica em árvores de *Eucalyptus regnans* de 16 años. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 13, n. 2, p. 211-224, 2011.

OMRAN, T.A. Effect of irrigation on the growth, specific gravity and fiber length of *Eucalyptus* spp. **Alexandria Journal of Agricultural Research**, Alexandria, v. 31, p. 373-384, 1986.

PÁDUA, F.A. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Estudo sobre adaptação e vulnerabilidade à variabilidade climática: casos do setor elétrico brasileiro**. Brasília, 2013. 80 p.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of technology**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1970. 705 p.

PEÑUELAS, J.; LLORET, F.; MONTOYA, R. Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, p. 214–218, 2001.

PEREIRA, A.R. **Biomassa e ciclagem de nutrientes minerais em povoamentos jovens de *Eucalyptus grandis* e *E. Urophylla* em região de cerrado**. 1990. 167 p. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

PEREIRA, H.; ARAUJO, C. Raw-material quality of fast grow *Eucalyptus globulus* during the first year. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 11, n. 4, p. 421-427, 1990.

PEREIRA, J.; MADEIRA, M.V.; LINDER, S.; ERICSSON, T.; TOMÉ, M.; ARAUJO, M.C. Biomass production with optimized nutrition in *Eucalyptus globulus* plantations. In: WORKSHOP EUCALYPTUS FOR BIOMASS PRODUCTION, 1992, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: IUFRO, 1992. p. 13-30.

PEREIRA, J.S.; MADEIRA, M.V.; LINDER, S.; ERICSSON, T.; TOMEÂ, M.; ARAUÂ, J.M.C. Biomass production with optimized nutrition in *Eucalyptus globulus* plantations. In: PEREIRA, J.S.; PEREIRA, H. (Ed.). ***Eucalyptus for biomass production***. Brussels: Commission of the European Communities, 1994. p. 13-30.

PEREIRA, J.S.; LINDER, S.; ARAUJO, M.C.; PEREIRA, H.; ERICSSON, T.; BORRALHO, N.; LEAL, L.C. Optimization of biomass production in *Eucalyptus globulus* plantations-a case study. In: PEREIRA, J.S.; LANDSBERG, J.J. (Ed.). **Biomass production by fast growing trees**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 101-121.

QUEIROZ, S.O.P. Comportamento de algodão herbáceo em função da salinidade do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 6, n. 2, p. 124-134, 2001.

RAWAT, J.S.; BANERJEE, S.P. The influence of salinity on growth biomass production and photosynthesis of *Eucalyptus camaldulensis*. Dehnh and *Dalbergia sissoo* Roxb seedlins. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 163-169, 1998.

REAY, D.S.; DAVIDSON, E.A.; SMITH, K.A.; SMITH, P.; MELILLO, J.M.; DENTENER, F.; CRUTZEN, P.J. Global agriculture and nitrous oxide emissions. **Nature**, London, v. 2, p. 410-416, June 2012.

REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; FONTAN, I.C.I.; MONTE, M.A.; GOMES, A.N.; OLIVEIRA, C.H.R. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbrido de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* X *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-931, 2006.

REZENDE, M.A.; FERRAZ, E.S.B. Densidade anual da madeira de *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 30, p. 37-41, ago. 1985.

RIBEIRO, F.A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, Piracicaba, v. 46, p. 76-85, 1993.

ROCHA, M.P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias**. 2000. 157 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

RODRIGUES-NAVARRO, A.; RUBIO F. High-affinity of potassium and transport systems in plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 5, p. 1149-1160, 2006.

ROIG, F.A. Dendrocronología en los bosques del Neotrópico: revisión y prospección futura. In: ROIG, F.A. (Comp.). **Dendrocronología en América Latina**. Mendoza: EDIUNC, 2000. p. 307-355.

ROSSI, S.; ANFODILLO, T.; MENARDI, R. Trephor: a new tool for sampling microcores from tree stems. **IAWA Journal**, Leiden, v. 27, n. 1, p. 89-97, 2006.

RUY, O. F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SANDERCOCK, C.F.; SANDS, R.; RIDOUTT, B.G.; WILSON, B.F.; HUDSON, I. Eucalypt plantations: improving fiber yield and quality. In: CRCTHF-IUFRO CONFERENCE, 1995, Hobart. **Proceedings...** Hobart: IUFRO, 1995.

SANSIGOLO, C.A.; RAMOS, E.S. Quality of wood and pulp from a clone of *Eucalyptus grandis* planted at three locations. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 47-60, jan./mar. 2011.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; LEITE, H.G.; COMERFORD, N.B.; NOVAIS, R.F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697-706, 2008.

SANTOS, C.F.O.; SANTIN, D.A. Variações nas dimensões das fibras e dos vasos nos anéis de crescimento do *Eucalyptus tereticornis*. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, n. 41, p. 221-241, 1984.

SCATOLINI, F.M.; FIRME, D.J.; GARCIA, C.H.; GOMES, F.P.; CAMARGO, F.R.A. Parcelamento da adubação potássica em *E. grandis* em áreas de reforma da Votorantim celulose e papel S.A. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Lindóia. **Solo-suelo 96: anais eletrônicos...** Piracicaba: SBCS; SLCS, 1996. 1 CD-ROOM.

SCHACHTMAN, D.; LIU, W. Molecular pieces to the puzzle of the interaction between potassium and sodium uptake in plants. **Trends Plant Science**, Amsterdam, v. 4, n. 7, p. 281-287, 1999.

SCHULDT, B.; LEUSCHNER, C.; HORNA, V.; MOSER, G.; OHLER, M.; STRAATEN, K.O.; BARUS, H. Change in hydraulic properties and leaf traits in a tall rainforest tree species subjected to long-term through fall exclusion in the per humid tropics. **Biogeosciences**, v. 8, p. 2179–2194, 2011.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings: basics and applications of dendrocronology**. Amsterdam: Kluwer Academic, 1987. 292 p.

SETTE JUNIOR, C.R. **Efeito da aplicação do lodo de esgoto e de fertilização mineral no crescimento e propriedades da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden**. 2007. 153 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

_____. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 2010. 153 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SETTE JUNIOR, C.R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C.T.S.; LACLAU, J.P. Crescimento em diâmetro dos troncos das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 43, n. 6, p. 979-990, 2010.

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

SETTE JUNIOR, C.R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C.T.S.; CHAGAS, M.P.; LACLAU, J.P. Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W Hill, aos 24 meses de idade. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 535-546, jul./set. 2009.

SETTE JUNIOR, C.R.; LACLAU, J.-P.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOREIRA, R.M.; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J.; ALMEIDA, J.C.R. Source-driven remobilizations of nutrients within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. **Trees**, Heidelberg, v. 27, p. 827-839, 2013.

SHALLLHORNE, P.M.; HEINZE, H U. Hardwood vessel picking in the offset printing of uncoated fine papers. **Pulp and Paper Canada**, San Francisco, v. 98, n. 10, p. 21-24, 1997.

SHEIL, D. Growth assessment in tropical trees: large daily diameter fluctuations and their concealment by dendrometer bands. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 10, p. 2027-2035, Oct. 2003.

SHIMOYAMA, V.R.S. **Variação da densidade básica e características anatômicas e químicas da Madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 101 p. Dissertação (Mestrado em Recursos) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. Importância da adubação na qualidade da madeira e celulose. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1., 1989, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: 1989. p. 1-15.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes idades visando sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JR.; MATOS, J.L.M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SILVEIRA, R.L.V.A. **Efeito do potássio no crescimento, nas concentrações dos nutrientes e nas características da madeira juvenil de progênies de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden cultivadas em solução nutritiva.** 2000. 182 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; RAGOZZINI, P.E.A.; MOREIRA, A. Nutrição mineral de mudas de *Eucalyptus grandis*: crescimento, produção de matéria seca, concentração e acúmulo de nutrientes. **IPEF**, Piracicaba, n. 64, p. 136-149, 1998.

SILVEIRA, R.L.V.A.; MALAVOLTA, E. **Nutrição e adubação potássica em *Eucalyptus*.** Piracicaba: POTAFOS, 2000. 12 p. (Informações Agronômicas, 91 – Encarte Técnico, 12).

_____. Produção e características químicas da madeira juvenil de progênies de *Eucalyptus grandis* em função das doses de potássio na solução nutritiva. **IPEF**, Piracicaba, n. 63, p. 115-135, jun. 2003.

SMITH, P.; MARTINO, Z.; CAI, D.; GWARY, H.; JANZEN, P.; KUMAR, B.; MCCARL, S.; OGLE, F.; O'MARA, C.; RICE, B. **Agriculture in climate change 2007: Mitigation.** Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007. 159 p.

SOJA, A.J.; TCHEBAKOVA, N.M.; FRENCH, N.H.F.; FLANNIGAN, M.D.; SHUGART, H.H.; STOCKS, J.; SUKHININ, A.I.; VARFENOVA, E.I.; CHAPIN, F.S.; STACKHOUSE, P.W. Jr. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 56, n. 3/4, p. 274–296, 2007.

SOUZA, V.R.; CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L.E.G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 65-72, 1986.

STAPE, J.L. Potencial de crescimento do *Eucalyptus grandis* numa areia quartzosa do Estado de São Paulo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 172-173.

STAPE, J.L.; BENEDETTI, V. Decréscimo de produtividade e resposta da brotação do *Eucalyptus grandis* à fertilização com macronutrientes em areia quartzosa no estado de São Paulo. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 1997, Salvador. **Proceedings...** Colombo: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1997. v. 3, p. 112-117.

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219-234, 2004.

SUBBARAO, G.V.; ITO, O.; BERRY, W.L.; WHEELER, R.M. Sodium: a functional plant nutrient. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 22, p. 391-416, 2003.

SUN, D.; DICKINSON, G.R. Salinity effects on to growth root distribution and transpiration of *Casuarina cunninghamiana* and *Eucalyptus camaldulensis* planted on a saline site in tropical north Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 77, n. 1/3, p. 127-138, 1995a.

_____. Survival and growth responses of a number of Australian tree species planted on saline site in tropical north Australia. **Australian Journal Applied of Ecology**, Oxford, v. 32, p. 817-826, 1995b.

SU, N.; BETHUNE, M.; MANN, L.; HEUPERMAN, A. Simulating water and salt movement in tile drained fields irrigated with saline water under a serial biological concentration management scenario. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 78, n. 3, p. 165-180, 2005.

SUN, D.; DICKINSON, G. Response to salt stress of 16 *Eucalyptus* species, *Grevillea robusta*, *Lophosternon confertus* and *Pinus caribaea*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 60, n. 1/2, p. 1-14, 1993.

SUTCLIFFE, J.F.; BAKER, D.A. **As plantas e os sais minerais**. Tradução de A. Lamberti e V.M. Lotto. São Paulo: EPU, 1989. 80 p.

SZABOLCS, I. Soil and salinization. In: MOHAMMAD, P. (Ed.). **Handbook of plant and crop stress**. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 3-11.

TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI test methods: T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: Tappi Technical Divisions and Committees, 1985. 5p.

TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI test methods: T 264 cm-97: preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Technical Divisions and Committees, 1997. 3p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Acid – insoluble lignin in wood and pulp: T222 om-98**. Atlanta, 1998/1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Solvent extractives of wood and pulp: T204 cm-97**. Atlanta, 1998/1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T19 om-54: Holocellulose in wood**. Atlanta 2002.

TISCHLER, K.; HETH, D. Wood properties of irrigated eucalyptus. In: SYMPOSIUM ON FOREST PRODUCTS RESEARCH INTERNATIONAL – ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, 1985, Pretoria. **Proceedings...** Pretoria: National Timber Research Institute; South African Council for Scientific and Industrial Research, 1985. v. 3, p. 1-13.

TOLIVIA, D.; TOLIVIA, J. Fasga: a new polychromatic method for simultaneous and differential staining of plant tissues. **Journal of Microscopy**, Oxford, v. 148, p. 113-117, 1987.

TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 25-36. 1985a.

_____. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 37-45, 1985b.

_____. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. Pellita* e *E. Acmenioides*. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, 1987.

_____. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 2006. 135 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; CARDOSO, N.S. Seasonal variations of the vascular cambium of teak (*Tectona grandis* L.) in Brazil. In: WIMMER, R.; VETTER, R.E. (Ed.). **Tree ring analysis: biological, methodological and environmental aspects**. New York: Cabi, 1999. p.147-154.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIN, A.W. Application of technique in nondestructive evaluation of eucalyptus wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**. Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-150, 2008.

TOMAR, O.S.; MINHAS, P.S.; SHARMA, V.K.; SINGH, Y.P.; GUPTA, R.K. Performance of 31 tree species and soil conditions in plantation established with saline irrigation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 177, n. 1/3, p. 333-346, 2003.

TREVISAN, R.; DENARDI, L.; HASELEIN, C.R.; GATTO, D.A. Efeito do desbaste e variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 393-399, set. 2012.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C.R.; MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M.; BELTRAME, R.; GATTO, D.A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 553-559, 2008.

TREVIZOR, T.T. **Anatomia comparada do lenho de 64 espécies arbóreas de ocorrência natural na floresta tropical Amazônica no estado do Pará**. 2011. 216 p. Dissertação (Mestre em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

TRUGILHO, P.F. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*, **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TRUGILHO, P.F.; PAULA, R.; CHAVES, M.D.; CRUZ, C.R.; SILVA, J.R.M.; PÁDUA, F.A. Padrão de variação longitudinal da densidade básica da madeira em um clone híbrido de *Eucalyptus*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Universidade Federal de Londrina, 2008. 1 CD- ROM.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

TYREE, M.T.; COCHARD, H.; CRUIZIAT, P. The water-filled versus air-filled status of vessels cut open in air: the 'Scholander assumption' revisited. **Plant, Cell and Environment**, Hoboken, v. 26, p. 613-621, 2003.

VALENZIANO, S.; SCARAMUZZI, G. Preliminary observations on the seasonal diameter growth of *Eucalyptus camaldulensis* and *E. Viminalis*. In: WORLD SYMPOSIUM ON MAN-MADE FORESTS AND THEIR INDUSTRIAL IMPORTANCE, 1967, Canberra. **Proceedings...** Canberra: Wood and Agriculture Organization of the United Nations, 1967. p. 1923-1933.

VALERI, S.V.; ISMAEL, J.J.; TORRES, R.M., CORRADINI, L. Efeitos de potássio no crescimento e idade de corte de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em areia quartzosa e latossolo vermelho - escuro. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Lindóia. **Solo-suelo 96**: anais eletrônicos... Piracicaba: SBCS; SLCS, 1996. 1 CD-ROM.

VAN NIEUWSTADT, M.G.L.; SHEIL, D. Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia. **Journal Ecology**, Oxford, v. 93, p. 191–201, 2005.

VEENIN, T.; FUJITA, M.; NOBUCHI, T.; SIRIPATANADILOK, S. Radial variation of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. **IAWA Journal**, Leiden, v. 26, n. 3, p. 356-361, 2005.

VIANA, L.C. **Uso do infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus***. 2008. 120 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VIGNERON, J.; GERARD, J.; BOUVET, J.M. Relationship between basic density and growth in a fertilization trial with clones of *Eucalyptus* hybrids in Congo. In: IUFRO CONFERENCE EUCALYPT PLANTATIONS: IMPROVING FIBRE YIELD AND QUALITY, 1995, Hobart. **Proceedings...** Hobart: IUFRO, 1995. p. 68-71.

VITAL, B.R. Métodos de determinação da densidade da madeira. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa, n. 1, p. 1-21, 1984.

VITAL, B.R. Reflexos da fertilização mineral na qualidade e na utilização da madeira. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, p. 323-330. 1990

YU, D.; WANG, Q.; WANG, Y.; ZHOU, W.; DING, H.; FANG, X.; DAI, L. Climatic effects on radial growth of major tree species on Changbai Mountain. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 68, p. 921–933, 2011.

WALLIS, A. F. A.; WEARNE, R. H. e WRIGHT, P. J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to Kraft pulp yields. **Appita Journal**, v. 49, n. 6, p. 427-432, 1996.

WASHUSEN, R.; BAKER, T.; MENZ, D.; MORROW, A. Effect of thinning and fertilizer on the cellulose crystallite width of *Eucalyptus globulus*. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 39, n. 7, p. 569-578, Oct. 2005.

WENT, F.W. The effect of temperatures on plant growth. **Annual Review of Plant Physiology**, Rockville, v. 4, p. 347-362, 1953.

WHITE, D.A.; BEADLE, C.L.; WORLEDGE, D. Leaf water relations of *Eucalyptus globulus* ssp. *Globulus* and *E. Nitens*: seasonal, drought and species effects. **Tree Physiology**, Oxford, v. 16, p. 469–476, 1996.

_____. Control of transpiration in an irrigated *Eucalyptus globulus* Labill. Plantation. **Plant, Cell and Environment**. Hoboken, v. 23, p. 123–134, 2000.

WILKES, J. Variations in wood anatomy within of Eucalyptus. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 9, n. 1, p. 13-23. 1988.

WIMMER, R.; DOWNES G. M.; EVANS, R. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. **Tree Physiology**, Oxford, v. 22, n. 7, p. 449-457, 2002.

WORBES, M. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 87, p. 391–403, 1999.

ZOBEL, J.B.; BUJTENEN, J.P. **Wood variation**: its causes and control. New York: Springer-Verlag, 1989. 363 p.

ANEXOS

Anexo A - Incremento em diâmetro médio por período/idade das árvores de eucalipto

Período – Idade (meses)		Tratamento						Média
		C/+A	Na/+A	K/+A	C/-A	Na/-A	K/-A	
Diâmetro inicial (cm)		4,67 (0,50)¹	5,31(0,96)	5,62 (0,76)	4,81(0,67)	5,27(0,97)	5,61(0,50)	5,21 (0,80)
NOV/2011	18	0,31 (0,03)	0,34 (0,05)	0,50 (0,09)	0,31 (0,05)	0,29 (0,04)	0,37 (0,05)	0,35 (0,08)
DEZ/2011	19	0,24 (0,03)	0,28 (0,12)	0,38 (0,06)	0,18 (0,03)	0,19 (0,04)	0,23 (0,04)	0,25 (0,09)
JAN/2012	20	0,34 (0,04)	0,44 (0,07)	0,50 (0,06)	0,33 (0,14)	0,44 (0,07)	0,45 (0,04)	0,42 (0,09)
FEV/2012	21	0,19 (0,05)	0,24 (0,11)	0,36 (0,04)	0,15 (0,07)	0,25 (0,06)	0,29 (0,05)	0,25 (0,09)
MAR/2012	22	0,65 (0,05)	0,21 (0,05)	0,30 (0,05)	0,17 (0,04)	0,21 (0,04)	0,25 (0,04)	0,23 (0,06)
ABR/2012	23	0,27 (0,05)	0,25 (0,10)	0,34 (0,04)	0,28 (0,05)	0,25 (0,06)	0,26 (0,04)	0,27 (0,07)
MAI/2012	24	0,22 (0,05)	0,24 (0,03)	0,34 (0,09)	0,19 (0,04)	0,23 (0,05)	0,30 (0,04)	0,25 (0,07)
JUN/2012	25	0,13 (0,02)	0,12 (0,03)	0,13 (0,03)	0,12 (0,03)	0,14 (0,04)	0,18 (0,05)	0,14 (0,04)
JUL/2012	26	0,13 (0,03)	0,16 (0,02)	0,23 (0,04)	0,18 (0,03)	0,17 (0,03)	0,20 (0,05)	0,18 (0,05)
AGO/2012	27	0,17 (0,05)	0,21 (0,04)	0,26 (0,04)	0,10 (0,04)	0,09 (0,02)	0,10 (0,04)	0,16 (0,07)
SET/2012	28	0,12 (0,03)	0,14 (0,02)	0,15 (0,02)	0,10 (0,03)	0,08 (0,02)	0,09 (0,03)	0,11 (0,03)
OUT/2012	29	0,23 (0,04)	0,30 (0,05)	0,32 (0,07)	0,22 (0,03)	0,23 (0,03)	0,23 (0,02)	0,25 (0,05)
NOV/2012	30	0,17 (0,04)	0,19 (0,03)	0,35 (0,05)	0,18 (0,03)	0,22 (0,03)	0,28 (0,05)	0,23 (0,09)
DEZ/2012	31	0,06 (0,02)	0,09 (0,03)	0,20 (0,07)	0,09 (0,03)	0,13 (0,03)	0,21 (0,04)	0,13 (0,07)
JAN/2013	32	0,08 (0,02)	0,11 (0,02)	0,13 (0,02)	0,08 (0,03)	0,09 (0,03)	0,16 (0,02)	0,11 (0,04)
FEV/2013	33	0,05 (0,01)	0,10 (0,03)	0,13 (0,03)	0,09 (0,03)	0,10 (0,03)	0,14 (0,02)	0,10 (0,04)
MAR/2013	34	0,07 (0,01)	0,09 (0,04)	0,13 (0,02)	0,11 (0,03)	0,14 (0,02)	0,16 (0,02)	0,12 (0,05)
ABR/2013	35	0,11 (0,03)	0,19 (0,05)	0,18 (0,03)	0,15 (0,04)	0,22 (0,04)	0,24 (0,02)	0,18 (0,04)
MAI/2013	36	0,12 (0,03)	0,16 (0,04)	0,17 (0,03)	0,14 (0,03)	0,19 (0,03)	0,18 (0,03)	0,16 (0,04)
JUN/2013	37	0,10 (0,03)	0,10 (0,02)	0,11 (0,02)	0,09 (0,02)	0,12 (0,02)	0,13 (0,01)	0,11 (0,03)
JUL/2013	38	0,09 (0,01)	0,12 (0,03)	0,13 (0,03)	0,09 (0,03)	0,14 (0,03)	0,13 (0,03)	0,12 (0,03)
AGO/2013	39	0,05 (0,02)	0,08 (0,03)	0,07 (0,02)	0,05 (0,02)	0,08 (0,02)	0,04 (0,03)	0,06 (0,03)
SET/2013	40	0,07 (0,02)	0,10 (0,02)	0,11 (0,02)	0,08 (0,02)	0,09 (0,02)	0,09 (0,02)	0,09 (0,03)
OUT/2013	41	0,10 (0,03)	0,14 (0,06)	0,16 (0,03)	0,09 (0,03)	0,13 (0,03)	0,14 (0,03)	0,13 (0,04)
Diâmetro final (cm)		8,44 (0,72)	10,01 (1,17)	11,54 (1,05)	8,57 (0,41)	9,59 (1,02)	10,53 (0,49)	9,78 (0,85)

1 Médias seguidas de desvio padrão