

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

**Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades
do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de
regime hídrico**

Roger Chambi Legoas

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa Recursos Florestais.
Opção: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2016**

Roger Chambi Legoas
Engenheiro Florestal e do Meio Ambiente

**Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de
árvores de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de regime hídrico**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa Recursos Florestais.
Opção: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2016

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

Chambi Legoas, Roger

Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de regime hídrico / Roger Chambi Legoas. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016. 134 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Densitometria de raios X 2. Anatomia da madeira 3. Densidade do lenho 4. Cerne e alburno 5. Nutrição florestal 6. Seca 7. Estresse nutricional 8. Mudanças climáticas 9. Déficit hídrico 10. *Eucalyptus grandis* I. Título

CDD 634.9734
C445e

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

A minha mãe Etelvina Legoas (embora tenha ido para a eternidade, sempre viverá em mim) e meu pai Victor Chambi, por me dar o maior amor que os pais podem ter para o filho, e pela educação; aos meus irmãos pela feliz convivência durante nossa infância; a Cindy e nossa bela filha Daliana Thais pela oportunidade de formar uma família.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Nestas linhas quero agradecer profundamente ao prof. Mario Tommasiello Filho, pelo recebimento e acolhida no Laboratório de Anatomia, dendrocronologia e identificação de madeiras, pela oportunidade para me orientar nesta etapa da minha formação, e principalmente pela amizade feita.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, e ao programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, pela excelente formação acadêmica-científica dada durante esta etapa.

Ao pesquisador Gilles Chaix, pelo co-orientação durante meu trabalho, e pela grande amizade.

Ao pesquisador Jean-Paul Laclau, pelo fornecimento dos dados de umidade do solo do experimento de Exclusão de chuvas-140.

Ao Eng. Rildo Moreira e Elaine Cristina Casonato, e demais funcionários da Estação Experimental Itatinga, pela ajuda logística nas medições e amostragem durante o trabalho de campo.

Aos professores Carlos Tadeu dos Santos do Departamento de Estatística, e Hilton Tadeu Zarate do Departamento de Ciências Florestais, pelas sugestões nas análises estatísticas da minha pesquisa.

Aos funcionários de Laboratório: María Bermudez e Aparecido Siqueira, pela ajuda técnica na preparação das amostras, análises laboratorial e amizade brindada.

Aos meus amigos do Laboratório, José Luis Marcelo, Alejandro Venegas, Mariana Pires, Nayara Marcon, Luiz Santini, Tassio Trevisor, Samara Franzol, Raquel Medeiros, Luciana Sousa, Alci Albiero, Angel Boschiero, Fernanda Guedes, Alisson Rangel e Claudio Anholetto, pela amizade, e bons momentos.

Aos meus amigos de Apartamento: Frederico Miranda, Jofre Carneiro, Antonio Florentino e Andre Alves, pela amizade e bons momentos compartilhados na minha vida em Piracicaba.

Finalmente agradeço ao Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) do Governo do Perú pela bolsa concedida para meus estudos de mestrado.

SUMARIO

| | |
|--|----|
| RESUMO..... | 9 |
| ABSTRACT | 11 |
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 Objetivo geral | 15 |
| 2.2 Objetivos específicos | 15 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA..... | 17 |
| 3.1 Mudanças climáticas no mundo e no Brasil | 17 |
| 3.2 Efeito do déficit hídrico no crescimento das árvores | 18 |
| 3.3 Efeito da fertilização com potássio no crescimento de árvores de <i>Eucalyptus</i> | 21 |
| 3.4 Efeito da fertilização com sódio no crescimento de árvores de <i>Eucalyptus</i> | 22 |
| 3.5 Interação do potássio e sódio com a disponibilidade hídrica..... | 23 |
| 3.6 O gênero <i>Eucalyptus</i> | 25 |
| 3.7 O <i>Eucalyptus grandis</i> | 25 |
| 3.8 Periodicidade e crescimento em diâmetro do tronco de árvores de <i>Eucalyptus</i> : aplicação de dendrômetros e relações com variáveis climáticas | 26 |
| 3.9 Densidade básica da madeira das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 27 |
| 3.10 Variação da densidade do lenho no tronco das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 28 |
| 3.11 Densidade aparente pelo método de densitometria de raios X | 29 |
| 3.12 Efeito da fertilização potássica e sódica na densidade básica da madeira | 31 |
| 3.13 Efeito da disponibilidade hídrica na densidade básica da madeira das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 31 |
| 3.14 Características anatômicas do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 32 |
| 3.15 Cerne e alborno no tronco das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 34 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 37 |
| 4.1 Local da experimentação | 37 |
| 4.2 Plantio e delineamento experimental | 37 |
| 4.3 Crescimento em diâmetro e altura, e incremento corrente quinzenal no diâmetro do tronco das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> | 39 |
| 4.4 Variáveis climáticas e sua relação com o crescimento das árvores de <i>Eucalyptus</i> <i>grandis</i> | 41 |
| 4.5 Conteúdo volumétrico de água no solo e relação com o crescimento das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> e variáveis climáticas | 41 |
| 4.6 Amostragem destrutiva do lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> : caracterização anatômica e determinação da densidade do lenho | 42 |

| | |
|--|-----|
| 4.7 Determinação do volume do tronco das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> | 42 |
| 4.8 Densidade do lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> | 42 |
| 4.8.1 Densidade básica do lenho..... | 42 |
| 4.8.2 Densidade aparente do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> por densitometria de raios X..... | 43 |
| 4.9 Características anatômicas do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 44 |
| 4.9.1 Dimensões dos vasos do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 44 |
| 4.9.2 Dimensões das fibras do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 46 |
| 4.10 Avaliação do cerne e alburno no tronco das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 46 |
| 4.11 Análise dos dados..... | 47 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 49 |
| 5.1 Crescimento das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> (Diâmetro do tronco, altura total, volume do tronco sem casca), e suas relações com o clima | 49 |
| 5.2 Características anatômicas microscópicas do lenho: dimensões das fibras e dos vasos no lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> | 67 |
| 5.2.1 Dimensões das fibras do lenho..... | 67 |
| 5.2.2 Dimensões dos vasos do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> | 76 |
| 5.3 Propriedades físicas do lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> : densidade do lenho | 87 |
| 5.3.1 Densidade básica do lenho..... | 87 |
| 5.3.2 Densidade aparente do lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> por densitometria de raios X | 97 |
| 5.4 Avaliação da estrutura anatômica macroscópica do lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> | 105 |
| 5.4.1 Identificação do cerne e alburno do lenho | 105 |
| 5.4.2 Teor de cerne e alburno..... | 111 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 117 |
| REFERÊNCIAS | 119 |

RESUMO

Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de regime hídrico

No contexto das mudanças climáticas, a sobrevivência e a produtividade das plantações de eucaliptos poderão ser afetadas. Assim, são necessárias pesquisas em nutrição florestal, como a avaliação do K e do Na e sua interação com a disponibilidade hídrica com o crescimento e propriedades do lenho de eucaliptos. Em experimento instalado, em 20 de junho de 2010 de tipo "Split-plot", foram avaliadas as árvores de *Eucalyptus grandis* submetidas a dois regimes hídricos (100% e 63%) e três tipos de fertilização (K, Na e controle). O diâmetro do tronco (cada 15 dias, com dendrômetros) e a altura total (cada 6 meses) das árvores foram mensurados no período do 40º ao 61º mês. A umidade do solo foi analisada semanalmente e a precipitação e temperatura diariamente. Foram analisadas as propriedades do lenho de 48 árvores, no 47º mês, por amostragem destrutiva, avaliando-se a sua densidade aparente, densidade básica, estrutura anatômica e proporção cerne/alburno. Os resultados mostraram que a precipitação influenciou significativamente o crescimento das árvores, seguindo-se a temperatura mínima e a umidade do solo. O K e o Na mostraram interação com a precipitação, (i) no período seco, com a redução do incremento do tronco das árvores com o Na e a sua paralisação com o K, (ii) no período chuvoso, com o aumento do incremento em diâmetro e altura do tronco, em relação ao controle. O Na em relação ao K resultou em menor crescimento das árvores de eucalipto. Com a exclusão de 37% da chuva houve efeito negativo nas árvores com K; no tratamento controle e com aplicação de Na a exclusão não mostrou efeito significativo até o 58º mês. Em relação à (i) densidade do lenho das árvores- ocorreu a sua diminuição com K e Na (menor com Na), e incremento com a menor disponibilidade hídrica; K não diminuiu a densidade sob maior disponibilidade hídrica; (ii) anatomia do lenho- observaram-se vasos de maior diâmetro e menor frequência com K e Na (maior com K); as fibras apresentaram variação significativa com Na (com fibras mais longas e largas com menor espessura da parede); a menor disponibilidade hídrica resultante da exclusão de 37% da chuva não afetou aos vasos e fibras; (iii) relação cerne/alburno- o K e Na promoveram a formação de maior proporção de cerne em relação às árvores do tratamento controle, sem influência significativa da exclusão parcial de chuva. Relações entre anatomia e densidade do lenho mostraram que mudanças nas dimensões das fibras foram acompanhadas de mudanças na densidade do lenho; e maior taxa de crescimento nem sempre se relaciona com a diminuição da densidade do lenho. Os resultados indicaram que a perda de características desejáveis na densidade, fibras e proporção de alburno, com a adição de K ou Na (principalmente Na) na adubação básica, são altamente compensados pela maior produção de lenho, no entanto em regiões mais áridas e com maior risco de seca prolongada, potássio e sódio podem agravar o déficit hídrico.

Palavras chave: Densitometria de raios X; Anatomia da madeira; Densidade do lenho; Cerne e alburno; Nutrição florestal; Seca; Estresse nutricional; Mudanças climáticas, Déficit hídrico; *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT

Effects of potassium and sodium on growth and wood properties of *Eucalyptus grandis* trees under two water regime conditions

In the context of climate change, survival and productivity of eucalyptus plantations may be affected. Thus, research is needed on nutrition and forest ecophysiology, such as the evaluation of K and Na and their interaction with water availability on the growth and wood properties of eucalyptus. In a split-plot type, experiment installed on June 20, 2010 we evaluated *Eucalyptus grandis* trees submitted to two water regimes (100% and 63%) and three fertilizer supplies (K, Na and control). The stem diameter was measured every 15 days with dendrometers and total height, every 6 months in the period from 40th to 61st month. Soil moisture was analyzed weekly and precipitation and temperature daily. The wood properties of 48 trees were analyzed after 47 months, by destructive sampling, evaluating their apparent density, specific gravity, anatomical structure and heartwood/sapwood proportion. The results showed that precipitation significantly influenced the growth of the trees, followed by the minimum temperature and soil moisture. K and Na showed interaction with precipitation, (i) in the dry season, by reducing the growth of the tree trunks with Na and its stoppage with K, (ii) during the rainy season, with increasing growth in diameter and height of the trunk, compared with the control. The Na, as compared to K, resulted in lower growth of the eucalyptus trees. With the artificial exclusion of 37% of throughfall there was a negative effect on the growth of trees fertilized with K; but in the control and Na treatment the rainfall exclusion showed no significant effect until 58^o month. In relation to (i) density of the wood of trees, there was a decrease in K and Na (lower with Na), and an increase with lower water availability; although the K did not reduce the density under higher water availability; (ii) wood anatomy- larger vessels with lower frequency were formed with K and Na supply (with higher K); the fibers showed significant variations with Na (longer and wider fibers with smaller wall thickness); and the lower water availability from the of 37% rainfall exclusion did not affect vessels and fibers; (iii) Heartwood/sapwood ratio; K and Na promoted the formation of larger proportion of heartwood in relation to the trees from the control treatment, and there was no significant influence of the partial rainfall exclusion. Relationships between anatomy and wood density showed that changes in fiber dimensions were accompanied by changes in the wood density; and the higher growth rate is not always associated with decreased wood density. The results indicate that the loss of desirable characteristics in density, fiber and proportion of sapwood, with the addition of K or Na (mainly Na) in the basic fertilization are highly compensated by the increased wood production, though in more arid regions with increased risk of prolonged drought, potassium and sodium can aggravate water deficit.

Keywords: Densitometry X-ray; Wood anatomy; Wood density; Heartwood and sapwood; Forest nutrition; Drought; Nutritional stress; Climate change, Water deficit; *Eucalyptus grandis*

1 INTRODUÇÃO

As plantações florestais estão sujeitas ao efeito das mudanças climáticas, como longos períodos de seca e/ou mudanças na frequência e na intensidade das chuvas e aumento da temperatura, etc. (IPCC, 2013). Esta situação, decorrente das atividades humanas, como a utilização de combustíveis fósseis, queimada das áreas de florestas e de agricultura, utilização extensiva do solo para a agricultura, ocupação urbana e impermeabilização do solo, e, demais fatores (GROENIGEN et al., 2011; NOL et al., 2011) tende a ser agravada afetando o crescimento e o desenvolvimento das árvores das florestas naturais e plantadas nas regiões tropicais (ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2011; REAY et al., 2012).

As mudanças climáticas globais poderão afetar negativamente importantes segmentos da cadeia produtiva de base florestal do Brasil, principalmente, as plantações de eucalipto, com 5,10 milhões de ha e em processo de expansão (ABRAF, 2013). Essa significativa área visa suprir a demanda das indústrias brasileiras, que demonstram forte tendência de expansão na produção de celulose e papel, painéis, etc., para o atendimento do mercado nacional e internacional (CASTRO, 2014).

Como no Brasil a maioria das plantações florestais se encontra em regiões submetidas a longos períodos de déficit hídrico e em solo de baixa fertilidade pobres em potássio (GAVA et al., 1997; GONÇALVES et al., 2004a), se tornam muito importante as pesquisas para conseguir adaptar as práticas silviculturais às regiões secas e pobres em nutrientes mesmo como uma estratégia às mudanças climáticas. Neste sentido a fertilização constitui uma das mais importantes práticas silviculturais que influenciam na produtividade das plantações de *Eucalyptus*, merecendo um importante foco de pesquisa.

A literatura indica que os mecanismos do K e do Na estão diretamente relacionados com o balanço hídrico das árvores, podendo aumentar a sua eficiência no uso da água sob estresse hídrico e a sua resistência à seca (GONÇALVES; BENEDETTI, 2000; ALMEIDA, 2009), mas estudos com estresse hídrico prolongado no campo são ainda escassos.

Recentes pesquisas desenvolvidas no Brasil indicam uma resposta positiva das árvores à fertilização com sódio, além uma substituição parcial de potássio pelo

sódio atinge quase a mesma produtividade que com só o potássio (ALMEIDA et al., 2010); por outro lado testou-se o efeito da interação do potássio e sódio com uma maior e menor disponibilidade hídrica (mediante exclusão parcial artificial de chuva) e os resultados indicam um aumento significativo da taxa de crescimento com potássio e sódio das árvores de *Eucalyptus grandis* até o 3º ano sem interações significativas com a disponibilidade hídrica (BATTIE-LACLAU, 2013; CASTRO, 2014). As pesquisas reportaram também que as plantas de eucalipto com potássio e sódio + disponibilidade de água, quando em condições de déficit hídrico severo e prolongado, podem ter o seu crescimento e desenvolvimento afetados (BATTIE LACLAU et al., 2014a; BATTIE LACLAU et al., 2014b, CASTRO, 2014). Estas primeiras avaliações mostram um panorama promissor para a continuação das pesquisas nas árvores até a idade do corte, assim, portanto há necessidade da avaliação das árvores de eucalipto em maior escala temporal em relação ao efeito dos fertilizantes (potássio e sódio) e do déficit hídrico.

Devido a que estas pesquisas iniciais enfocaram-se principalmente nos efeitos no crescimento e fisiologia das árvores, as informações sobre os efeitos nas propriedades do lenho são escassos no referente aos efeitos da interação de potássio e sódio com a disponibilidade hídrica; além é conhecido que a qualidade do lenho pode ser afetada pelos tratamentos silviculturais, e que a anatomia mesmo como a densidade são fatores importantes que afetam consideravelmente o rendimento no processo de polpação (GONÇALVES et al., 2004); assim o estudo dos efeitos do potássio e sódio em interação com disponibilidade hídrica torna-se determinante.

Por outro lado, o estudo do efeito do sódio ganha mais importância, já que segundo Marschner (1995) a possibilidade da substituição total ou parcial do potássio por sódio na fertilização das plantações florestais é de interesse prático e científico, sendo que as principais fontes de K possuem Na em sua composição; e ainda, o uso destes minerais representa uma economia de energia requerida no processo de purificação, permitindo uma redução no preço dos fertilizantes potássicos.

Assim, o presente trabalho visa a avaliar o crescimento e propriedades do lenho das árvores de eucalipto do 41º mês até o 61º mês de idade, submetidas à aplicação do potássio e sódio sob variação da disponibilidade hídrica, e integrar com os resultados anteriores como de Castro (2014) e Battie-Laclau (2013).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da fertilização com potássio (K) e sódio (Na) em interação com a disponibilidade de água no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* com 4-5 anos.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar o efeito da fertilização de K e Na em duas condições de regime hídrico no: (a) incremento em diâmetro, altura e volume das árvores de eucalipto; (b) nas características anatômicas do lenho; (c) na densidade básica e aparente do lenho; (d) e na proporção de cerne e alborno no lenho. (e) avaliar a influência das variáveis climáticas e do teor de umidade do solo no crescimento em diâmetro do tronco das árvores; (f) estudar as interações do efeito dos tratamentos com a variação da precipitação; (g) estudar o efeito do K, Na e da exclusão da chuva, no estoque de água no solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Mudanças climáticas no mundo e no Brasil

Segundo o Quinto Relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sobre as mudanças climáticas (IPCC, 2014) a emissão de gases de efeito estufa de origem antropogênica, a nível mundial, tem aumentado desde a era pré-industrial, impulsionada em grande parte pelo crescimento econômico e populacional. Isto levou a concentração de dióxido de carbono, metano e de óxido nítrico em níveis sem precedentes nos últimos 800.000 anos. O efeito tem sido detectado em todo o sistema climático, sendo extremamente provável que constitui a causa dominante do aquecimento global observado desde a metade do século 20.

Em nível mundial para o período de 2016-2035, prevê-se o aumento da temperatura média entre 0,3-0,7°C (cenário médio) em relação a 1986-2005; para o final do século 21 (2081-2100) projeta-se um aumento médio da temperatura entre 0,3-1,7 °C no cenário mais otimista e de 2,6-4,8°C no mais pessimista, em relação ao período de 1850-1900; são previstas temperaturas quentes e extremas com maior frequência e menor frequência de temperaturas extremas frias (IPCC, 2014).

No Brasil, o aquecimento tem sido observado, de modo geral, em todo o seu território desde o início do século 20, especialmente no inverno – verifica-se maior taxa de aumento da temperatura mínima em relação à máxima. O indicador de aquecimento é verificado pela tendência de maior frequência de dias mais quentes no inverno e, em menor grau, de maior número de dias mais quentes no verão e no inverno. O valor mais elevado de taxa de aquecimento será observado na floresta Amazônica e o menor nos estados do Sudeste, junto à costa da Mata Atlântica; sendo que, em relação à chuva, a tendência não é muito clara pelos poucos estudos, com tendência de aumento na frequência de extremos nas regiões sudeste, sul e na Amazônia (CPTEC/INPE, 2007).

Esse mesmo estudo do CPTEC/INPE (2007) reporta que, no futuro haverá na região sul e sudeste uma tendência do aumento da chuva entre 0,2-0,3 mm dia⁻¹ e aumento da temperatura em 1,2°, 2,2 e 3,5° C em 2020, 2050 e 2080, respectivamente. A elevada temperatura do ar poderá comprometer a disponibilidade de água para agricultura, consumo ou geração de energia pelo

acrécimo da evaporação ou evapotranspiração. Com a extensão da estação seca em algumas regiões pode ocorrer o comprometimento do balanço hidrológico regional e, assim, afetar significativamente às atividades humanas.

3.2 Efeito do déficit hídrico no crescimento das árvores

As florestas, nas áreas semiáridas, temperadas e tropicais estão diretamente afetadas pelas perturbações climáticas, sendo que, com a ocorrência dos cenários climáticos (item 3.1), a elevada taxa de aquecimento e a diminuição da precipitação na Amazônia implicariam em aumento da respiração das plantas e o fechamento dos estômatos podendo induzir um colapso nesse bioma florestal (CPTEC/INPE, 2007). Ainda, na floresta Amazônica, Brando et al. (2008) simularam uma redução de 35-41% das chuvas por 4 anos verificando uma diminuição de 41% da produção primária líquida aérea, a partir do 2º ano. Assim, sob condições de déficit hídrico e de seca anormal prolongada observa-se a diminuição do crescimento e o aumento da mortalidade das árvores (ALLEN, 2009; CONDIT et al., 1996).

Em uma revisão global da mortalidade das árvores atribuída à ocorrência de secas e de estresse por calor, Allen (2009) conclui que os estudos sugerem que, pelo menos, alguns dos ecossistemas florestais já respondem às mudanças climáticas evidenciando que as árvores são mais vulneráveis, com aumento da taxa de mortalidade em relação ao aquecimento e seca, mesmo em ambientes em que a água não é considerada como limitante.

Em ambiente controlado, os estudos conduzidos para avaliar o efeito do déficit hídrico no crescimento inicial de árvores de espécies de eucalipto indicam que o déficit hídrico induziu a redução do acúmulo da biomassa, modificação na estrutura das plantas e adaptações morfológica e fisiológica (NGUGI et al., 2004; MERCHANT et al., 2007; CARTER; WHITE, 2009; CABRAL et al., 2011). A biomassa aérea, a área foliar, a repartição da biomassa nas raízes e nas folhas e a eficiência no uso dos recursos das plantações tropicais de eucaliptos foram, também, afetadas pelo déficit hídrico, constituindo o principal fator limitante da produção (STAPE; RYAN; BINKLEY, 2004).

O déficit hídrico severo e prolongado em experimentação de campo e o efeito no crescimento e na fisiologia das árvores de eucaliptos foram pouco estudados. Em experimento de campo, avaliando a reação de árvores de *Eucalyptus grandis* ao

déficit hídrico, com a exclusão da chuva foi realizado por Dye (1996). Não foram verificadas diferenças significativas nos tratamentos, devido à utilização de plantas em diferentes desenvolvimentos (3 e 9 anos), a ausência de trincheira para impedir o crescimento das raízes laterais das árvores para as áreas sem redução de chuva e a presença de raízes profundas.

Batie Laclau (2013) e Castro (2014) avaliando o crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*, de 0-2 e 0-3 anos, respectivamente, em um mesmo experimento de déficit hídrico induzido, reportaram que as árvores com menor disponibilidade hídrica tiveram menor crescimento em diâmetro do tronco, diferença significativa. O tratamento evidenciou um efeito negativo a partir do 3º ano, embora, a redução de 37% da chuva não tenha causado suficiente estresse hídrico.

O efeito do déficit hídrico nas árvores tem objetivo de estudos da fisiologia das plantas; em ambientes com restrição hídrica no solo ou pela alta demanda atmosférica de água as árvores tendem a fechar os estômatos das suas folhas, para a manutenção, acima do valor crítico, do potencial de água. Ocorre, continuamente, o controle da entrada de CO₂ e a saída de água pelo ajuste da abertura dos estômatos nas folhas que dependem de fatores externos e internos, como a pressão de turgescência das células estomáticas (COLLATZ et al., 1991), resultante dos sinais radiculares (COWAN, 1982) ou como o aumento do déficit de pressão de vapor (TURNER; SCHULZE; GOLLAN, 1984).

As plantas, em resposta ao déficit hídrico do solo e ao déficit de pressão de vapor, exercem um controle sobre a transpiração, regulando a abertura estomática que reduz as flutuações do potencial da água nos tecidos e permite manter a integridade do xilema. Com base na capacidade das plantas em manter estável o potencial hídrico dos tecidos, em condições flutuantes do ambiente, é classificado como anisohídricas ou isohídricas. O comportamento isohídrico, como para o *Eucalyptus grandis*, resulta de uma forte regulação estomática da transpiração, o que produz um potencial hídrico quase constante, nas plantas estressadas quanto nas irrigadas (TARDIEU; SIMONNEAU, 1998). Por outro lado, as plantas anisohídricas apresentam um controle estomático menor, resultando em importantes flutuações do potencial hídrico das folhas, seguindo o estado hídrico do solo e a demanda evaporativa. Tardieu e Simonneau (1998) sugerem que o controle estomático nas plantas isohídricas relaciona-se à interação entre a resposta

hidráulica e os estímulos hormonais provenientes das raízes; o fechamento estomático nas plantas anisohídricas deve-se, preferencialmente, às reações originárias do sistema radicular das plantas.

O déficit hídrico aumenta a limitação da difusão da fotossíntese (redução da condutância estomática e do mesófilo) e afeta, também, a capacidade fotossintética pela inibição do metabolismo do carbono (TEZARA et al., 1999). As limitações metabólicas da fotossíntese podem ocorrer por redução na regeneração da RuBP, na síntese de ATP, na fotoquímica foliar, na atividade da Rubisco e na eficiência quântica do fotossistema II (BATTIE LACLAU, 2013).

A redução da condutância estomática e, por consequência, da fotossíntese em árvores de eucalipto foi observada em resposta ao aumento do déficit hídrico do solo e da pressão de vapor no ambiente (WHITE; BEADLE; WORLEDGE, 1996; WHITE; TURNER; GALBRAITH, 2000; MIELKE et al., 1999).

Assim, em geral, o estresse é caracterizado pela redução do conteúdo de água, diminuição do potencial hídrico, perda do turgor, fechamento dos estômatos, redução da expansão celular e do crescimento das plantas. Quando severo, o estresse por deficiência hídrica pode resultar em inibição da fotossíntese, distúrbios do metabolismo e, finalmente, na morte da planta (JALEEL et al., 2008).

A tolerância ao estresse hídrico varia com o genótipo (REIS et al., 2006) e a procedência das árvores e, portanto, as modificações das características das plantas são devidas às adaptações ao clima (LI et al., 2000). As árvores de *Eucalyptus* desenvolvem mecanismos de adaptação, como o maior crescimento radicular (REIS et al., 2006), o qual é considerado como a mais importante adaptação face à menor disponibilidade hídrica (BATTIE-LACLAU et al., 2014b). As árvores obtêm maior eficiência na absorção de água, com uma redução da área foliar (LE MAIRE et al., 2011; BATTIE-LACLAU et al., 2014b) atingindo maior valor da relação massa de raízes/área foliar (LI et al., 2000), além o rápido fechamento estomático que reduz a perda de água por evapotranspiração (WHITE; TURNER; GALBRAITH, 2000; BATTIE-LACLAU et al., 2014b).

Face às mudanças climáticas e o seu efeito negativo na produtividade das plantações florestais é estratégico as espécies se adaptem às novas condições ambientais. Assim, a produção das florestas poderá ser mantida, evitando as perdas econômicas, sendo importante a pesquisas sobre a resposta das plantas à

deficiência, com a seleção de genótipos mais tolerantes e sua introdução em programas de melhoramento genético.

3.3 Efeito da fertilização com potássio no crescimento de árvores de *Eucalyptus*

O potássio, com o nitrogênio e o fósforo, é um nutriente essencial e importante para o desenvolvimento das plantas, sendo que sua deficiência causa a redução da área foliar e da assimilação, da mudança na alocação dos compostos foto-assimilados e a redução da biomassa (BATTIE LACLAU, 2013).

Além deste aspecto, o potássio constitui-se em um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pelas plantas, superando o fósforo e equiparando-se ao nitrogênio (MALAVOLTA, 1980; PETTIGREW, 2008; apud BATTIE LACLAU, 2013). A quantidade de K exportada pelas árvores de *Eucalyptus grandis* em plantações de 7 anos é, cerca de, de 300 kg ha⁻¹, distribuído entre as folhas (10%), ramos (6%) e caule (84%) (BELLOTE, 1979). Verifica-se, em particular para o K, uma estreita relação entre a taxa de crescimento e a taxa de acúmulo de nutrientes na biomassa das árvores das espécies de eucalipto plantadas comercialmente no Brasil (GONÇALVES et al., 2004a; LACLAU et al., 2009). Nessa direção, um levantamento sobre o mercado e o uso de fertilizantes em florestas brasileiras, realizado por Silveira et al. (1995) demonstrou que K foi um dos nutrientes com deficiência mais frequente.

A resposta significativa das plantas de eucalipto e de outras espécies florestais à disponibilidade de K vem sendo estudada no Brasil e outras regiões do mundo, destacando os estudos de Faria et al. (2002), Gonçalves et al. (2008), Laclau et al. (2009), Almeida et al. (2010) e de Wright et al. (2011), etc. A aplicação de KCl aumentou em 130% a biomassa aérea das árvores de *E. grandis*, 3 anos após o plantio, em relação ao controle (ALMEIDA et al., 2010); Laclau et al. (2009) reportaram que a produção primária líquida da biomassa aérea das árvores de eucalipto foi duplicada, da mesma forma, 3 anos após o plantio. Estudos mais recentes, como o de Battie Laclau (2013) reporta que a aplicação do K aumenta em 45% a altura do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*, até o 3^o ano, Castro

(2014) obteve, no mesmo experimento, que o K incrementou de 2,3-2,6 o volume do tronco das árvores em relação ao controle.

Segundo Battie Laclau (2013) os processos fisiológicos envolvidos na nutrição do N e do P têm sido estudados nas árvores de eucaliptos; em relação aos estudos da adubação com K. Considera-se que o principal estudo o de Battie Laclau (2013), que concluiu que a adubação com K, em condição hídrica não limitante, aumentou expressivamente a produção da madeira de árvores de eucalipto, pelo aumento da assimilação carbonada (aumento da superfície e da atividade foliar fotossintetizante), da alocação da biomassa na madeira e da eficiência de transpiração. Ainda, durante o período seco, a adubação com K melhorou dos mecanismos das plantas de *E. grandis* à adaptação à seca, como a alta sensibilidade estomática ao déficit hídrico do solo e déficit de pressão de vapor, a rápida recuperação da taxa fotossintética no início da estação chuvosa, a redução no potencial osmótico e a absorção da água nas camadas profundas do solo. O ganho da biomassa das árvores de eucalipto, com a aplicação de K deve-se, principalmente, ao aumento do índice de área foliar (LAI) e à mais longa vida útil das folhas (LACLAU et al., 2009).

Em mudas de eucaliptos, a nutrição com K aumentou o LAI, reduziu o consumo de água/unidade de área folia e, ainda, sob menor disponibilidade hídrica, induziu um menor consumo de água (TEIXEIRA et al., 2008). As árvores de eucalipto nutridas com K e de maiores dimensões, quando submetidas ao maior déficit hídrico, podem ser afetadas pela seca, induzindo maior % de mortalidade, pelo alto valor do LAI e da condutância estomática de vapor de água demandando maior consumo de água (BATTIE-LACLAU et al., 2014).

3.4 Efeito da fertilização com sódio no crescimento de árvores de *Eucalyptus*

O acúmulo do Na é considerado, muitas vezes, prejudicial para o crescimento das árvores pelo efeito osmótico e pela sua toxicidade (KOZLOWSKI, 1997), sendo conhecido que a alta concentração de Na no solo têm um efeito negativo na produção de culturas agrícolas (MUNNS, 2005). No entanto, foi observado que nas plantações de *Eucalyptus sp.* na Austrália, pode ocorrer uma resposta positiva à determinada concentração de Na, suprimindo 15% da sua demanda de água do lençol freático salino (FEIKEMA et al., 2010).

Ainda, Laclau (2001) propôs a substituição parcial do K pelo Na com base no comportamento das árvores de plantações de *Eucalyptus* nas planícies costeiras do Congo, em áreas expostas à maior concentração de Na. Posteriormente, alguns estudos relataram um efeito positivo da aplicação do Na no crescimento das árvores jovens de eucalipto em sol pobre de K sugerindo, assim, a sua substituição pelo Na (ALMEIDA et al. 2010, BATTIE LACLAU, 2013; BATTIE-LACLAU et al., 2014a; BATTIE-LACLAU et al., 2014b).

No Brasil, Almeida et al. (2010) avaliaram o efeito da aplicação do NaCl no desenvolvimento de árvores de *Eucalyptus grandis*, de 3 anos, com a biomassa do tronco das árvores com 110 kg de KCl + 87,5 kg NaCl ha⁻¹, 8% menor que a fertilizadas com 220 kg KCl ha⁻¹ demonstrando que potencial da aplicação de menor grau de fertilizantes com K e com uma significativa proporção de Na (ALMEIDA et al., 2010).

A substituição total do K pelo Na mostrou resultados menos alentadores, sendo que em experimento similar, Castro (2014) reportou que árvores de eucalipto adubadas com 4,5 kmol ha⁻¹ de NaCl apresentaram biomassa do tronco 20-26% menor em relação à das árvores adubadas com 4,5 kmol ha⁻¹ de KCl; embora com 63-93% de biomassa maior em relação às do controle, sugerindo a utilização conjunta do Na associado ao K.

Fisiologicamente o Na e o K compartilham de várias funções nas plantas (SUBBARAO et al., 2003; RODRIGUES-NAVARRO; RUBIO, 2006), os estudos com árvores de *Eucalyptus grandis* reportaram aumento da assimilação líquida de CO₂ nas folhas com uma redução da limitação da fotossíntese (BATTIE- LACLAU et al., 2014a), maior área foliar (BATTIE-LACLAU et al., 2014a; ALMEIDA et al., 2010) e o aumento da máxima condutância estomática (BATTIE-LACLAU et al., 2014b). O efeito intermediário da aplicação do Na na anatomia e na fisiologia foliar das árvores de *E. grandis* evidenciam que o Na pode apenas substituir parcialmente o K (BATTIE-LACLAU et al., 2014b).

3.5 Interação do potássio e sódio com a disponibilidade hídrica

A literatura indica que a fertilização com K é de grande interesse para atenuar a consequência negativa da seca nas árvores de plantações de *Eucalyptus* (MENDES

et al., 2013), pela regulação dos estômatos (LACLAU et al., 2009; BATTIE-LACLAU et al., 2014b), maior vida útil das folhas (LACLAU et al., 2009) e melhoria do transporte de água no xilema (BATTIE LACLAU, 2013). O efeito positivo da aplicação de Na nas funções osmorregulatórias e fotossintéticas em árvores de *Eucalyptus grandis* em solos pobres de K sugere que o Na pode, também, estar envolvido no ajuste estrutural e fisiológico à seca, similar ao K (BATTIE LACLAU, 2013, BATTIE-LACLAU et al., 2014b).

Embora o efeito do K e do Na não estejam totalmente esclarecidos em árvores de *Eucalyptus* com déficit hídrico, os efeitos benéficos do K nas plantas com déficit hídrico, foram reportados por Mendes et al. (2013) indicando que a adubação com K diminui o efeito negativo da deficiência hídrica nos estádios iniciais de crescimento de árvores de eucalipto de 5 genótipos. Silva et al. (2004) e Teixeira et al. (1995) evidenciaram, também, o efeito benéfico do K em plantas sob deficiência hídrica.

As pesquisas de Battie Laclau (2013) e Battie Laclau et al. (2014b), demonstraram que, sob diferentes intensidades de déficit hídrico, a aplicação do K pode ter efeitos positivo e negativo, relatando que (i) em condição hídrica não limitante, a adubação com K aumentou, expressivamente, a produção da madeira, pelo aumento da assimilação carbonada (aumento da superfície e da atividade foliar fotossintetizante), da alocação da biomassa na madeira e da eficiência da transpiração; (ii) durante o período seco, a adubação com K melhorou os mecanismos de adaptação à seca das árvores de *Eucalyptus grandis*, como a alta sensibilidade estomática ao déficit hídrico do solo e déficit de pressão de vapor, a rápida recuperação da taxa fotossintética no início da estação chuvosa, a redução no potencial osmótico e a absorção da água nas camadas profundas do solo. Contudo, pelo o maior crescimento e a maior demanda de água das árvores de eucalipto, a nutrição potássica agravou o déficit hídrico, tornando as árvores mais vulneráveis.

Portanto, no contexto atual de mudanças climáticas com previsão de redução do regime pluviométrico, em regiões de risco severo de seca haverá necessidade da adaptação das práticas silviculturais (com a redução da densidade de plantio, diminuição das doses de fertilizantes, plantação de clones com maior eficiência no uso da água), para reduzir a demanda hídrica das plantações e, conseqüentemente, o risco de mortalidade (BATTIE LACLAU, 2013).

3.6 O gênero *Eucalyptus*

Este gênero de ocorrência natural na Austrália possui cerca de 600 espécies adaptadas às diversas condições de clima e solo. Dessa grande diversidade de espécies, só 2 não são originárias da Austrália: o *E. urophylla* e o *E. deglupta*, o primeiro originário do Arquipélago da Indonésia e Timor, o segundo originário do hemisfério norte (Nova Bretanha, Nova Guiné, Seram, Sulawesi e Mindanao). A maioria das espécies conhecidas são árvores típicas de florestas altas, com 30 a 50 m de altura e de florestas abertas, com árvores de 10 a 25 m de altura. Aproximadamente 30 a 40 espécies são arbustivas (MORA; GARCIA, 2000).

Segundo estes autores, na Austrália, desde 1788 já foram derrubados 38% das florestas nativas. Estima-se assim que, atualmente, existem 43,2 milhões de ha de florestas, sendo 25,6 milhões (60%) de eucaliptos. As espécies de eucaliptos mais utilizadas no mundo são o *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriodora*.

3.7 O *Eucalyptus grandis*

O *Eucalyptus grandis* é uma espécie nativa do Norte de Nova Gales do Sul e da costa sul de Queensland, na Austrália. Distribui-se, principalmente, entre as latitudes 26 a 32° Sul e altitudes de 0-300 m e se adapta muito bem em regiões com precipitação entre 1000 e 1750 mm e valores de temperatura médias máximas entre 29-32°C e médias mínimas entre 5 e 6 °C (FAO, 1981).

A madeira das árvores desta espécie é considerada medianamente leve e fácil de trabalhar em operações de usinagem, sendo considerada de baixa estabilidade dimensional e de elevada permeabilidade. É uma das espécies mais versáteis e indicadas para usos múltiplos apresentando, no entanto, problemas de empenamento, contrações e rachaduras nas operações de desdobro e de secagem.

As árvores desta espécie superam a de outras em incremento volumétrico em condições ambientais adequadas, sendo a mais plantada no Brasil, pela sua plasticidade genética, e muito utilizada na obtenção de híbridos e para clonagem de árvores selecionadas (MORA; GARCIA, 2000).

3.8 Periodicidade e crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus*: aplicação de dendrômetros e relações com variáveis climáticas

Uma extensa revisão sobre os dendrômetros feita por Drew e Downes (2009), indicando que são instrumentos para a medição do diâmetro do tronco das árvores, como o dendrômetro de contato com alta resolução espacial e/ou temporal; o de faixas possuem alta resolução espacial embora com baixa resolução temporal. Citam pesquisas utilizando estes instrumentos com alta precisão espacial de 0,005-0,038 milímetros na medição do incremento do tronco de árvores. Os autores mencionam que os dendrômetros de bandas ou faixas dendrométricas tem tendência a subestimar ou não avaliar o crescimento, ficando relativamente folgados no tronco das árvores; ainda, não oferecem precisão suficiente pelas fitas de aço sofrer dilatação térmica da variação climática, contraindo no inverno (frio) e dilatando no verão (calor) (MARCATI, 2000). Contudo, as faixas dendrométricas são muito utilizadas nas pesquisas para a avaliação do crescimento do tronco das árvores em inúmeros países do mundo (KNOOT, 2004).

A aplicação de faixas dendrométricas no tronco das árvores das espécies florestais tropicais e temperadas é abundante; para a avaliação do incremento do tronco das árvores de *Eucalyptus* em plantações florestais sua aplicação não é muito frequente, citando-se os trabalhos de Laclau et al. (2005), Sette Júnior (2010), Castro (2014) e Franco (2014), etc.

O crescimento e o desenvolvimento das árvores são função das variáveis do ambiente (DREW; DOWNES, 2009), influenciando na magnitude do incremento do tronco ao longo do ano; Castro (2014) destaca que as árvores de eucalipto sujeitas ao déficit hídrico severo apresentaram o menor valor de incremento do tronco (chegando a nulo), com o maior valor de incremento no verão (final da estação chuvosa), confirmando que a dependência de água é fator limitante do crescimento. Com isso, construiu um padrão de crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto com 2 períodos distintos de crescimento do tronco (i) baixo ou nulo no outono/inverno, pela limitação da precipitação e da temperatura, com a interrupção da atividade cambial e (ii) alto na primavera/verão pela retomada da atividade cambial e resposta à precipitação e a temperatura favoráveis.

Existe, portanto, um nítido comportamento do crescimento do tronco das árvores de eucalipto em resposta à sazonalidade climática registrada com precisão pelas faixas dendrométricas. As variáveis climáticas interagem com a fertilização, a irrigação e os tratamentos silviculturais (CASTRO, 2014; BATTIE-LACLAU et al., 2013) resultando em maior ou menor incremento do tronco das árvores de eucalipto em uma determinada estação do ano.

3.9 Densidade básica da madeira das árvores de *Eucalyptus*

A densidade da madeira é considerada a sua mais importante propriedade, determinando a sua qualidade, bem como sua utilização e conversão (HILLIS, 1978), sendo parâmetro para indicação do potencial da madeira para a qualidade do papel e rendimento da polpa (MIRANDA; ALMEIDA; PEREIRA, 2001). A densidade básica da madeira de eucalipto é uma propriedade complexa, pelas características xilema (lenho) com diferentes tecidos e células e variações anatômicas como, no comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular, além de materiais não estruturais, como os extrativos e as tiloses (GITHIOMI; KARIUKI, 2010).

A densidade básica da madeira pode ser definida como sendo a razão entre a sua massa absolutamente seca/volume verde ou saturado; é de fácil determinação e se correlaciona, normalmente, com o rendimento em peso e com as propriedades físicas e mecânicas da madeira (SOUZA et al., 1986; BRASIL; FERREIRA, 1972).

A variação da densidade básica da madeira responde às condições edafoclimáticas do sítio, principalmente em relação à disponibilidade de água no solo (SEARSON et al., 2004), temperatura (THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2004; THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2007), procedência e variação do sítio ((MIRANDA; ALMEIDA; PEREIRA, 2001), etc.

Os tratamentos silviculturais e a interação das árvores com as condições edafoclimáticas podem promover mudanças na densidade do seu lenho, com diversos autores reportando efeito dos fertilizantes minerais (CASTRO, 2014; RAYMOND; MUNERI, 2000; BARBOSA et al, 2014), e efeito do espaçamento (DEBELL; KEYES; GARTNER, 2001). Em árvores de eucaliptos, o efeito das variáveis climáticas e dos tratamentos silviculturais é, eventualmente, resultado da maior da taxa de crescimento das árvores e, conseqüente, redução da densidade da

madeira, embora esta correlação é débil (DEBELL; KEYES; GARTNER, 2001; KOJIMA et al., 2009c). Em árvores de *Eucalyptus grandis* a literatura relata que, em geral, a taxa de crescimento não impacta significativamente a densidade da madeira (KOJIMA et al., 2009b; KOJIMA et al., 2009c; MALAN, 1991; WILKINS; 1990; WILKINS; HORNE, 1991), e a densidade da madeira aumenta com a sua idade (GITHIOMI; KARIUKI, 2010).

A densidade do lenho varia significativamente no sentido longitudinal e radial do tronco das árvores (SETTE JUNIOR et al., 2012; LIMA; ROSADO; OLIVEIRA, 1992; ALZATE; TOMAZELLO FILHO; PIEDADE, 2005; TOMAZELLO FILHO, 1985b; TOMAZELLO FILHO, 2007); em nível da estrutura do lenho, estudos indicam que a sua densidade está estreitamente relacionada com as características anatômicas, principalmente com as dimensões das fibras (CARRILLO et al., 2015; WIMMER et al., 2002; QUILHÓ et al., 2006; RAYMOND; BANHAM; MACDONALD, 1998) e as dimensões dos vasos (SREEVANI; RAO, 2014; THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2005; SEARSON et al., 2004). A densidade varia também como as características químicas do lenho, incrementando sua densidade como a presença de extrativos no lenho (ONA et al., 1998).

3.10 Variação da densidade do lenho no tronco das árvores de *Eucalyptus*

Além do efeito dos fatores externos, a densidade do lenho varia nos planos longitudinal e transversal, em função da sua estrutura anatômica e pela deposição de substâncias químicas (WILKES, 1984). Panshin e Zeeuw (1970) indicaram em relação à variação longitudinal da densidade básica da madeira, (i) decrescente uniformemente com a altura, (ii) decrescente até certa altura e crescente até do tronco da árvore e (iii) crescente da base para o topo do tronco, sem padrão uniforme de variação; no tronco das árvores de eucaliptos, o segundo modelo é o mais frequente.

Em árvores de *Eucalyptus grandis*, se indica o decréscimo da densidade do lenho da base até 3 m de altura e aumento até o ápice do tronco (SETTE JÚNIOR et al., 2012); decréscimo da base até 25% da altura, e acréscimo até a extremidade do tronco (LIMA, 2005); decréscimo da base até o DAP, aumentando até o topo do tronco da árvore (ALZATE; TOMAZELLO FILHO; PIEDADE, 2005; LOPES, 2003).

No sentido radial, o modelo de variação indica o aumento da densidade do lenho em árvores de *Eucalyptus grandis* (TOMAZELLO FILHO, 1985b; SILVA et al., 2004; BENJAMIN, 2006). O modelo de variação radial da densidade aparente do lenho com maior detalhamento é determinado pela densitometria de raios X, com maior valor na região da medula, diminuindo nos primeiros centímetros, seguido de aumento gradativo e estabilização, em direção a casca (TOMAZELLO FILHO et al., 1985b; SILVA et al., 2004; ALZATE, 2004; SETTE JÚNIOR, 2010; CASTRO, 2014).

A variação da densidade básica média da madeira indica que seu aumento se relaciona com a idade das árvores, pelo aumento da porcentagem de madeira adulta (SILVA et al., 2004) e do processo de formação do cerne (WILKES, 1984). Sette Júnior et al. (2012) reportaram aumento da densidade básica da madeira de 0,43, 0,44 e 0,45 no tronco de árvores de eucalipto de 2, 4 e 5 anos; árvores de eucalipto de 3,5 anos, apresentou densidade básica média da madeira de 0,44 g.cm⁻³ (LIMA; ROSADO; OLIVEIRA, 1992), de 0,46 g.cm⁻³ em árvores de 8 anos (ALZATE; TOMAZELLO FILHO; PIEDADE, 2005) e de 0,46 g.cm⁻³ em árvores de 27 anos (LOPES, 2003).

3.11 Densidade aparente pelo método de densitometria de raios X

A densitometria de raios X possibilita a obtenção de radiografias de seção transversal delgada da madeira. A amostra de madeira exposta à fonte de raios X tem sua estrutura anatômica registrada em filme radiográfico, pelas diferenças da absorção dos raios X nos tecidos do lenho (AMARAL, 1994).

Em revisão sobre a densitometria de raios X de Parker e Kennedy (1973) menciona-se que a técnica de raios X foi desenvolvida por Polge em 1963, no Centro Nacional de Pesquisas Florestais, Champenoux, França, radiografando amostras cilíndricas de madeira (5 mm de espessura) e analisando a imagem radiográfica em microdensitômetro obteve o perfil radial de densidade aparente da madeira. Sardinha (1976) indicou que as amostras cilíndricas do lenho apresentavam dificuldade para manter a posição para a passagem dos raios X, além da variação da espessura do lenho, com possibilidade de erro no cálculo da densidade. Na sequência, outros laboratórios, como o Instituto de Pesquisas Florestais da Suíça, utilizaram a seção transversal de amostras de madeira com

espessura uniforme de 1,25 mm para as radiografias (LENZ; SCHAR; SCHWEINGRUBER, 1976).

Após os trabalhos de Polge, institutos de pesquisa e universidades de inúmeros países (Suíça, Alemanha, Austrália, Nova Zelândia, Inglaterra, Canadá, Japão, EUA, Brasil, etc.) iniciaram a aplicação da atenuação dos raios X na análise da madeira, painéis, etc., para a determinação da sua densidade aparente

As inúmeras aplicações da densitometria de raios X foram descritas por Polge (1966), como a avaliação da qualidade da madeira, a madeira de reação, o estudo da retratibilidade, do colapso e do recondicionamento da madeira, além da comparação dos perfis densitométricos da madeira de procedências de uma mesma espécie. No início, as informações das publicações referiam-se à técnica da densitometria de raios X em madeiras, com a descrição dos equipamentos, inovações dos laboratórios e, atualmente, sua extensa aplicação (AMARAL, 1994).

Assim, a densitometria de raios X é uma importante ferramenta para estudos de climatologia, hidrologia, ecologia e geomorfologia. Por exemplo, Polge (1966) estabeleceu que os perfis densitométricos são característicos do ano de formação dos anéis de crescimento – a densidade máxima e mínima anual, a densidade limite dos anéis de crescimento, etc. - permitindo distinguir o ano e a posições do lenho interior do tronco da árvore; ainda, encontrou uma relação direta dos anéis de crescimento com os fatores climáticos, com as curvas de variação da densidade aplicadas à dendrocronologia. Amaral (1994) indicou que o efeito as práticas silviculturais (fertilização, desbaste, irrigação, desrama, etc) pode ser avaliado pela densitometria de raios X, mostrando a variação da densidade entre e dentro dos anéis de crescimento.

Parker e Kennedy (1973) mostraram uma série de estudos usando a técnica de densitometria de raios X fornecendo inúmeras aplicações para a avaliação da estrutura e das propriedades da madeira, do efeito de práticas silviculturais e da biologia do crescimento das árvores.

Em estudos de Tomazello Filho et al. (2008) mostraram que a determinação de densidade aparente por densitometria de raios X permite avaliar o efeito da deterioração do lenho das árvores de eucalipto por fungos de podridão branca, detectar o limite do cerne-alburno, o efeito do manejo florestal nas propriedades do lenho e determinar a produção anual da biomassa de lenho e a relação com a sua estrutura anatômica. Oliveira (1997) afirmou que a técnica permite medir a variação

da densidade da madeira em pequenas distâncias, impossível pelo método gravimétrico convencional, obtendo-se gráficos do padrão de variação radial da densidade e proporcionando a avaliação do desenvolvimento das árvores e a seleção com madeira de densidade mais uniforme ou mais elevada.

3.12 Efeito da fertilização potássica e sódica na densidade básica da madeira

Algumas pesquisas foram realizadas avaliando o efeito da fertilização com K e Na na densidade básica do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, principalmente no Brasil. Em árvores de *Eucalyptus grandis* de 3 anos, o K e Na diminuem a densidade do lenho, sendo equivalente entre eles (CASTRO, 2014); o mesmo resultado foi obtido com árvores de 4 anos (SETTE JÚNIOR, 2010; SETTE JÚNIOR et al., 2014). Da mesma forma, em árvores de eucalipto de 8 anos, o K e Na não mostraram efeito na densidade do lenho (FRANCO, 2014).

O efeito de fertilizantes minerais como N, P e o NPK na densidade da madeira foi analisado, com o N e o P não mostrando efeito (WILKINS; HORNE 1991; DEBELL; KEYES; GARTNER, 2001), pequeno incremento (WILKINS 1990; VIGNERON et al., 1995; CROMER et al., 1998), ou redução da densidade (ASSIS, 2013). O efeito isolado da fertilização com N, P, ou NP não é determinante com o efeito significativo destes fertilizantes na densidade básica do lenho das árvores se expressando em interação com a precipitação; em sítios mais secos a fertilização com NP atua em detrimento da densidade básica do lenho das árvores (RAYMOND; MUNERI, 2000). Portanto, o resultado das pesquisas sobre o efeito dos fertilizantes minerais não indica consenso em relação à densidade do lenho das árvores de eucalipto.

3.13 Efeito da disponibilidade hídrica na densidade básica da madeira das árvores de *Eucalyptus*

Diversos estudos demonstram o efeito da disponibilidade hídrica na densidade do lenho de árvores de eucalipto; o aumento da densidade do lenho é associado com a diminuição da disponibilidade de água em árvores de *E. globulus* (WIMMER; DOWNES; EVANS, 2002; DOWNES et al., 2006; DREW et al., 2009), *E. nitens*

(BEADLE et al., 2001) e de *E. grandis* (NAIDOO; ZBOŇÁK; AHMED, 2006; NAIDOO et al., 2007); outros estudos não encontraram relação do estresse hídrico com a densidade de árvores de *E. globulus* em solos salinos (MACFARLANE; ADAMS, 1998; CATCHPOOLE; DOWNES; READ, 2000). Searson et al. (2004) avaliando o efeito da limitação da água na densidade do lenho de mudas de eucaliptos encontraram resultados não consistentes; a limitação de água pode (ou não) afetar a densidade do lenho das plantas.

No Brasil, as pesquisas de campo não evidenciaram efeito significativo da densidade do lenho de árvores de *E. grandis* de 3 anos, com redução da disponibilidade hídrica, com a exclusão artificial de 37% da precipitação (CASTRO, 2014). A disponibilidade hídrica pode ter efeito na interação com a fertilização, em sítios de menor precipitação, com a fertilização podendo induzir um decréscimo da densidade do lenho das árvores de eucalipto (RAYMOND; MUNERI, 2000). Com a disponibilidade de água no solo ocorre o estímulo do crescimento do tronco das árvores de eucalipto, podendo afetar a formação do lenho tardio (mais denso); assim a razão do lenho tardio/inicial aumenta ou diminui a densidade do lenho. Os resultados indicam que, de modo geral, a maior disponibilidade hídrica apresenta maior probabilidade de alterar as propriedades do lenho, em relação às demais práticas silviculturais (GONÇALVES et al., 2004b).

3.14 Características anatômicas do lenho das árvores de *Eucalyptus*

As propriedades anatômicas do lenho constituem índice de qualidade com a composição química e propriedades físicas e, desta forma, relacionadas com as suas propriedades (BOWYER; HAYGREEN, 2007). Segundo Zobel e Buijtenen (1989) as características anatômicas do lenho variam entre e dentro do tronco das árvores, sendo controladas geneticamente e com alterações em resposta às práticas silviculturais. Panshin e De Zeeuw (1970) e Tsoumis (1991) explicam que a variação do comprimento das células do lenho das árvores representa 2 fases, (i) inicial ou período juvenil, sendo o lenho envolvendo a medula, com mudanças fundamentais na composição da parede das células, associadas ao período de maturação cambial, com rápido aumento do comprimento das células e (ii) posterior ou período adulto, com câmbio maduro, formando células com comprimento variando nos anéis de crescimento e, em consequência, resultando em lenho de maior estabilidade.

Nas árvores de eucalipto os padrões de variação e as características das células do lenho foram corroborados em inúmeras pesquisas, com as características anatômicas do lenho variando entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e partes do tronco das árvores, no sentido longitudinal e radial.

Em árvores de para *Eucalyptus grandis* e *E. saligna* de 10 anos, Tomazello Filho (1985b) indicou um aumento na direção radial do comprimento e largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras e aumento no diâmetro tangencial e uma diminuição na frequência dos vasos, como modelo de variação. Brasil e Ferreira (1972) indicaram, anteriormente, a mesma tendência de variação radial para comprimento e a espessura das fibras, contudo, com decréscimo do diâmetro do lume. Outro estudo, com árvores de *E. saligna* de 7 anos, Florsheim et al. (2000) constataram que o comprimento, diâmetro e espessura da parede das fibras foram crescentes no sentido radial, com o diâmetro do lume com tendência inversa; o comprimento e diâmetro tangencial dos vasos foram crescentes e a sua frequência foi decrescente. Rocha et al. (2002) verificaram a variação radial da anatomia da madeira de árvores de *E. grandis* com 7 anos, pelo aumento das dimensões das fibras, do comprimento e diâmetro tangencial dos vasos e redução da frequência dos. Resultados similares foram obtidos por Batista et al. (2003, apud, ROCHA; FLORSHEIM; COUTO, 2004) e Sette Junior et al. (2009) para a madeira de árvores de *E. grandis*.

No sentido longitudinal do tronco de árvores de *E. saligna* de 7 anos, Florsheim et al. (2000) constataram maior valor das dimensões das fibras ao 25% da altura comercial e o maior comprimento e a frequência dos vasos no topo das árvores.

Os elementos anatômicos do lenho das árvores de eucalipto têm dimensões aproximadas de acordo com a literatura; para o *E. grandis* aos 16 anos, Brasil e Ferreira (1972) indicaram valor médio de 1,3 mm, 5,0 e 7,7 μm para o comprimento, espessura da parede das fibras e diâmetro do lume, respectivamente; Barrichelo e Brito (1976) em madeiras de espécies de eucalipto, indicaram comprimento das fibras de 0,75-1,30 mm, espessura da parede de 2,5-6,0 μm e diâmetro do lume de 6,0-10 μm ; Tomazello Filho (1985a) para a madeira de árvores de *E. grandis* de 10 anos, os vasos têm diâmetro tangencial de 53-161 μm ; o comprimento das fibras de 0,89-1,52 mm, largura de 17,0-33,5 μm , espessura da parede de 5,0-6,0 μm e o diâmetro do lume de 7,0-23,0 μm ; Alzate (2004) para árvores de *E. grandis* com 8

anos verificou camadas de crescimento distintas e demarcadas por fibras de parede espessa, de 1,03 mm de comprimento, 20,99 μm largura, diâmetro de lume 9,58 μm e espessura da parede de 5,7 μm .

3.15 Cerne e albarno no tronco das árvores de *Eucalyptus*

No tronco das árvores de eucalipto, o albarno constitui a sua região externa, fisiologicamente ativa e responsável pela condução da água e sais minerais da raiz até a copa e pelo armazenamento das reservas. Sua estrutura anatômica é constituída pelas células do xilema recentemente formadas (HILLIS, 1987; DESCH; DINWOODIE, 1996). Embora a maioria das células do albarno esteja morta, as do parênquima radial permanecem funcionais por algum tempo e são ativas nos processos fisiológicos, como na respiração e assimilação, formando tecidos de cicatrização ou compostos químicos (resinas, gomas, etc.) em resposta ao ferimento do tronco das árvores.

No tronco das árvores de eucalipto, o cerne constitui a sua região interna, fisiologicamente inativa e constituída por células mortas; os compostos de reserva (amido) foram removidos e ocorre o acúmulo (deposição) de produtos do metabolismo secundário no lúmen e na parede das suas células. Esses produtos orgânicos são denominados extrativos e seu acúmulo resulta, geralmente, na coloração mais escura do cerne (HILLIS, 1987; DESCH; DINWOODIE, 1996).

O processo de formação do cerne e os fatores que o influenciam foram estudados nas 6 últimas décadas, sendo muito complexo e não está totalmente explicado (BUCHANAN; GRUISSEM; JONES, 2000). As teorias iniciais consideram como o processo de envelhecimento natural das árvores com a, conseqüente, morte das células do parênquima (CHATTAWAY, 1952; FREY-WYSSLING; BOSSHARD, 1959); com a formação do cerne inicia-se uma gradual alteração funcional-química das células da região interna do albarno, até a perda de suas funções na zona de transição (KRAMER; KOZLOWSKI, 1960; DESCH; DINWOODIE, 1996).

Neste aspecto, Bamber (1976) contextualizou que a formação do cerne é um processo natural no desenvolvimento das árvores, destacando que a morte e alteração das células do parênquima radial são o resultado e não a causa da formação do cerne. O autor considera esta hipótese, pela avaliação da parede

celular, formação das tiloses no lume dos vasos, produção de polifenóis nas células do parênquima radial e, em seguida, pela reabsorção da reserva de carboidratos nas células do parênquima radial e a cessação do transporte ascendente de seiva mineral; ainda, Bamber (1976) propôs a teoria da formação do cerne pelo controle dos hormônios produzidos pelas células do parênquima na área do córtex do tronco; esses hormônios são transportados pelas células dos raios para o interior do lenho, atingindo a região da medula, onde se inicia o processo de acúmulo, a transformação da região do alburno em cerne ocorre quando atinge certo nível de concentração de hormônios.

No processo de transformação do alburno em cerne ocorre a translocação dos compostos orgânicos, similar ao da senescência das folhas, quando os compostos de reserva (ex.: amido, açúcares solúveis, aminoácidos e elementos minerais translocáveis N, P, K) são removidos do alburno senescente para o mais jovem, ativo fisiologicamente (HILLIS, 1987; BAMBER; FUKAZAWA, 1985; BAMBER, 1976; MEETRS, 2002).

No lenho das árvores de eucalipto, Bamber (1987) descreve no processo de formação do cerne, que as tiloses ocorrem no lenho de espécies com pontoações largas, causando o bloqueio dos vasos pelo crescimento das células do parênquima adjacentes pelas pontoações com estrutura similar a um balão no interior dos vasos. Por outro lado, Hillis (1980) considerou que a formação do cerne é devida aos 2 fatores, sendo o *temporal*, com o declínio gradual do metabolismo das células do parênquima na região do alburno como resultado do envelhecimento, e o *espacial*, considerando a distância dessas células e a parte ativa do tronco.

Como resultado dos complexos processos da transformação do alburno em cerne, Hillis (1968, 1980, 1987) destaca as diferenças existentes entre as duas regiões do lenho, como o aumento da quantidade de extrativos fenólicos da medula até o limite do cerne, com menor quantidade no alburno, contribuindo com distinta diferença na coloração. Ainda, Hillis (1965) reporta que as principais características da formação do cerne no lenho das árvores são (i) perda do núcleo das células do parênquima, (ii) incremento do teor de extrativos e (iii) diminuição do teor de umidade; o valor de pH é inferior no cerne em relação ao alburno, pela presença de compostos ácidos nos extrativos, podendo atingir em eucaliptos valor de pH inferior a 3 (HILLIS, 1987).

A diferença das características químico-físicas do cerne e do alborno reflete no uso final da madeira e Hillis (1965; 1978) relata que os extrativos aumentam o consumo de produtos químicos no processo de polpação e reduz o rendimento da polpa; a coloração escura, geralmente, associada ao cerne diminui, também, a alvura da polpa.

A quantificação das regiões do cerne e do alborno no lenho do tronco das árvores de eucalipto tem sido apresentada na literatura. A % de cerne na seção transversal do lenho diminui da base até o topo do tronco das árvores (WILKINS, 1991; GOMINHO; PEREIRA, 2000; GOMINHO et al., 2001; MIRANDA et al., 2006; MORAIS; PEREIRA, 2007); o volume de cerne representa, de modo geral, mais do 1/3 do volume do tronco. Em árvores de *E. globulus* de 9 anos, em Portugal, o verificou-se o cerne até 60-75% da altura do tronco e com variação de 40 a 10% da base até 55% da altura do tronco, com o volume de cerne de 33% do tronco das árvores (GOMINHO; PEREIRA, 2000). Em árvores de *E. globulus* de 12-15 anos, o cerne ocorre até 82-87% da altura do tronco, ocupando 51-10% da seção transversal da base até 65% da altura do tronco e volume de 39% do tronco (MORAIS; PEREIRA, 2007); em árvores de eucalipto mais velhas, de 18 anos, o cerne ocorreu até 90% da altura do tronco, variando de 78-7% da base até o seu topo, constituindo 65,6% do seu volume. Em árvores de *E. urograndis* de 5,5 anos, o cerne ocorreu até 65% da altura, variando de 51-18% e ocupando 38% do volume (GOMINHO et al., 2001).

Em geral os estudos indicam uma correlação positiva entre o conteúdo de cerne e o crescimento e a idade das árvores de eucalipto (HILLIS, 1972, HILLIS, 1987; BAMBER; FUKAZAWA, 1985; MORAIS; PEREIRA, 2007; MIRANDA et al., 2006).

Em relação ao efeito da fertilização e o regime hídrico na quantidade de cerne no tronco das árvores de eucalipto há poucos trabalhos; Miranda et al (2006) obtiveram para árvores de *E. globulus* fertilizadas com Na, K e P e com irrigação artificial (capacidade de campo de solo mínimo de 80%) um volume de cerne de cerca de 10% maior em relação às árvores controle, sem fertilização e irrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local da experimentação

O experimento foi instalado em 20 de junho de 2010, pelo convênio do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e o Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento (CIRAD) /França, na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP (Figura 1). O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo Köeppen, 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 (200 g kg⁻¹ de argila) 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), citados por Almeida (2009).

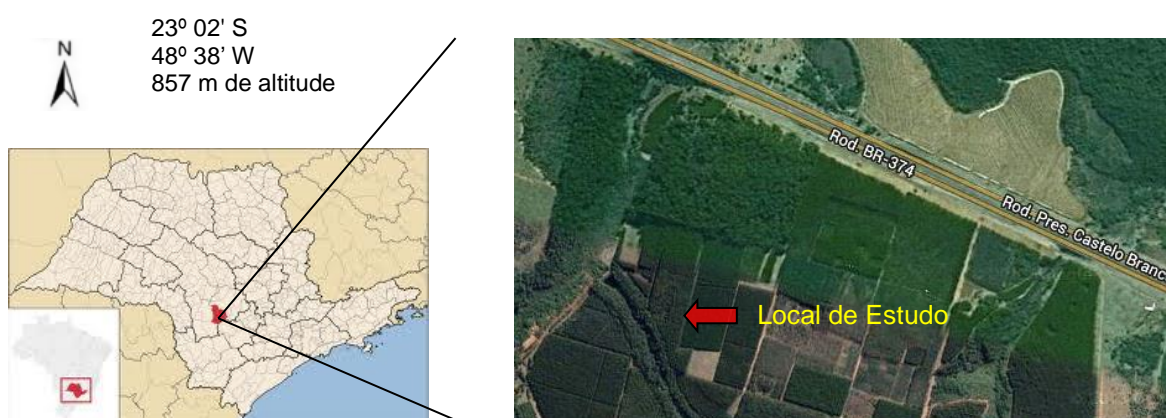


Figura 1 - Local de estudo no Horto Experimental de Itatinga/SP (Castro, 2014)

4.2 Plantio e delineamento experimental

O corte da última plantação de árvores de *E. grandis* ocorreu 3 meses antes da implantação do experimento para a redução de chuva, o qual foi feito no dia 20 de junho de 2010. Aproximadamente 50% dos resíduos vegetais que poderiam conter quantidades de K foram retirados do solo. O plantio das mudas de *E. grandis*, provenientes de um clone da empresa Suzano Bahia Sul, foi realizado no espaçamento de 3 x 2 m, em covas abertas no meio do espaço entre os tocos, na

linha do cultivo anterior. As parcelas experimentais foram compostas por 144 plantas (12 linhas com 12 plantas por linha). No mínimo, 2 linhas externas serviram de bordadura, de modo que cada unidade experimental fosse constituída pelas 36 plantas centrais. A fertilização básica descrita por Battie-Laclau (2014) (não limitante para o crescimento das árvores), realizada no plantio, foi constituída por 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Super Fosfato Simples), 80 kg ha⁻¹ de N (NH₄(SO₄)₂) e 20 kg ha⁻¹ de FTE BR-12 (12 micronutrientes), dispostos em covas ao lado das mudas, e 2000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, distribuídos a lanço sem incorporação. A fertilização potássica (4,5 kmol ha⁻¹ de K ou 335 kg ha⁻¹ de KCl a lanço) e a instalação das calhas para excluir a chuva foram realizadas no dia 1º de outubro de 2010, 3 meses após o plantio, quando as mudas cresceram acima das calhas, para não afetar o crescimento dos galhos laterais. O delineamento experimental é do tipo parcelas subdivididas em blocos conhecido também como *Split-plot* com 3 blocos e 6 tratamentos, totalizando 18 subparcelas (Figura 2). Os tratamentos foram definidos por 2 fatores: 1º **Fator-regime hídrico**, com 2 níveis: 100% das chuvas (+A) e 63% das chuvas (-A), com exclusão parcial artificial do 37% da precipitação por 1700 m² de lonas em polietileno); 2º **Fator - fertilização**, com 3 doses de fertilizantes: sem fertilização adicional=controle (C); 4,5 kmol/ha de sódio (Na) na forma NaCl, e 4,5 kmol/ha de potássio (K) na forma de KCl, não limitantes para o crescimento do eucalipto nessa área (ALMEIDA et al.,2009), aplicados 3 meses após o plantio.

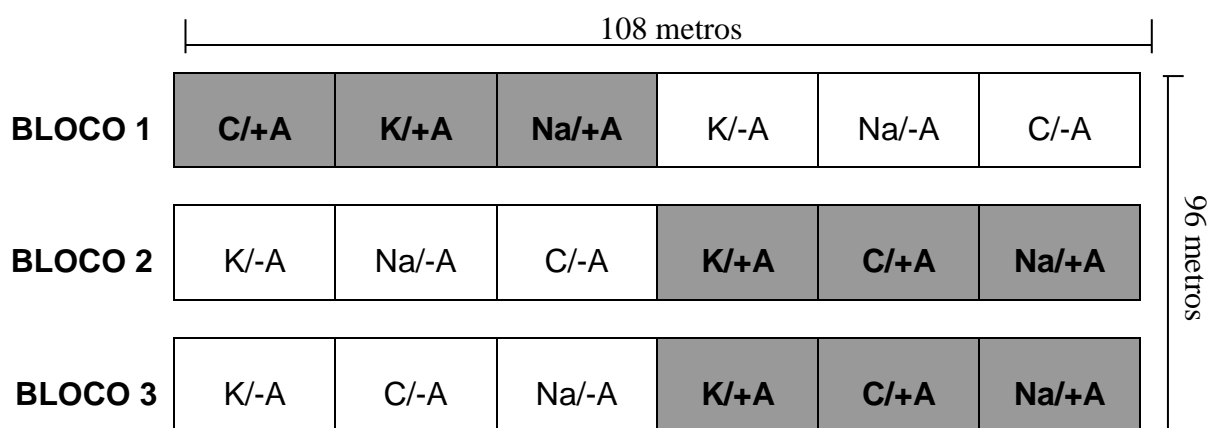


Figura 2 – Croqui do delineamento experimental (“*Split plot*”) ilustrando os três blocos, com as 18 subparcelas contendo os seis tratamentos de fertilização e regime hídrico (CASTRO, 2014)

No delineamento “*Split-plot*”, para cada bloco, primeiro foram sorteados os níveis de regime hídrico (100 e 63% de chuvas) e na sequência, os sorteios dos níveis de fertilização (controle, K e Na) (Figura 4). Os tratamentos foram

identificados da seguinte maneira: **C/+A**: controle + 100% de chuva; **Na/+A**: sódio + 100% de chuva; **K/+A**: potássio + 100% de chuva; **C/-A**: controle + 63% de chuva; **Na/-A**: sódio + 63% de chuva; e **K/-A**: potássio + 63% de chuva).

O regime hídrico de 63% de chuva foi realizado com exclusão artificial de 37% da precipitação mediante 1700 m² de lonas em polietileno transparente, formando calhas de 37 cm de largura e cobrindo 37% da superfície do solo. De modo a garantir um declive suficiente para excluir 37% das águas de chuva e para reduzir o efeito das calhas sobre a superfície do solo, instalaram-se as faixas sobre estacas de 1,5 m a 0,30 m de altura (Figura 3). Aproximadamente a cada 15 dias era realizada a limpeza de folhas sobre as lonas.

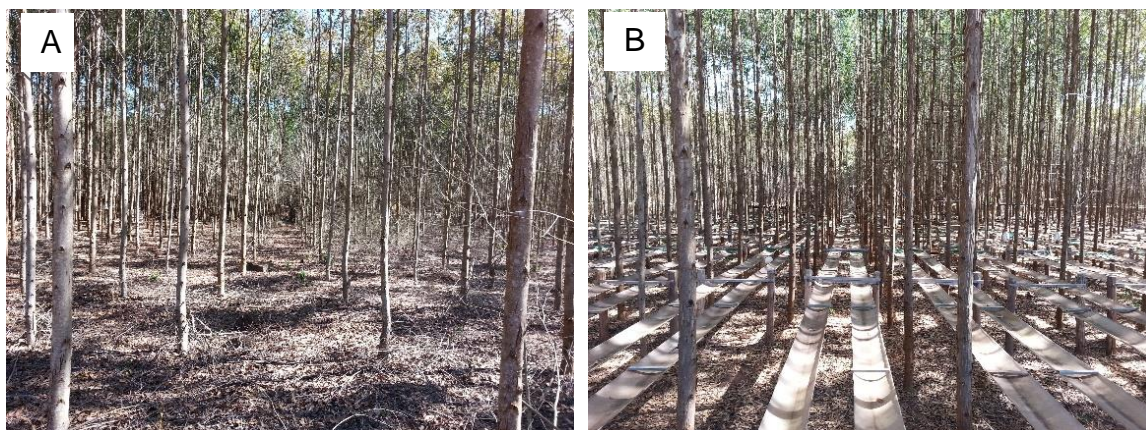


Figura 3 - Plantação experimental das árvores de *E. grandis*, no 58º mês. (A) Parcela sem exclusão de chuva; (B) parcela com exclusão de 37% de chuva

4.3 Crescimento em diâmetro e altura, e incremento corrente quinzenal no diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*

A avaliação do crescimento em diâmetro no DAP e altura das árvores foi realizada a cada 6 meses, em todas as plantas das parcelas amostrais (36 árvores da área útil das parcelas, sem as linhas de bordadura) medindo-se com seu diâmetro na altura do peito (DAP) com fita métrica metálica, e sua altura total com hipsômetro (base do fuste até a última folha). Além avaliou-se o incremento em diâmetro do tronco a altura do peito (DAP) a cada 15 dias, mediante faixas dendrométricas ou dendrometros de banda, instaladas em 3 árvores de eucalipto/subparcela, sendo 9 árvores por tratamento (total de 54 árvores); as árvores de eucalipto utilizadas para esta avaliação corresponderam às localizadas na 1ª linha da plantação da parcela útil, optando-se por árvores intercaladas e com

boas condições de sanidade. As faixas dendrométricas foram confeccionadas de acordo com a metodologia descrita por Botosso e Tomazello Filho (2001): fitas de aço inoxidável de 12,7 x 0,15 mm (largura e espessura), com escala em mm e nônio com precisão de leitura de 0,2 mm, mantidas sob tração por uma mola de aço inoxidável de 100 x 8 mm (comprimento e diâmetro) no tronco das árvores. Para a obtenção do comprimento total das faixas dendrométricas determinaram previamente a circunferência do tronco na altura do DAP das árvores, incluindo-se + 17 cm (referente à sobreposição da escala e do nônio). As graduações da escala de nônio estão demarcadas na fita de aço através de gabarito (Figura 4C) com duas placas metálicas: (i) na borda inferior, com escala de leitura de graduação de 80 mm e (ii) na borda superior, com escala de 10 divisões do nônio (Figura 4B). Assim a mensuração do incremento em diâmetro das árvores de eucalipto foi realizada medindo deslocamento das escalas sobrepostas das faixas dendrométricas, aproximadamente a cada 15 dias, no período da manhã (8:00-10:00h) e em um mesmo percurso. Os dados foram registrados durante o período de outubro 2013 (40° mês de idade) a Julho de 2015 (61° mês de idade) fazendo um total de 21 meses de avaliação. Além foi utilizado os dados de incremento do diâmetro anteriores a outubro de 2013, da avaliação feita por Castro (2014) visando a continuidade da pesquisa.



Figura 4 - Confeção e instalação da faixa dendrométrica no tronco da árvore. (A) faixa dendrométrica no tronco da árvore, (B) sobreposição da escala e do nônio, (C) gabarito para gravação da escala e do nônio, (D) detalhe da faixa dendrométrica com a escala e a mola. Adaptado de Sette Junior (2010) e Castro (2014)

4.4 Variáveis climáticas e sua relação com o crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*

Os valores da temperatura média, máxima e mínima (°C) e da precipitação (mm) foram coletados, diariamente, no período de avaliação do experimento na Estação Meteorológica Automática de 22 m de altura, localizada a 50 m do experimento. Os valores dos dados climáticos foram agrupados, em precipitação acumulada e média da temperatura média, mínima e máxima diária, dos dias acontecidos entre a mensuração do incremento do diâmetro do tronco das árvores entre uma data e outra, com a finalidade de relacionar a precipitação e temperatura, com os incrementos correntes do diâmetro do tronco, mediante análise de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$), de modo a determinar a influência das variáveis climáticas no crescimento em diâmetro do tronco, e detectar interações entre as variáveis climáticas e os efeitos dos tratamentos aplicados.

4.5 Conteúdo volumétrico de água no solo e relação com o crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* e variáveis climáticas

O conteúdo volumétrico de água no solo (Water volumetric content-WVC) fornecido por Jean-Paul Laclau (comunicação pessoal), foi medido semanalmente no Bloco 1, de forma automática usando um datalogger, para cada parcela dos tratamentos, com 3 repetições de sensores de umidade do solo (TDR Mintrase, Soil moisture USA), instalados nas profundidades de 15, 50, 100, 150, 300, 450 e 600 cm no perfil do solo, 1 mês antes do corte do povoamento anterior. Para facilitar as avaliações, os WVC foram agrupados em 2 profundidades 0,15-1,5 m e 3- 6 m. Posteriormente, de igual forma que os dados climáticos, os dados do conteúdo volumétrico de água no solo (WVC) foram agrupados em médias das leituras tomadas no período entre a mensuração do incremento do diâmetro do tronco das árvores e a seguinte; com a finalidade de relacionar o WVC com o incremento em diâmetro do tronco das árvores, ao longo do período de avaliação, mediante a análise de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$), visando (i) determinar a influência do WVC no crescimento em diâmetro do tronco, (ii) detectar a interação entre o WVC e o efeito dos tratamentos, assim como (iii) avaliar o efeito do WVC no solo pelas

exigências hídricas das árvores de eucalipto. Além, foi realizada a análise de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$) com a precipitação para avaliar recarga de água no solo em função da precipitação, bem como a correlação de defasagem da resposta do WVC à precipitação, em períodos de Lag (-1) (atraso de 15 dias) e Lag (-2) (atraso de 30 dias) para a avaliação do tempo de atraso da recarga do solo, quando ocorrem os eventos de chuva.

4.6 Amostragem destrutiva do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*: caracterização anatômica e determinação da densidade do lenho

Foram amostradas 8 árvores de eucalipto/tratamento aos 47^o meses e 9 árvores/tratamento na idade de 58^o meses, em um total de 48 e 54 árvores amostradas, respectivamente. A amostragem destrutiva do 47^o e 58^o mês foi utilizada para o cálculo do volume das árvores, e as do 47^o mês para a caracterização anatômica e densidade do lenho, mesmo como para o cálculo da % de cerne e alburno. A seleção das árvores foi segundo as classes diamétricas definidas (1 árvore/classe diamétrica) a partir dos inventários prévios das árvores das parcelas uteis.

4.7 Determinação do volume do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*

O volume do tronco das árvores de eucalipto nos diferentes tratamentos foi determinado sem casca; no cálculo do volume do lenho sem casca foi aplicada a cubagem rigorosa do tronco das árvores de eucalipto utilizando o método de Smalian, conforme Machado e Figueiredo (2006). Foi calculado o volume do tronco de 8 árvores de eucalipto/tratamento no 47^o mês e 9 árvores/tratamento no 58^o mês, em um total 48 e 54 árvores, respectivamente.

4.8 Densidade do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*

4.8.1 Densidade básica do lenho

Do DAP do tronco das 48 árvores de eucalipto com 47^o mês, foram cortados toretes de lenho (50 cm, comprimento); de cada torete foram cortadas seções

transversais (discos de lenho, 3 cm de espessura), demarcadas e cortadas quatro seções e selecionadas duas seções amostrais de lados opostos livres de defeitos. Em seguida, as seções amostrais do disco de lenho foram imergidas em água (saturação, 30 dias aprox.) seguindo-se a obtenção da sua massa úmida e imersa. Os corpos de prova do lenho foram secos em estufa ($103 \pm 2^\circ\text{C}$) determinando-se a sua massa e o valor da densidade básica do lenho pelo método da balança hidrostática (Figura 5) conforme a ABNT NBR 11941.

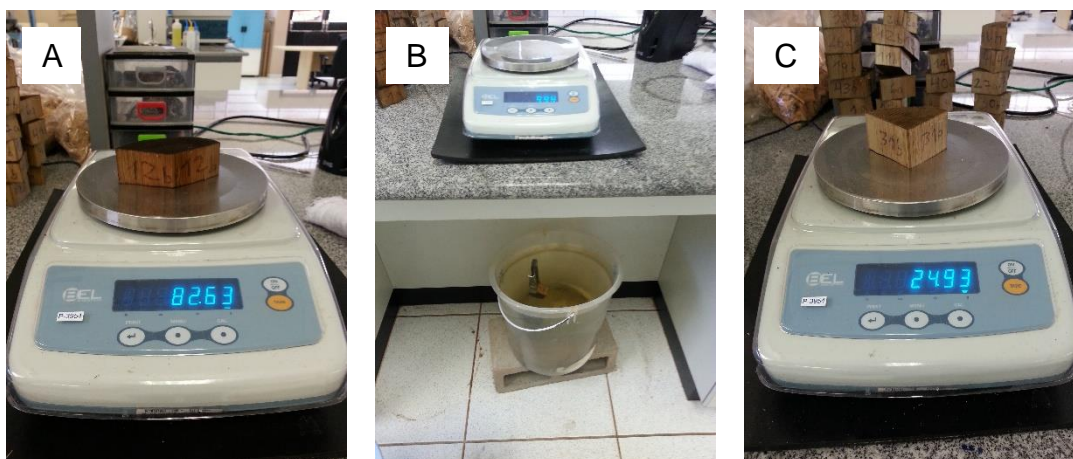


Figura 5 – Determinação da massa (A) saturada, (B) saturada imersa e (C) seca das amostras do lenho das árvores de eucaliptos

4.8.2 Densidade aparente do lenho das árvores de *Eucalyptus* por densitometria de raios X

Do disco do lenho do DAP do tronco das 48 árvores de eucalipto, no 47º mês, foram cortadas seções transversais (3 cm, espessura) (Figura 6A) e em seguida, demarcadas e cortadas amostras diametrais do lenho (20x10 mm, largura x espessura) (Figura 6C) e coladas em suportes de madeira (Figura 6D). Em equipamento de dupla serra circular paralela foram seccionadas amostras transversais do lenho (2,0 mm, espessura, sentido perpendicular às fibras) (Figura 6D) e acondicionadas em câmara de climatização (20°C, 24h, 60% UR) atingindo 12-15% de umidade (Figura 6E). Posteriormente, as amostras do lenho das árvores de eucalipto foram fixadas em suporte metálico e transferidas para a câmara de irradiação do equipamento de raios X (QMS, modelo QTRS-X) e escaneada em um feixe colimado de raios X. Os valores de intensidade de raios X que atravessam a amostra do lenho foram transformados em densidade aparente através do software QMS (Figura 6F). Os valores pontuais de densidade foram observados na tela do monitor, simultaneamente ao processo de escaneamento pelo feixe de raios X,

construindo o perfil radial de densidade aparente do lenho juntamente com a imagem da seção transversal do lenho. Os valores radiais de densidade aparente do lenho, obtidos pelo software QMS, originaram um arquivo DAT (com valores pontuais de densidade aparente do lenho a cada 80 μm). Na sequência, o arquivo DAT foi lido pelo software Excel, construindo-se os perfis radiais de densidade aparente do lenho, dos quais foram determinadas as densidades aparente média, máxima e mínima.

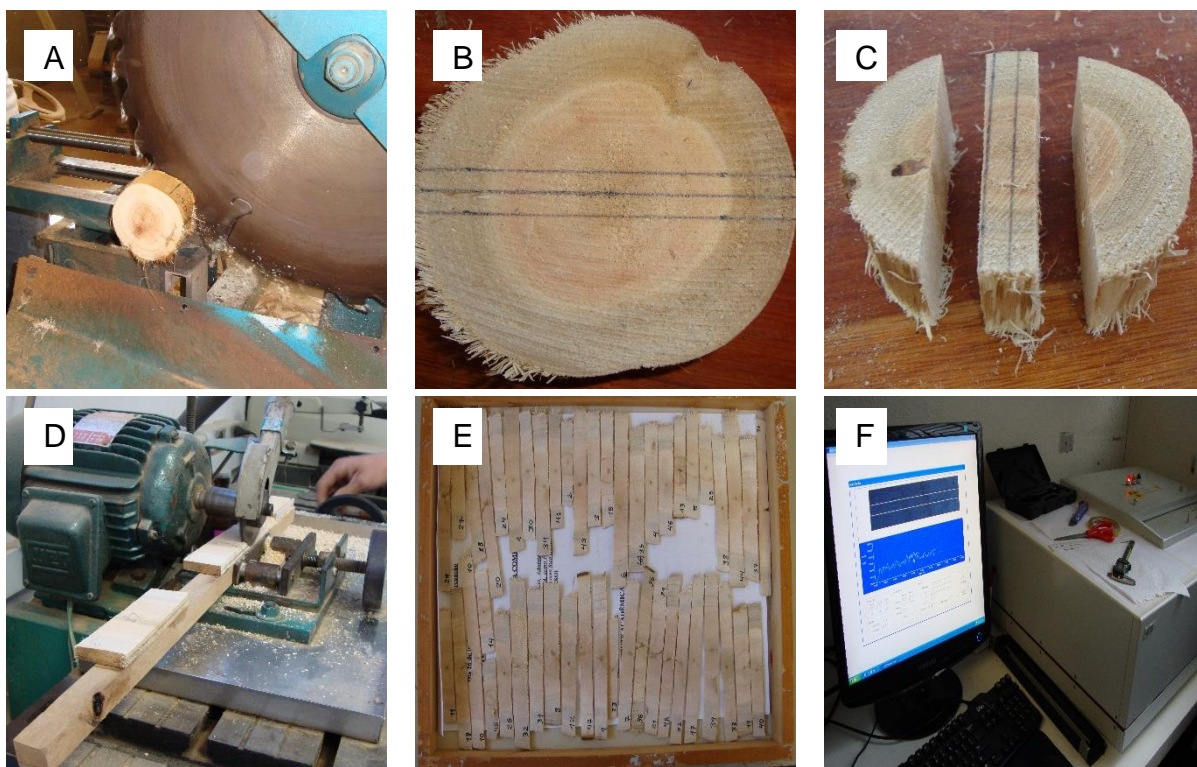


Figura 6 - Preparo de amostras do lenho das árvores de eucalipto para a análise por densitometria de raios X. (A) corte da seção transversal de disco do lenho; (B) demarcação da amostra diametral (1 cm, largura); (C), corte da amostra diametral do lenho; (D) corte das amostras transversais do lenho, coladas no suporte de madeira; (E), amostras do lenho (2 mm, espessura) para acondicionamento (12%, umidade); (F) escaneamento das amostras do lenho no equipamento de raios X

4.9 Características anatômicas do lenho das árvores de *Eucalyptus*

4.9.1 Dimensões dos vasos do lenho das árvores de *Eucalyptus*

Das amostras diametraais do lenho (20x10 mm, largura x espessura) cortadas dos discos do lenho do DAP do tronco das árvores, utilizadas na análise da densidade aparente, foram cortados corpos de prova (20x10x10 mm), em 2 posições radiais (50 e 100% do raio); os corpos de prova foram imersos em água em ebulição para a saturação e amolecimento, fixados em micrótomo de deslize e cortadas

seções transversais (15-20 μm de espessura). Os cortes histológicos do lenho foram clarificados (água cãndida, 1:1), lavados (água destilada, ácido acético 1%), desidratados (série alcoólica, 30-100%), lavados (xilol) e montadas (sob lamínula, bálsamo de Canadá) as lâminas histológicas (JOHANSEN, 1940; SASS, 1951). Das seções transversais do lenho foram coletadas imagens digitais em microscopia de luz com 100x de aumento para a mensuração do diâmetro dos vasos, e 25x de aumento para medição da frequência dos vasos mesmo como a % de vasos, aplicando o programa *Image Pro Plus* (Figura 7). Coletaram-se tantas imagens como necessárias para cobrir uma seção radial inteira do corpo de prova. O diâmetro tangencial e a % dos vasos foram calculados pela medição automática e a área dos vasos relacionada com a área total; a frequência dos vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) pela contagem dos vasos em áreas opostas das imagens (50% da área). O diâmetro, % de área e a frequência dos vasos/ mm^2 foram relacionados com os tratamentos de fertilização x regime hídrico e com a densidade básica da madeira do lenho do tronco das árvores.

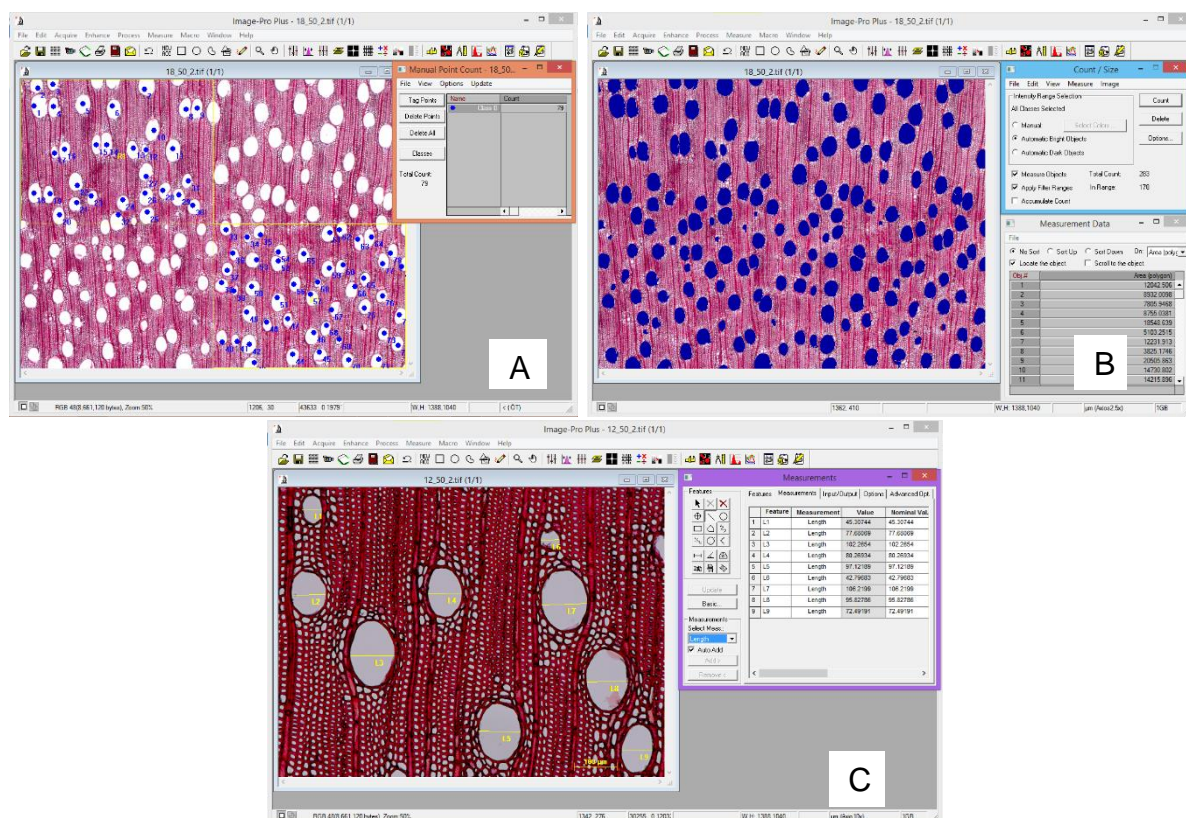


Figura 7 – Avaliação dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com o software *Image Pro Plus*, (A) frequência dos vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$), (B) área de vasos, (C) diâmetro tangencial dos vasos

4.9.2 Dimensões das fibras do lenho das árvores de *Eucalyptus*

Na face radial dos corpos de prova de madeira foram cortados segmentos do lenho e submetidos à maceração pelo método Franklin (JOHANSEN, 1940), transferindo-os para tubos de ensaio (ácido acético e peróxido de hidrogênio 120 vol, 1:1) fechados e mantidos em estufa (60°C, 48 h) para a dissociação das células; retirada a solução macerante, e lavadas as células dissociadas em água destilada, coradas em safranina e montadas com glicerina em lâminas de vidro; as lâminas foram examinadas sob microscopia de luz coletando-se 40-50 imagens para a mensuração do comprimento (100x), e 30-40 imagens para largura, diâmetro do lume e espessura de parede (400x) das fibras, por cada corpo de prova. Na mensuração das dimensões das células foi utilizado o programa *Image Pro Plus*, previamente calibrado previamente para cada aumento (Figura 8). As dimensões das fibras foram relacionadas com os tratamentos e com a densidade básica do lenho das árvores.

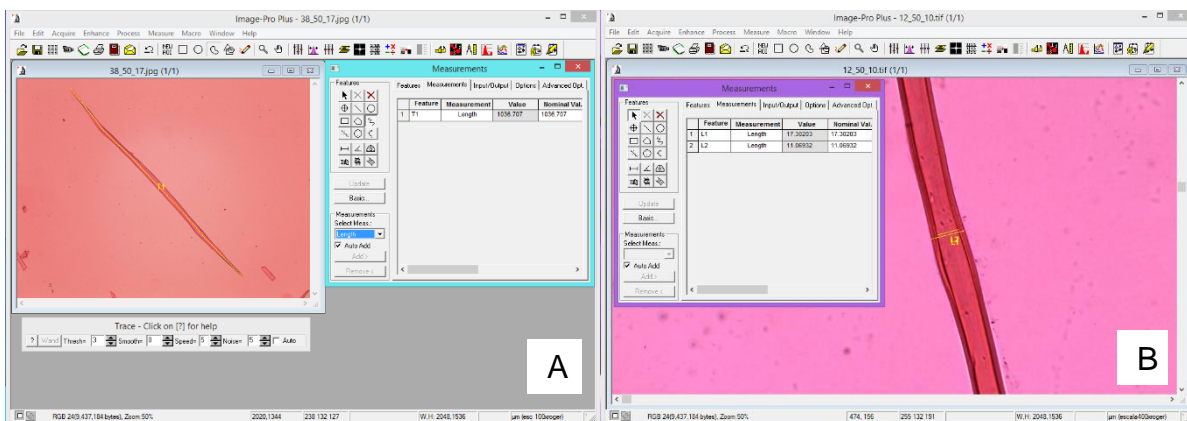


Figura 8 – Avaliação das fibras no lenho das árvores de eucalipto, com o software *Image Pro Plus*. (a) comprimento, (B) largura, diâmetro do lume e espessura da parede da fibra

4.10 Avaliação do cerne e albúrnio no tronco das árvores de *Eucalyptus*

Foram cortadas seções finas do lenho na seção transversal (5 mm, espessura) do tronco (DAP) das 48 árvores de eucalipto no 47º mês para a avaliação do cerne e a sua proporção em relação à área transversal do tronco. A seção foi polida com lixas até a visualização macroscópica do lenho; na delimitação e contraste da região do cerne foram aplicadas 3 metodologias, sendo, (i) **avaliação visual** com a diferenciação do cerne, em relação ao albúrnio, pela coloração normal; (ii) **imagem radiográfica** com a diferenciação do cerne pela tonalidade mais clara – devida a

maior atenuação pela sua composição química - obtida pela sua exposição em equipamento de raios X digital (Faxitron modelo LX-60) e (iii) **reação química** com solução de dymethyl yellow (1%) com a delimitação do cerne em função de sua composição química e menor valor de pH em relação ao alburno, sendo indicada pela coloração rosa avermelhada, correspondente à área do cerne e coloração amarela correspondente à área do alburno na seção transversal do lenho das árvores.

Os finos discos foram posteriormente digitalizados em escâner (800 pixels, resolução). As imagens da seção transversal do lenho das árvores foram analisadas no software *Image Pro Plus* calculando a sua área total, área de cerne e de alburno, transformados em porcentagem, mesmo como diâmetro do cerne e largura do alburno.

4.11 Análise dos dados

Na análise estatística foi aplicado o software SAS (SAS INSTITUTE, 1997), aferidos os “*outliers*” e a heterogeneidade da variância. Na análise do incremento em diâmetro e altura total das árvores utilizou-se o modelo do delineamento de parcelas subdivididas em blocos (Split plot). A análise de propriedades do lenho (anatomia, densidade e teor de cerne) foi feita com delineamento inteiramente aleatorizado. Aplicou-se análise de variância (ANOVA) para verificar o efeito da fertilização, do regime hídrico e das interações; o teste Tukey (95% probabilidade) para a comparação de médias. A análise de correlação de Pearson entre incremento de diâmetro do tronco, as variáveis climáticas e a umidade do solo, e entre as variáveis das propriedades do lenho. Os resultados do diâmetro e da altura foram complementados com os publicados na avaliação do experimento (2011 a 2013: 17-40 meses de idade das árvores, de Castro (2014)) com a finalidade de analisar a evolução das variáveis estudadas e o efeito dos tratamentos em maior escala temporal.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis* (Diâmetro do tronco, altura total, volume do tronco sem casca), e suas relações com o clima

Em relação ao **crescimento do diâmetro (DAP) e da altura total (HT) do tronco das árvores de eucaliptos** até o 58º mês, detectou-se uma resposta positiva à fertilização com K e Na (Tabela 1, Figura 9 A, B, Figura 11 A, B).

Tabela 1 – Diâmetro médio do tronco (DAP) e altura média das árvores de *E. grandis* por tratamento, ao 47º e 58º mês

| Tratamento | Diâmetro do tronco (DAP) (cm) | | | | Altura total da árvore (m) | | | |
|------------|-------------------------------|------|---------|------|----------------------------|------|---------|------|
| | 47º mês | | 58º mês | | 47º mês | | 58º mês | |
| | Média | EPM | Média | EPM | Média | EPM | Média | EPM |
| C/+A | 8,38 d | 0,14 | 8,92 d | 0,15 | 12,96 f | 0,10 | 14,51 e | 0,12 |
| Na/+A | 10,80 c | 0,12 | 11,41 c | 0,11 | 16,98 c | 0,09 | 18,67 c | 0,08 |
| K/+A | 12,64 a | 0,11 | 13,66 a | 0,12 | 18,97 a | 0,06 | 21,10 a | 0,07 |
| C/-A | 8,54 d | 0,12 | 8,97 d | 0,13 | 13,43 e | 0,10 | 14,78 e | 0,10 |
| Na/-A | 10,44 c | 0,13 | 11,14 c | 0,15 | 16,00 d | 0,12 | 17,32 d | 0,13 |
| K/-A | 11,64 b | 0,09 | 12,70 b | 0,10 | 17,44 b | 0,08 | 19,41 b | 0,09 |

Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). EPM significa erro padrão da média

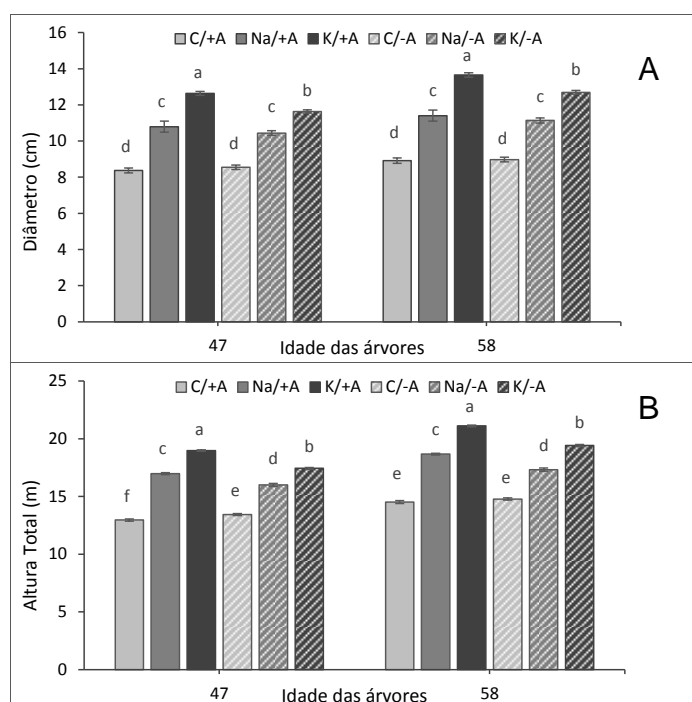


Figura 9 - (A) Diâmetro médio do tronco (DAP) e (B) altura média das árvores de *E. grandis* por tratamento, aos 47º e 58º meses. Letras acima das barras, diferentes entre barras por idade, indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). As barras de erros representam ao erro padrão da média

Embora, com interação significativa do tratamento de regime hídrico x fertilização, na análise de variância para média do DAP e da HT das árvores verificasse-se que a interação indica que o efeito dos níveis do regime hídrico variou dentro de cada nível de fertilização; no entanto o efeito dos níveis de fertilização permaneceu invariável nos níveis de regime hídrico (Tabela 2).

Tabela 2 - Diâmetro médio (DAP) e altura total média (HT) do tronco das árvores de *E. grandis* - níveis de fertilização e de regime hídrico ao 47° e 58° mês

| Diâmetro | 47 meses | | | | 58 meses | | | |
|--------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | Regime Hídrico | | | | Regime Hídrico | | | |
| | +A | | -A | | +A | | -A | |
| Fertilização | Média | EPM | Média | EPM | Média | EPM | Média | EPM |
| C | 8,4 c A | 0,14 | 8,5 c A | 0,12 | 8,9 c A | 0,15 | 9,0 c A | 0,13 |
| Na | 10,8 b A | 0,12 | 10,4 b B | 0,13 | 11,4 b A | 0,11 | 11,1 b A | 0,15 |
| K | 12,6 a A | 0,11 | 11,6 a B | 0,09 | 13,7 a A | 0,12 | 12,7 a B | 0,10 |

| Altura Total | 47 meses | | | | 58 meses | | | |
|--------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | Regime Hídrico | | | | Regime Hídrico | | | |
| | +A | | -A | | +A | | -A | |
| Fertilização | Média | EPM | Média | EPM | Média | EPM | Média | EPM |
| C | 13,0 c B | 0,10 | 13,4 c A | 0,10 | 14,5 c A | 0,15 | 14,8 c A | 0,13 |
| Na | 17,0 b A | 0,09 | 16,0 b B | 0,12 | 18,7 b A | 0,11 | 17,3 b A | 0,15 |
| K | 19,0 a A | 0,06 | 17,4 a B | 0,08 | 21,1 a A | 0,12 | 19,4 a B | 0,10 |

Para fertilização as letras minúsculas iguais nas colunas indicam que médias não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Para regime hídrico as letras maiúsculas iguais nas linhas indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey ($\alpha = 0,05$). EPM significa erro padrão da média

Desta forma, a exclusão parcial de chuva (-A) influenciou significativamente reduzindo o DAP e HT das árvores de eucalipto sob a aplicação de K e Na até o 47°, embora até o 58° mês, só teve efeito negativo nas árvores nutridas com K. Contrariamente, até o 58° mês, nas árvores de eucalipto controle (sem aplicação de K e de Na), e nas nutridas com Na, a exclusão parcial de chuva não mostrou efeito significativo no crescimento em DAP e HT (Tabela 2, Figura 11A e 11B).

Da mesma forma, o DAP do tronco e a HT das árvores de eucalipto foram influenciados significativamente pela fertilização, independente do regime hídrico (Tabela 2, Figura 11A e 11B). Assim, a aplicação do K e do Na estimularam de forma significativa o crescimento do DAP do tronco e a HT das árvores de eucalipto em relação ao controle, ao longo de todo o tempo de avaliação, com K evidenciando o mais alto e significativo incremento em relação ao Na. Nas árvores de eucalipto aos 47 e 58° mês, a fertilização com K aumentou o DAP médio do tronco em 44 e

47% e com Na em 26 e 26%, respectivamente, em comparação com as do controle; com relação à HT das árvores de eucalipto, a aplicação de K aumentou em 38 e 38% e com Na em 25 e 23%, respectivamente, aos 47^o e 58^o mês.

Na comparação dos tratamentos (regime hídrico + fertilização) as árvores de eucalipto aos 47^o e 58^o meses mostraram a tendência de maior valor do DAP do tronco no tratamento com K (K/+A e K/-A) seguido do Na (Na/+A e Na/-A), significativamente maiores em relação ao controle (C/+A e C/-A); o DAP em K/-A foi menor do que K/+A, mas nos outros tratamentos sob menor disponibilidade mesmo que o valor levemente menor para os tratamentos de menor disponibilidade hídrica, não houve diferença significativa entre os tratamentos de aplicação do mesmo fertilizante (Tabela 1, Figura 9, Figura 11A). A HT das árvores de eucalipto mostrou, ainda, maiores e significativas diferenças entre os tratamentos, sendo que, em ordem decrescente, as maiores HT das árvores foram obtidas com K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A (com diferença significativa entre si) e com a HT das árvores do controle C/+A e C/-A mostrando-se menores e significativas em relação às dos tratamentos com K e Na (Tabela 1, Figura 9, Figura 11B).

A avaliação do incremento corrente quinzenal do DAP do tronco das árvores de eucalipto (Figura 10B) do 1^o ao 5^o ano evidencia a continua tendência do maior valor do DAP para os tratamentos de K/+A, K/-A, Na/+A, Na/-A, C/+A, C/-A (em ordem decrescente), embora com valores próximos entre os tratamentos Na/+A e Na/-A mesmo como C/+A e C/-A.

O crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto caracterizou-se, em todos os tratamentos, por altas taxas de incremento do DAP com uma progressiva diminuição nas primeiras fases até o 30^o mês aproximadamente, mantendo-se quase constante até o 61^o mês, embora com leve redução na estação seca do ano de 2014 (48-53^o mês), seguindo-se leve retomada da taxa de incremento do DAP no início da estação chuvosa. Este comportamento do crescimento do DAP do tronco das árvores pode, também, ser observado na Figura 10A, ressaltando a paralisação do crescimento do tronco de fevereiro a outubro de 2014, principalmente, nos tratamentos K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A, com forte retomada da taxa de crescimento a partir de novembro de 2014; os tratamentos controle C/+A e C/-A não mostraram variações notáveis nos padrões de crescimento do DAP do tronco das árvores de eucalipto. Este resultado da variação do DAP do

tronco das árvores é relacionado aos níveis de precipitação pluviométrica no período: o ano de 2014 foi caracterizado como muito seco, com escasso nível de chuvas. Nesse aspecto o maior detalhamento do efeito das variáveis climáticas no crescimento das árvores de eucalipto e sua interação com os tratamentos de fertilização são discutidos em detalhe no item 5.2.

Por outro lado, em relação ao incremento da HT do tronco das árvores de eucalipto (Figura 11B) verifica-se que, ao longo do período de avaliação, a contínua tendência de maior valor - em ordem decrescente - para os tratamentos de K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A; sempre com maior valor para as árvores de eucalipto com +A do que com -A.

Em relação às árvores de eucalipto controle, as do tratamento -A mostraram-se, sempre, com maior altura do que as do tratamento +A, resultado já observado ao 47º e 58º mês. O incremento em HT do tronco das árvores, no período de avaliação, foi semelhante exceto no ano de 2014, que mostrou um acréscimo mínimo de altura de maio a novembro, similar ao observado para o diâmetro do tronco.

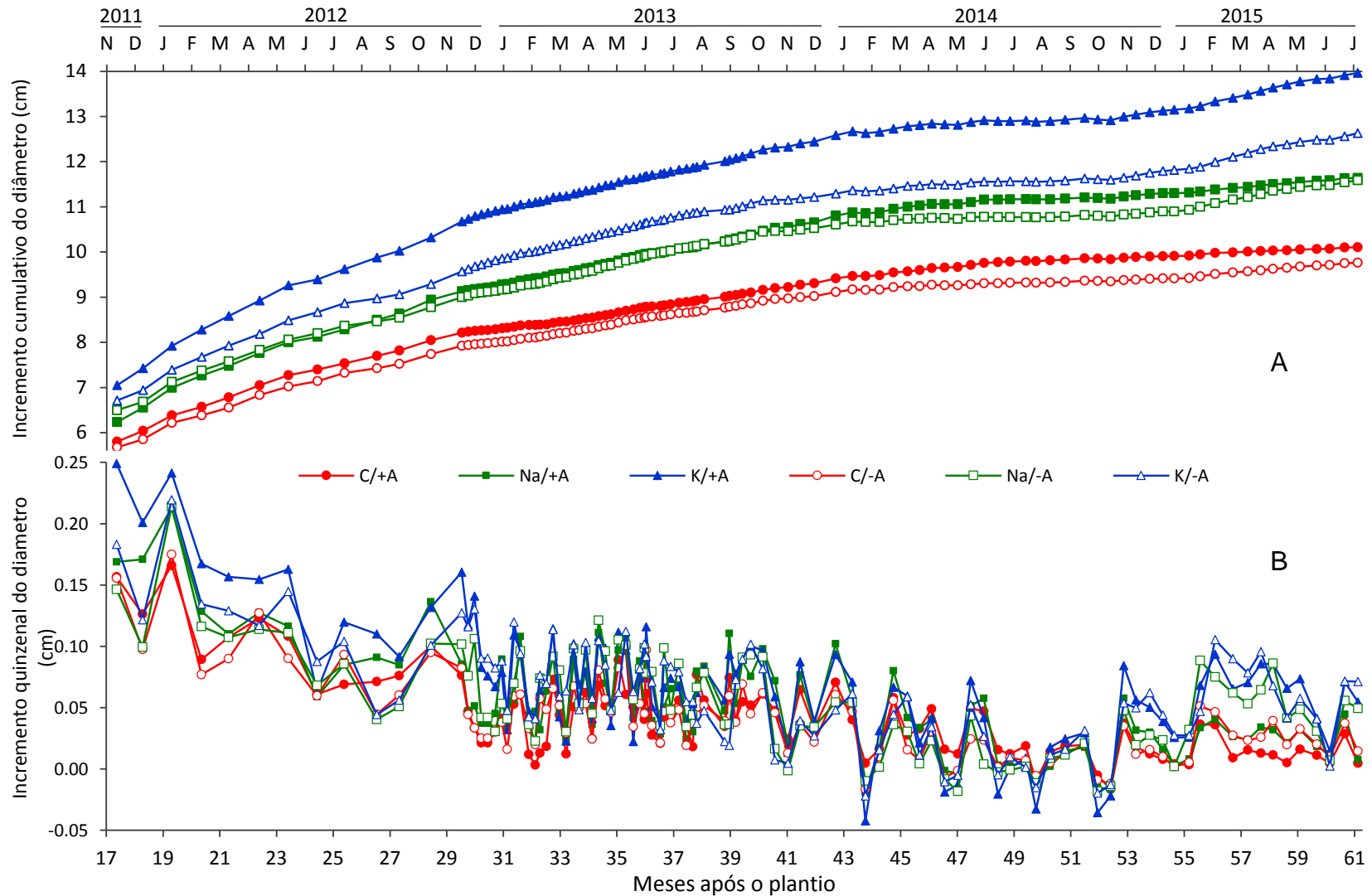


Figura 10 - Incremento do diâmetro do tronco das árvores de *E. grandis*, medido com dendrômetros de banda de aço, no período de 30/11/2011 (17,4^o mês) a 23/07/2015 (61,1^o mês), nos 6 tratamentos: Incremento acumulado (A); e incremento corrente (B) mensal (17,4^o-29^o mês), semanal (29^o-40^o mês) e quinzenal (40^o-60,1^o mês). Dados de novembro 2011 até setembro 2013 extraídos de Castro (2014).

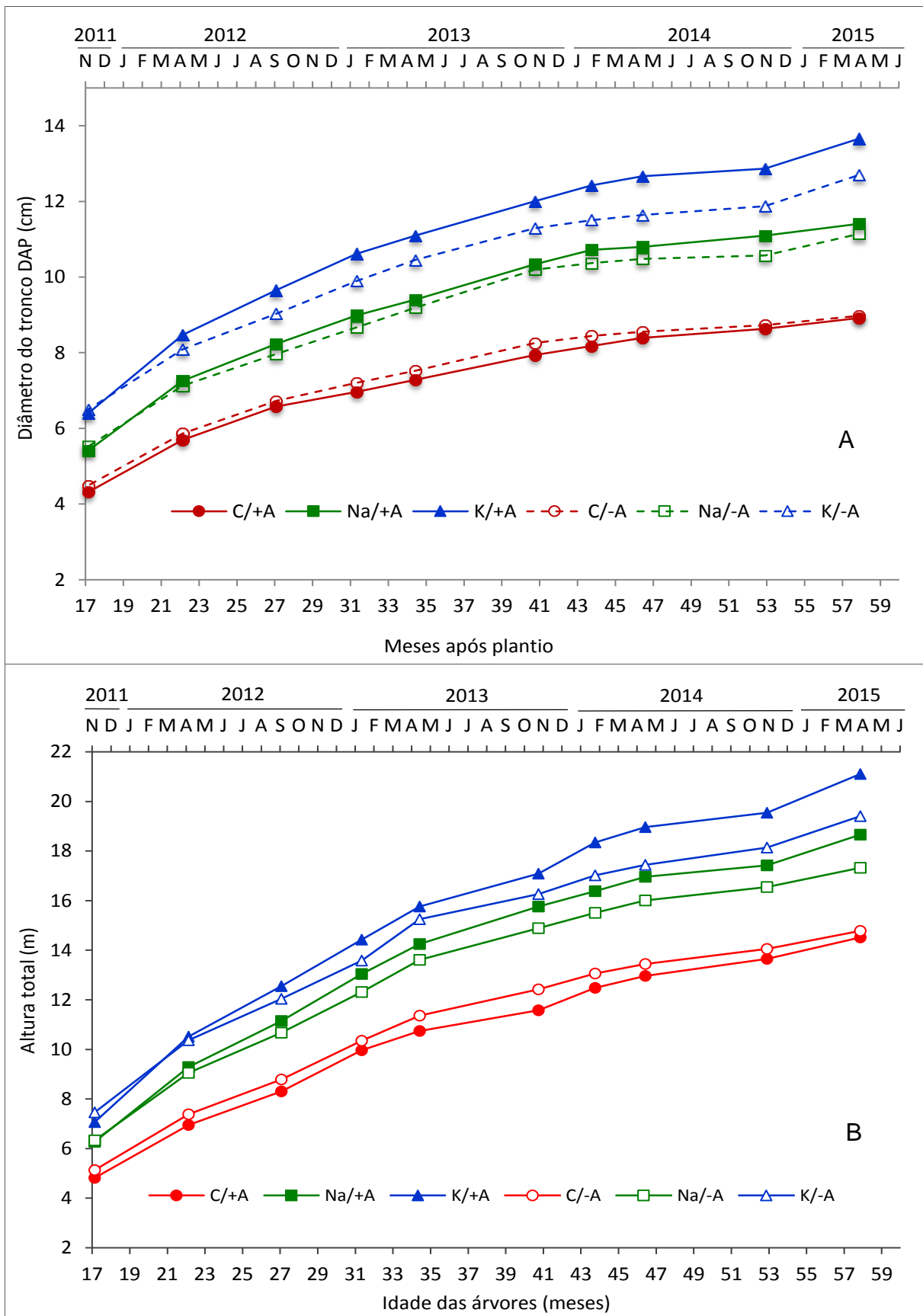


Figura 11 – Diâmetro (A) do tronco (DAP) no período de 30/11/2011 (17,4^o mês) a 23/07/2015 (61,1^o mês) e da (B) altura total no período de 23/11/2011 (17,1^o mês) a 15/04/2015 (57,9^o mês) das árvores de *E. grandis* nos 6 tratamentos

Em relação ao **volume do tronco sem casca (VSC) das árvores de eucaliptos** do 47º e 58º mês, (Tabela 3, Figura 12 A, B), obtido por cubagem rigorosa (método de Smalian), representa o volume neto de matéria prima para celulose e papel, energia, painéis e outras aplicações. O tratamento de menor disponibilidade hídrica aplicado não mostrou efeito negativo significativo no VSC das árvores de eucalipto aos 47º e 58º mês, embora o menor volume de madeira do tronco foi detectado para as árvores submetidas à menor disponibilidade hídrica.

Na falta de interação significativa do regime hídrico x fertilização, foi detectada diferença significativa do VSC das árvores de eucalipto sob K, Na e controle. Assim, a aplicação de K elevou o VSC das árvores em 147 e 159% aos 47º e 58º mês em relação ao controle; ainda, em menor medida, o Na elevou o VSC das árvores em 88 e 77% aos 47º e 58º mês em relação às do controle.

A diferença do VSC do tronco das árvores foi pequena, na comparação dos tratamentos (regime hídrico + fertilização), principalmente, ao 47º mês. Assim, os tratamentos de K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A não apresentaram diferença significativa para o VCP do tronco das árvores sendo, no entanto, superiores significativamente ao controle C/+A e C/-A, exceto para o de N/-A. Nas árvores aos 58º mês, a diferença do VSC do tronco foi mais ampla no tratamento de aplicação de nutrientes, com o de K/+A e K/-A não apresentando diferença significativa, da mesma forma, como o de Na/+A e Na/-A, sendo o de K/+A significativamente superior à estes tratamentos com aplicação de Na; as diferenças entre os tratamentos controle C/+A não foram significativas em relação ao C/-A, com VSC significativamente inferior ao dos demais tratamentos (Tabela 3 e Figura 12B).

Tabela 3 - Volume médio do tronco sem casca (VSC) das árvores de *E. grandis*. por fator e níveis; e por tratamento (regime hídrico + fertilização), aos 47º e 58º mês

| | | | 47º mês | | 58º mês | | | |
|--|----------------|----|------------------|----|------------------|-------|----|-------|
| | | | Volume sem casca | | Volume sem casca | | | |
| | | | Média (m3) | DP | Média (m3) | DP | | |
| Factor | Regime hídrico | +A | 0,063 | a | 0,031 | 0,084 | a | 0,041 |
| | | -A | 0,058 | a | 0,024 | 0,074 | a | 0,033 |
| | Fertilização | C | 0,034 | c | 0,014 | 0,044 | c | 0,016 |
| | | Na | 0,064 | b | 0,019 | 0,078 | b | 0,021 |
| | | K | 0,084 | a | 0,023 | 0,114 | a | 0,031 |
| Tratamento (Regime hídrico + fertilização) | C/+A | | 0,035 | b | 0,015 | 0,045 | c | 0,017 |
| | Na/+A | | 0,067 | a | 0,022 | 0,082 | b | 0,020 |
| | K/+A | | 0,089 | a | 0,029 | 0,123 | a | 0,037 |
| | C/-A | | 0,033 | b | 0,013 | 0,043 | c | 0,016 |
| | Na/-A | | 0,062 | ab | 0,017 | 0,075 | bc | 0,022 |
| | K/-A | | 0,079 | a | 0,017 | 0,105 | ab | 0,023 |

Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). DP significa desvio padrão da média.

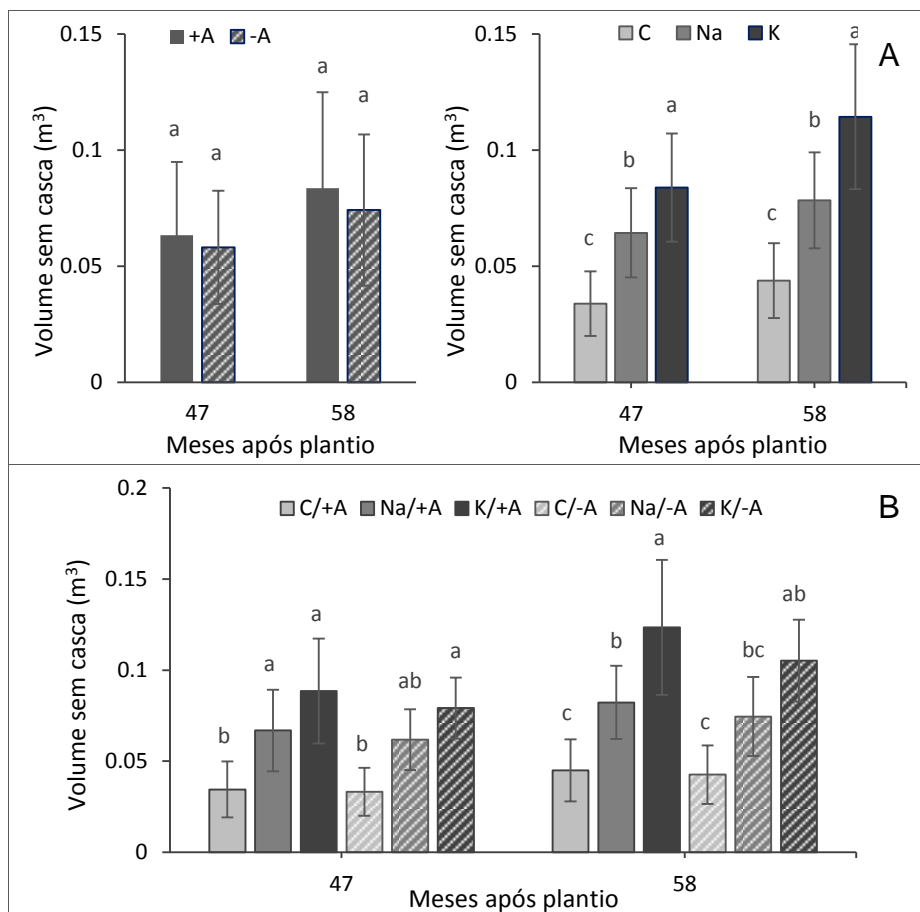


Figura 12 - Volume médio do tronco sem casca (VSC) das árvores de *E. grandis*. (A) por nível de regime hídrico (A1) e de fertilização (A2); (B) por tratamento (regime hídrico + fertilização), aos 47º e 58º mês. Letras acima das barras, diferentes entre barras por idade, indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). As barras de erros representam ao desvio padrão da média

Em quanto às relações entre o crescimento e o clima, temos que:

A precipitação pluviométrica de outubro de 2013 a julho de 2015 caracterizou-se por variações sazonais características - maior precipitação acumulada de outubro–março (estação chuvosa) e menor precipitação de abril–setembro (estação seca) (Figura 13). No ano de 2014, a precipitação acumulada foi de 1181 mm, muito menor que a dos anos anteriores de 2011, 2012 e 2013 com 1470, 1452 e 1240 mm, respectivamente, e menor do que a média do estado de São Paulo (1384,5mm). Portanto, a baixa precipitação pluviométrica do ano de 2014 afetou significativamente o desenvolvimento das árvores de eucalipto.

A temperatura média, máxima e mínima, não apresentou variação considerável no período de avaliação, com as oscilações entre as estações do ano, sendo menor temperatura no inverno e maior no verão (Figura 13).

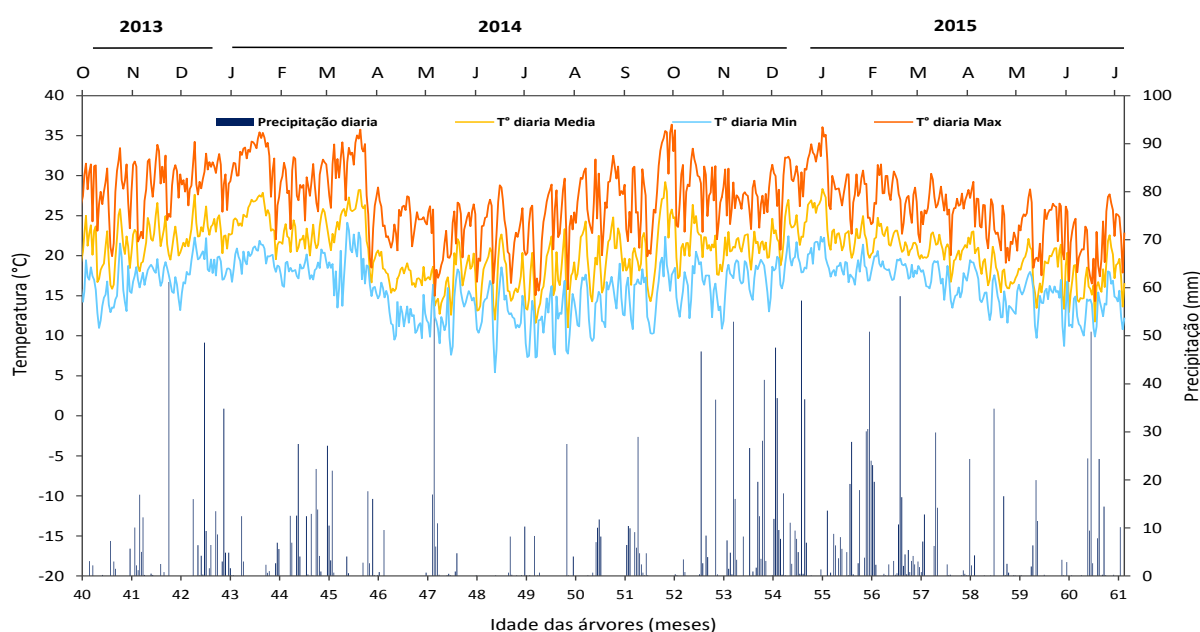


Figura 13 – Registro da precipitação, temperatura média, máxima e mínima, diárias no período de 18/10/2013 (40º mês) a 23/07/2015 (61,1º mês)

A variação do conteúdo volumétrico de água no solo (WVC) é apresentada para as camadas superficial (0.15–1.5 m) e média (3–6 m de profundidade) das 6 parcelas do 1º bloco, sendo 1 parcela/tratamento (Figura 14), com o resultado de avaliação de outubro de 2013 a fevereiro de 2015.

Verificou-se variação no WVC em relação à profundidade do solo, sendo menor nas camadas mais inferiores: assim, na camada superficial do solo foi de 7.9-14.5% e na camada média de 12.6-14.9% de WVC para todas as parcelas experimentais.

Observou-se, também, que o perfil do solo no tratamento sob exclusão parcial de chuva (-A) obteve menor valor de WVC em relação ao tratamento sem exclusão parcial de chuva (+A). Independente do regime hídrico, o WVC foi menor nas parcelas com K, seguidos do Na, e as parcelas Controle (sem aplicação de K ou Na) tiveram significativamente maior WVC; embora, nas camadas de solo a 3–6 m, o tratamento de K e de Na apresentou valor similar e sem diferença significativa de WVC. Desta forma, na profundidade do solo de 0.15-1.5 e de 3- 6 m da parcela de C/+A verificou-se o valor máximo e significativo de WVC em relação ao das demais parcelas; ao contrário, o solo da parcela de K/-A mostrou valor mínimo de WVC (Tabela 4). Estas diferenças de WVC permaneceram ao longo da idade das árvores de eucalipto.

Tabela 4 – Médias do Conteúdo volumétrico médio da água (WVC%) por tratamento (regime hídrico + fertilização) a 0,15-1,5 m e 3-6 m de profundidade do solo, no período 18/10/2013 a 17/02/2015

| Profundidade do solo (m) | Tratamento | WVC% | | |
|--------------------------|------------|-------|---|-----|
| | | Média | | DP |
| 0.15 - 1.5 | C/+A | 12.5 | a | 2.4 |
| | Na/+A | 10.7 | b | 2.5 |
| | K/+A | 10.3 | b | 2.1 |
| | C/-A | 10.0 | b | 1.7 |
| | Na/-A | 8.8 | c | 1.7 |
| | K/-A | 7.7 | d | 1.2 |
| 3 - 6 | C/+A | 16.2 | a | 1.6 |
| | Na/+A | 13.0 | d | 1.2 |
| | K/+A | 13.7 | c | 1.1 |
| | C/-A | 15.3 | b | 1.3 |
| | Na/-A | 12.6 | d | 0.5 |
| | K/-A | 11.4 | e | 0.2 |

Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). DP significa desvio padrão da média

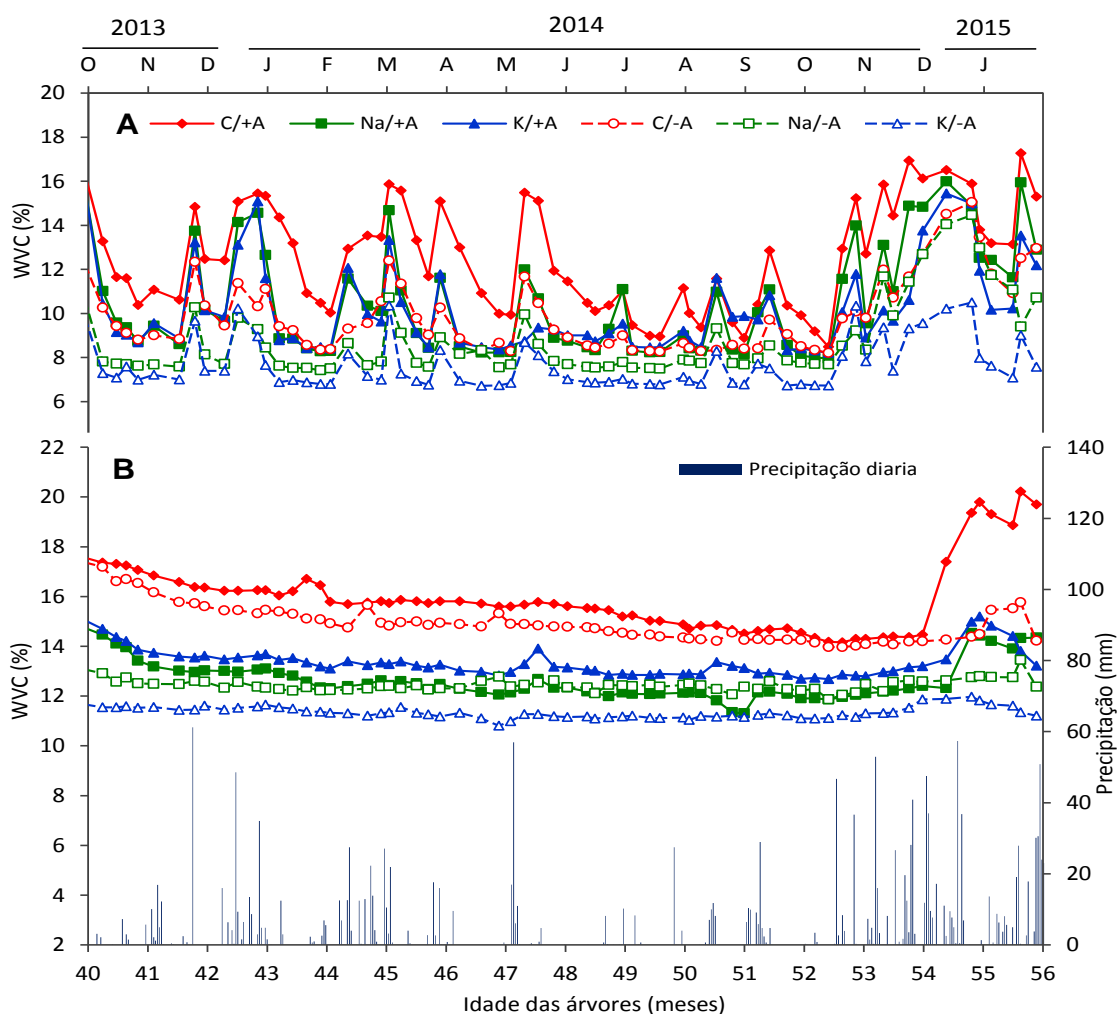


Figura 14 - Conteúdo volumétrico da água no solo (WVC%) por parcela, no bloco I no período de 18/10/2013 (40^o mês) a 17/02/2015 (56^o mês). Profundidade do solo (A) de 0,15-1,5 m; (B) 3-6 m

Os padrões de WVC observados refletem a alta demanda de água pelas árvores de eucalipto fertilizadas com o K e, em menor medida, as árvores com Na, em relação às árvores sem aplicação destes nutrientes; mesmo assim, houve grande diferença de entrada de água entre as parcelas dos tratamentos com regime hídrico normal (+A) e com regime hídrico reduzido pela exclusão de 37% da chuva (-A).

A relação entre a WVC e a precipitação pluviométrica é muito clara nas camadas mais superficiais do solo (Figura 14A); com grandes eventos de chuva ocasionando considerável incremento de WVC no solo das parcelas de todos os tratamentos; inclusive, pequenos eventos de chuva (aprox. 10 mm) incrementaram de forma significativa o nível de WVC no solo das parcelas sem exclusão de chuva (C/+A, Na/+A e K/+A), enquanto que no solo das parcelas sob exclusão parcial de

chuva (C/-A, Na/-A e K/-A) os incrementos de WVC foram detectados somente em eventos de alta precipitação pluviométrica, pelo efeito da cobertura plástica indutora da exclusão de 37% da chuva.

Assim, a análise comparativa do valor semanal de WVC da camada superficial do solo (0.15-1.5 m) e o correspondente valor de precipitação semanal acumulada indicou que a variação do WVC depende fortemente da precipitação, de acordo com a correlação de Pearson, com forte, positivo e altamente significativo coeficiente ($p < 0.01$) para todos os tratamentos. Nas camadas mais profundas do solo (3-6 m) o valor de WVC mostrou correlação significativa com a precipitação pluviométrica apenas na parcela do tratamento K/-A.

A precipitação pluviométrica pode não influenciar de imediato no valor do WVC do solo, apresentando um período de atraso, denominado de período de defasagem (Lag). Assim, para a comprovação de período de defasagem superior a 7 dias de precipitação acumulada, para cada leitura de WVC do solo, foi testado o período de defasagem de 7 (Lag -1) e de 14 dias (Lag -2). Desta forma, nas camadas mais superficial e na mais profunda do solo não observou-se atraso na resposta do WVC com a precipitação acumulada, sendo o coeficiente de correlação com Lag -1 e Lag -2 menos robusto em comparação com Lag 0 (sem defasagem) (Tabela 5).

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson entre o conteúdo volumétrico de água no solo (WVC) e a precipitação pluviométrica (período de 7 dias)

| Profundidade do solo (m) | Tratamento | Sem defasagem | Com defasagem | |
|--------------------------|------------|---------------|----------------|------------------|
| | | Lag 0 | 7dias (Lag -1) | 14 dias (Lag -2) |
| WVC 0,15 - 1,5 m | C/+A | 0,70 | 0,52 | 0,42 |
| | Na/+A | 0,70 | 0,44 | 0,32 |
| | K/+A | 0,58 | 0,45 | 0,30 |
| | C/-A | 0,66 | 0,55 | 0,48 |
| | Na/-A | 0,61 | 0,52 | 0,41 |
| | K/-A | 0,72 | 0,36 | 0,25 |
| WVC 3 - 6 m | C/+A | 0,05 | 0,17 | 0,17 |
| | Na/+A | 0,08 | 0,07 | 0,06 |
| | K/+A | 0,03 | 0,07 | 0,06 |
| | C/-A | -0,08 | -0,15 | -0,09 |
| | Na/-A | 0,06 | 0,02 | 0,01 |
| | K/-A | 0,39 | 0,36 | 0,39 |

Lag 0 significa correlação sem defasar o WVC, Lag -1 e Lag -2 significam correlação defasando o WVC 1 período (7 dias) e 2 períodos (14 dias) respectivamente. Números em negrito significam coeficientes de correlação altamente significativos ($p < 0.01$)

Em relação às condições climáticas e teor de umidade do solo no crescimento das árvores de eucaliptos verificou-se que o incremento do DAP do tronco foi estreitamente relacionado à variação da precipitação e a temperatura mínima; o coeficiente de correlação positivo e altamente significativo ($p < 0.01$) entre o incremento corrente do diâmetro do tronco e a precipitação eram maiores nos tratamentos de K e de Na em relação ao controle; por outro lado, a temperatura mínima mostrou correlação menos robusta, embora, também, altamente significativa ($p < 0.01$) (Tabela 6, Figura 15 A,B). Verificou-se, ainda, que as temperaturas médias e as máximas não influenciaram no valor do incremento corrente do DAP do tronco das árvores de eucalipto.

Tabela 6 - Coeficiente de correlação de Pearson entre o incremento corrente do diâmetro (DAP) do tronco das árvores de *E. grandis* e as variáveis climáticas (precipitação, temperatura)

| Tratamento | Precipitação | T° média | T° mínima | T° máxima |
|------------|--------------|-------------|-------------|-----------|
| C/+A | 0,26 | 0,08 | 0,14 | 0,06 |
| Na/+A | 0,33 | 0,12 | 0,21 | 0,08 |
| K/+A | 0,52 | 0,08 | 0,27 | -0,03 |
| C/-A | 0,36 | 0,06 | 0,19 | 0,01 |
| Na/-A | 0,44 | 0,09 | 0,26 | -0,01 |
| K/-A | 0,59 | 0,07 | 0,28 | -0,07 |

Números em negrito significam coeficientes de correlação altamente significativos ($p < 0.01$).

Da mesma forma, detectou-se correlação altamente significativa ($p < 0.01$) do valor do WVC (camada de solo de 0.5-1.5 e de 3-6 m) e o crescimento das árvores de eucalipto, com valor de coeficiente mais robusto na camada de 0.5-1.5 m (Tabela 7).

Tabela 7 - Coeficiente de correlação de Pearson entre incremento corrente do diâmetro do tronco (DAP) das árvores de *E. grandis* e o conteúdo volumétrico de água no solo (WVC)

| Tratamento | WVC Solo | |
|------------|--------------|-------------|
| | 0,15 - 1,5 m | 3 - 6 m |
| C/+A | 0,28 | 0,21 |
| Na/+A | 0,46 | 0,39 |
| K/+A | 0,54 | 0,28 |
| C/-A | 0,23 | 0,34 |
| Na/-A | 0,51 | 0,39 |
| K/-A | 0,61 | 0,28 |

Números em negrito significam coeficientes de correlação altamente significativos ($p < 0.01$).

De modo geral, a avaliação do DAP do tronco das árvores de eucalipto do 40^o ao 61^o mês indicou que foi afetado negativamente pela exclusão parcial da chuva; por outro lado, a aplicação de K e de Na, independente do regime hídrico, mostrou efeito positivo evidenciado pelo maior valor do incremento do tronco, maior para o K, em relação ao Na. No entanto as variações consideráveis dos efeitos propiciado pela fertilização (as vezes negativo) e exclusão de chuva (as vezes positivo ou sem efeito) no crescimento em determinados períodos de avaliação, permitiu identificar que o efeito da aplicação do K e do Na, bem como o da exclusão parcial de chuva, variou com o volume da precipitação pluviométrica acumulada, indicando a interação com a precipitação. Assim, com o valor da precipitação acumulada menor ou igual a 10 mm (período seco) detectou-se efeito negativo do K e Na no incremento do DAP do tronco das árvores, principalmente com K; como resposta, as árvores de eucalipto reduziram ou paralisaram a sua atividade cambial, enquanto que as árvores do tratamento controle mantinham, embora em taxa pequena, o crescimento em DAP do seu tronco (Figura 15A). No entanto, em evento de elevada e considerável precipitação pluviométrica (acima de 10 mm, período chuvoso) as árvores de eucalipto nutridas com K e Na mostraram grande incremento do DAP do seu tronco, sendo significativamente maior do que o do controle (Figura 15A). O efeito negativo da exclusão da chuva no crescimento do DAP do tronco das árvores foi detectado, somente, no período seco e não mostrou efeito no período chuvoso (Tabela 8). A interação da precipitação pluviométrica e o efeito da fertilização explica o baixo incremento do DAP do tronco das árvores de eucalipto nos tratamentos de K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A, observado no período de fevereiro a outubro 2014, caracterizado por longo e anormal período de seca, em relação aos anos anteriores (Figuras 10, 15).

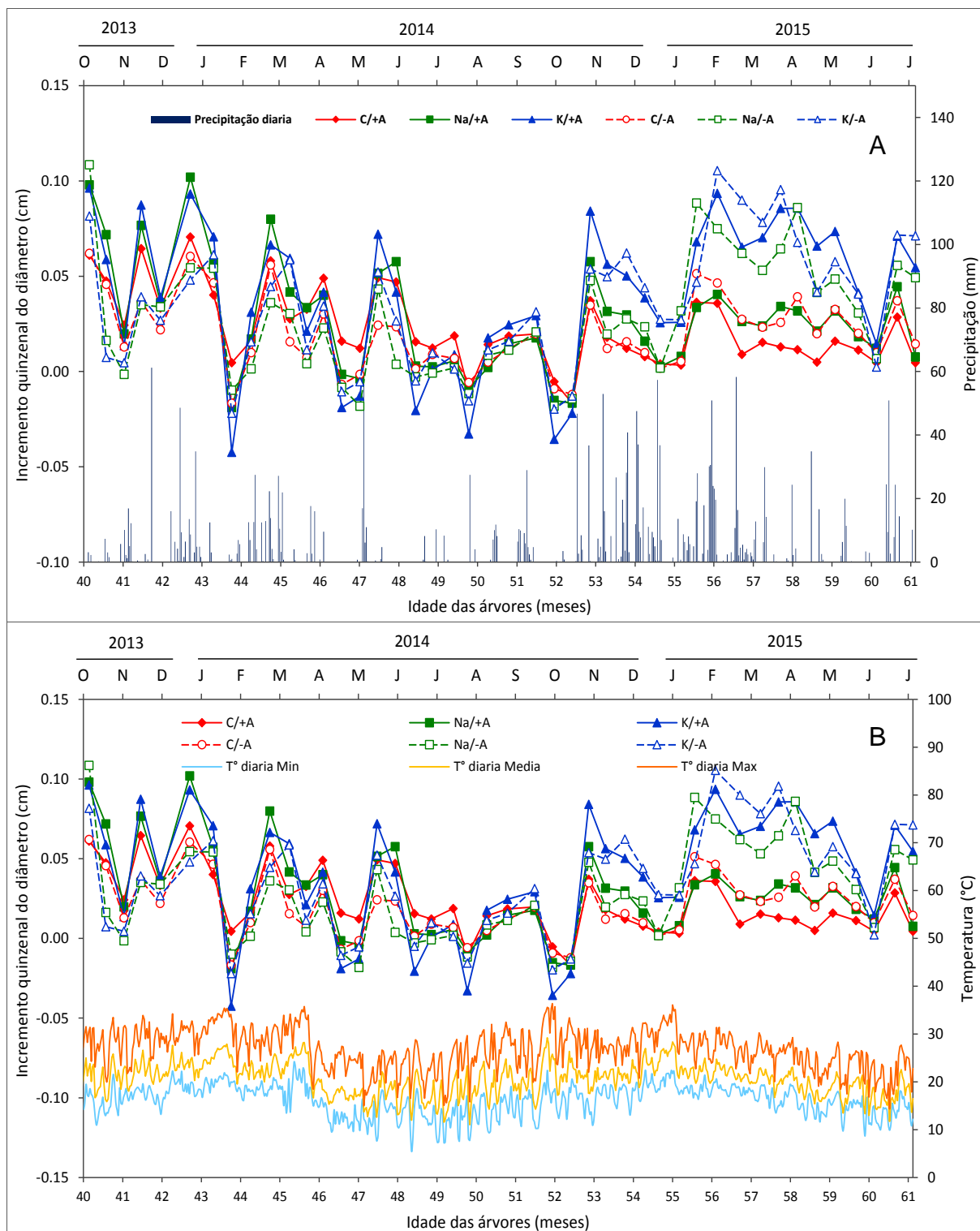


Figura 15 - Relação do incremento em diâmetro do tronco das árvores de *E. grandis*, por tratamento, com a (A) precipitação diária e (B) temperatura média, mínima e máxima, no período de 23/10/2014 (40,1^o mês) a 23/07/2015 (61,1^o mês)

Tabela 8 - Incremento médio do diâmetro (DAP) do tronco das árvores de *E. grandis* por nível de fator regime hídrico e de fertilização em períodos chuvoso e seco, no período de 23/10/2014 (40,1º mês) a 23/07/2015 (61,1º mês)

| Fator | Nível | Incremento de diâmetro do tronco (DAP) | | | |
|----------------|-------|--|---|--------------|---|
| | | Período chuvoso | | Período seco | |
| | | Média | | Média | |
| Régime hídrico | +A | 0,040 | a | 0,006 | a |
| | -A | 0,039 | a | -0,001 | b |
| Fertilização | C | 0,027 | c | 0,008 | a |
| | Na | 0,038 | b | 0,002 | b |
| | K | 0,053 | a | -0,003 | c |

Letras diferentes nas colunas indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$)

A aplicação do K e do Na aumentou significativamente o crescimento das árvores de eucalipto, sendo maior para o K. Os resultados para as árvores ao 47º e 58º mês confirmam o efeito positivo do K e do Na reportado para o mesmo experimento, aos 12º e 24º mês após o plantio por Battie-Laclau et al. (2014b) e Battie Laclau (2013) e ao 36º mês por Castro (2014). Desta forma, o efeito dos nutrientes permanece efetivo ao longo do período de desenvolvimento e de crescimento das árvores de eucalipto. No entanto, a fertilização com o Na não conseguiu se aproximar às altas taxas de crescimento promovida pelo K, sendo seu efeito intermediário, corroborando os resultados de Almeida et al. (2010), Battie-Laclau et al. (2014b), Castro (2014), Sette Junior et al. (2010) e Franco (2014).

Deste modo, o aumento do crescimento e produtividade do lenho das árvores de eucalipto com a fertilização com K, ratifica a sua importância para as plantações florestais de rápido crescimento de *E. grandis* no Brasil e em outros países que aplicam a silvicultura de produção. O efeito benéfico do K em árvores de eucalipto tem sido enfatizado por inúmeros autores, na literatura especializada, como Faria et al. (2002), Gonçalves et al. (2004), Gonçalves et al. (2008) e Almeida et al. (2010), constituindo parte da fertilização padrão aplicada pelas empresas florestais. Por outro lado, a fertilização com Na (em adição à adubação básica e substituição total do K) promove, também, uma positiva resposta no crescimento das árvores de eucalipto; o efeito do Na foi também reportado por Almeida et al. (2010), Sette Junior et al. (2010) e Battie-Laclau et al. (2014b), embora estes resultados mostram que com a aplicação do Na em substituição total do K na adubação básica, diminui

consideravelmente a produtividade do plantio; no entanto seu uso em substituição parcial do K tem maiores benefícios na produtividade, aproximando-se aos efeitos positivos do potássio (ALMEIDA et al.; 2010), por tanto sua adição parcial na adubação básica considera-se de potencial aplicação na silvicultura de *Eucalyptus*.

A exclusão de 37% da chuva resulta em redução do crescimento das árvores de eucalipto nos tratamentos com aplicação de K; nas árvores controle (sem aplicação de K ou Na) e com aplicação de Na, não se observa este efeito. Esta interação se associa à alta taxa de crescimento das árvores promovida pela aplicação de K que demandaram um maior consumo de água (BATTIE-LACLAU et al.; 2014b), de fato, o menor WVC do solo nas parcelas de K refletem o alto consumo de água retirado pelo sistema radicular das árvores de eucalipto com elevada taxa de crescimento (Tabela 5, Figura 14), portanto com a exclusão de 37% da chuva se reduziu o estoque de água no solo limitando-se consideravelmente o volume de água necessário para as árvores de eucalipto nas parcelas com K/-A (Tabela 5). Assim, a forte demanda de água pelas árvores de eucalipto, em situação de estresse hídrico, impactou negativamente o seu crescimento no tratamento K/-A, e em menor medida em Na/-A que só foi afeitado pela redução de chuva até o 47º mês. Nas árvores controle (sem aplicação de K e de Na) o comportamento indistinto com a menor disponibilidade de água no solo, é devido às menores exigências de água pelas plantas para uma baixa taxa de crescimento, em comparação com às árvores nutridas com K e em menor medida com Na (BATTIE-LACLAU et al.; 2014b); assim, mesmo com a redução da disponibilidade de água nas parcelas de C/-A, sua quantidade é suficiente no solo para seu desenvolvimento. Nas árvores fertilizadas com Na o efeito negativo da redução hídrica apresentado até o 47º mês, foi diminuindo devido ao aumento das taxa de crescimento dos tratamentos sob menor disponibilidade hídrico (-A) a partir de fevereiro 2015, influenciado pela alta precipitação pluviométrica de fevereiro a maio 2015, que contribuiu notavelmente para igualar o crescimento das árvores sob maior disponibilidade hídrica.

Com tudo, o efeito negativo da exclusão das chuvas foi relativamente fraco quando comparado ao da deficiência de K ou Na nas árvores de eucalipto; portanto a fertilização exerce um papel mais importante para as diferenças significativas no crescimento das árvores encontradas entre os tratamentos.

Por outro lado, a precipitação mostrou-se como a mais importante das variáveis climáticas no crescimento das árvores de eucalipto, com influência significativa nos efeitos dos tratamentos. Nesta pesquisa demonstrou-se nos períodos secos, com pequena ou nula precipitação pluviométrica, o Na e, principalmente o K, tem o efeito inverso, induzindo a parada do crescimento das árvores de eucalipto; enquanto que, as arvores controle mantêm o seu crescimento; desta forma, no período de seca prolongada, o K pode atuar diminuindo a produção de biomassa das árvores e, ainda, pode induzir a sua morte (BATTIE-LACLAU et al., 2014b). De fato, as pesquisas têm demonstrado que o aumento do estresse hídrico no solo resulta no aumento da mortalidade das árvores das plantações de eucaliptos fertilizadas com nitrogênio (STONEMAN et al., 1996; WHITE et al., 2009). No presente estudo, todos os tratamentos, inclusive o de controle tem fertilização nitrogenada, e, portanto, sugere que o K e Na podem agravar em maior dimensão os efeitos negativos da seca prolongada no desenvolvimento das árvores. Este efeito do K nas árvores de eucalipto, no período seco, explica a curva assintótica do incremento acumulado de DAP do tronco, na última metade do ano de 2014, com K e, em menor medida, com Na (Figura 10A).

O resultado sugere, ainda, que as árvores de eucaliptos nutridas com K e Na, são mais sensíveis às variações de precipitação (Figura 13) com rápido e considerável incremento do DAP do seu tronco quando ocorre um evento de chuva, demonstrado pela robusta correlação da precipitação e o incremento do DAP do tronco das árvores com K e, em menor grau, com Na; também, as correlações menos robustas das árvores dos tratamentos controle indicam um comportamento menos sensível do seu crescimento ao evento de chuva e de seca.

Ainda, em fevereiro de 2015 a abril de 2015 as árvores de eucalipto do tratamento com exclusão parcial de chuva (-A) apresentaram maior incremento do que as árvores do tratamento de regime hídrico normal (Figura 15A); este resultado pode ser explicado, eventualmente, por estresse causado pelo alto valor do conteúdo hídrico do solo (WVC), registrado no mesmo período nos tratamentos com maior disponibilidade hídrica (+A), o qual é potencializado pela considerável intensidade de pluviosidade dessa estação chuvosa; assim, a exclusão parcial de chuva atua de forma benéfica mantendo um valor de WVC ótimo e suficiente para a promoção da alta taxa de crescimento das árvores, sem o efeito negativo de um valor de WVC excessivo e alto, como os dos tratamentos com +A. Nesse aspecto,

Sette Júnior et al. (2012) observaram um comportamento similar do incremento corrente do tronco das árvores de eucalipto na estação chuvosa atribuindo, como causa o elevado teor de umidade do solo e o maior número de dias nublados, que afetam a respiração e a translocação dos nutrientes pelas raízes e a fotossíntese das árvores de eucalipto.

5.2 Características anatômicas microscópicas do lenho: dimensões das fibras e dos vasos no lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*

5.2.1 Dimensões das fibras do lenho

A literatura informa que os principais fatores de qualidade de polpa e papel são relacionados aos atributos físicos das fibras da madeira (GONÇALVES et al., 2004b). Ainda, as dimensões e a qualidade das fibras do lenho são, comumente, afetadas pelas práticas de manejo silvicultural e pela qualidade do sítio (MACDONALD; HUBERT, 2002) sendo que o seu conhecimento indica a importância das dimensões das fibras nas propriedades da polpa (CHANDRASEKHARA PILLAI et al., 2013).

O resultado da aplicação dos tratamentos (fertilização + regime hídrico) nas dimensões das fibras (Tabela 9) indica que, em geral, não há diferença significativa para todos os parâmetros, na posição radial de 50 e 100% das amostras do lenho. Na posição de 50% do raio das amostras do lenho das árvores de eucalipto observa-se, apenas, diferença significativa para o comprimento das fibras entre o Na/+A e o C/-A; largura e diâmetro do lume das fibras para o Na/+A e Na/-A diferindo do K/-A; espessura da parede das fibras para o tratamento controle C/+A e C/-A diferindo do Na/+A. Na posição de 100% do raios das amostras do lenho, somente o comprimento das fibras mostrou diferença significativa entre Na/+A e C/-A (similar ao da posição 50%); para a largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras não há diferença significativa entre os tratamentos. Os efeitos dos tratamentos ao longo do raio (50 e 100% do raio) nas dimensões das fibras pode ser observado graficamente (Figura 16).

Tabela 9 – Dimensões médias das fibras no lenho das árvores de *E. grandis* - comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede, por tratamento, e fator regime hídrico e fertilização, a 50 e 100% do raio das amostras do lenho, no 47º mês após plantio

| | Posição do raio | Comprimento (µm) | | Largura (µm) | | Diâmetro do lume (µm) | | Espessura da parede (µm) | |
|---|-----------------|------------------|----------|--------------|---------|-----------------------|---------|--------------------------|---------|
| | | Média | DP | Média | DP | Média | DP | Média | DP |
| Tratamento (Regime hídrico + Fertilização) | C/+A | 852,89 | ab 59,48 | 18,02 | ab 0,86 | 10,93 | ab 0,82 | 3,55 | a 0,12 |
| | Na/+A | 939,00 | a 63,16 | 19,34 | a 1,54 | 12,89 | a 1,75 | 3,22 | b 0,16 |
| | K/+A | 893,48 | ab 69,36 | 18,00 | ab 1,19 | 11,09 | ab 1,24 | 3,45 | ab 0,22 |
| | C/-A | 831,40 | b 83,49 | 18,22 | ab 1,54 | 11,15 | ab 1,51 | 3,53 | a 0,12 |
| | Na/-A | 879,74 | ab 59,06 | 19,42 | a 1,51 | 12,63 | a 1,81 | 3,40 | ab 0,24 |
| | K/-A | 907,40 | ab 69,22 | 16,97 | b 1,11 | 10,20 | b 1,16 | 3,36 | ab 0,07 |
| | C/+A | 1011,96 | ab 65,86 | 22,84 | a 2,31 | 15,65 | a 2,13 | 3,59 | a 0,23 |
| | Na/+A | 1065,41 | a 65,73 | 24,29 | a 0,96 | 17,51 | a 0,86 | 3,39 | a 0,16 |
| | K/+A | 1017,50 | ab 48,20 | 22,36 | a 2,11 | 15,04 | a 1,77 | 3,66 | a 0,33 |
| | C/-A | 967,21 | b 72,89 | 21,70 | a 1,64 | 14,60 | a 1,86 | 3,55 | a 0,22 |
| | Na/-A | 1042,88 | ab 41,26 | 23,29 | a 2,03 | 16,46 | a 2,47 | 3,41 | a 0,29 |
| | K/-A | 1059,75 | ab 83,58 | 24,13 | a 1,64 | 17,05 | a 2,24 | 3,54 | a 0,38 |
| Fator Regime hídrico | +A | 895,12 | a 71,03 | 18,45 | a 1,33 | 11,64 | a 1,56 | 3,41 | a 0,22 |
| | -A | 874,65 | a 74,36 | 18,20 | a 1,69 | 11,34 | a 1,78 | 3,43 | a 0,17 |
| | +A | 1031,63 | a 62,79 | 23,16 | a 1,99 | 16,07 | a 1,92 | 3,55 | a 0,26 |
| | -A | 1025,72 | a 76,36 | 23,10 | a 1,98 | 16,10 | a 2,36 | 3,50 | a 0,30 |
| Fator Fertilização | C | 842,86 | b 69,85 | 18,11 | b 1,18 | 11,03 | b 1,15 | 3,54 | a 0,12 |
| | Na | 909,37 | a 66,53 | 19,38 | a 1,47 | 12,76 | a 1,73 | 3,31 | b 0,22 |
| | K | 900,44 | ab 67,32 | 17,48 | b 1,23 | 10,65 | b 1,25 | 3,41 | ab 0,17 |
| | C | 991,08 | b 70,57 | 22,31 | a 2,04 | 15,16 | b 2,01 | 3,57 | a 0,22 |
| | Na | 1054,15 | a 54,28 | 23,79 | a 1,61 | 16,99 | a 1,87 | 3,40 | a 0,23 |
| | K | 1038,62 | ab 69,43 | 23,24 | a 2,04 | 16,05 | ab 2,21 | 3,60 | a 0,35 |

Valores na coluna DP representam o desvio padrão, médias de tratamentos seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

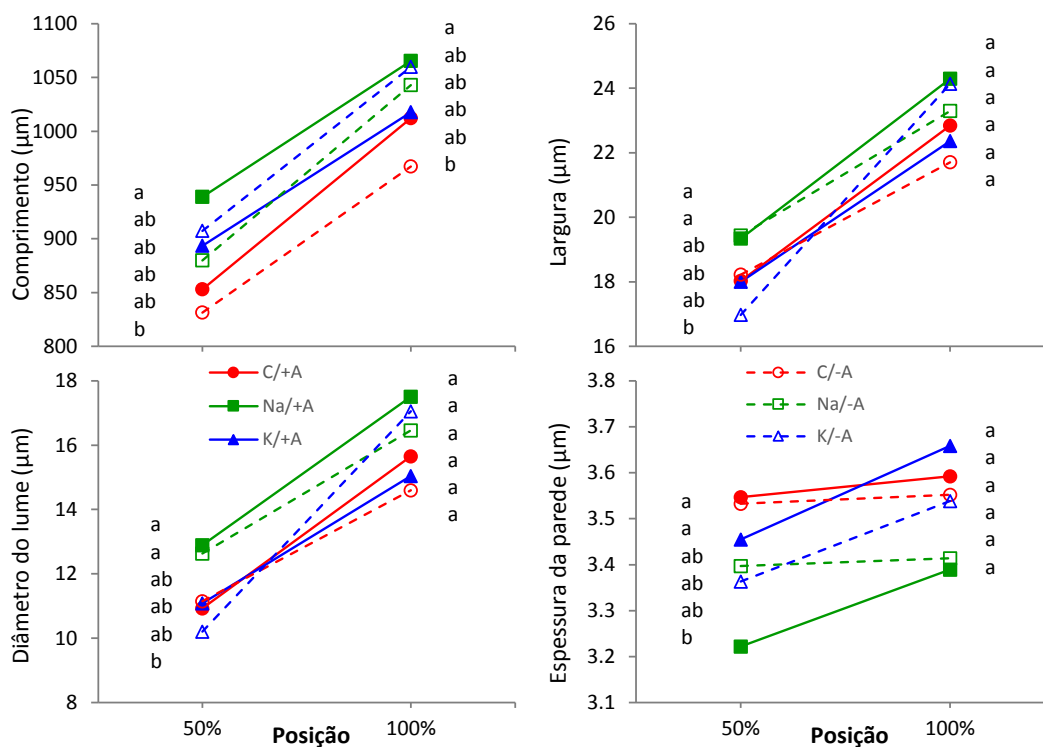


Figura 16 - Dimensões médias das fibras no lenho das árvores de *E. grandis* - comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede, por tratamento a 50 e 100% do raio das amostras do lenho, no 47° mês após plantio. Pontos com a mesma letra na posição radial indicam que médias não diferem entre si (teste Tukey, 5% de significância)

Em ausência de interação significativa do regime hídrico vs. fertilização, o regime hídrico não mostra efeito significativo nas dimensões das fibras nas duas posições radiais (Figura 17A e Tabela 9). No entanto, para o fator fertilização (Figura 17B e Tabela 9), no lenho a 50% do raio destaca o efeito do Na na formação de fibras mais longas, largas de maior lume e menos espessas, em quanto que o potássio não influenciou para mudanças nas dimensões das fibras. No lenho a 100% do raio, o efeito de ambos fertilizantes é menor, com Na apenas influenciando na formação de fibras mais longas e de maior lume, e K manteve-se sem efeito nas dimensões das fibras. Além, os efeitos de K e relação ao Na, não diferem significativamente nas dimensões das fibras, exceto na largura e diâmetro do lume a 100% do raio (Figura 17B).

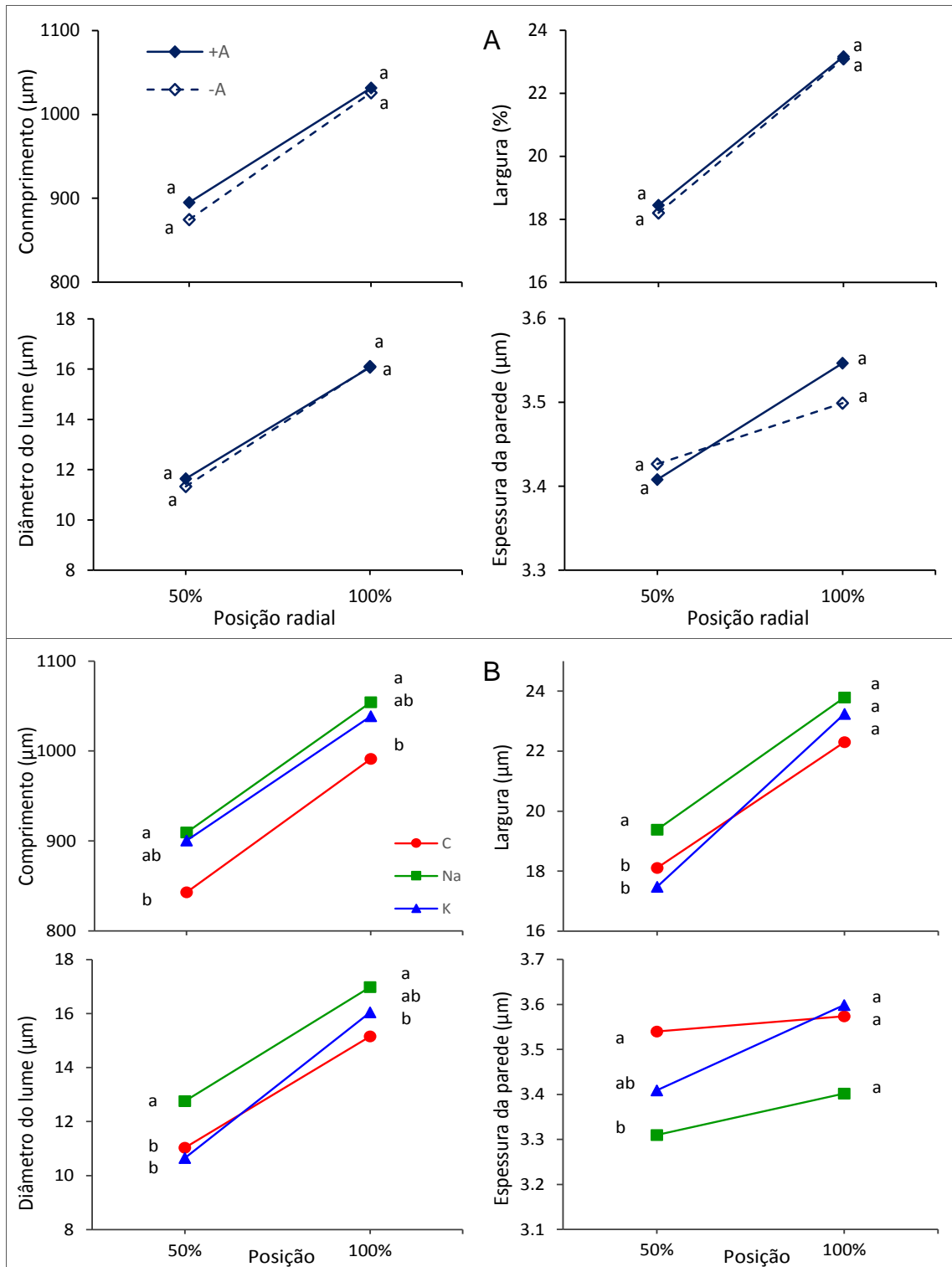


Figura 17 - Dimensões médias das fibras no lenho das árvores de *E. grandis* - comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede, por (A) nível de regime hídrico e por (B) nível de fertilização, a 50 e 100% do raio das amostras do lenho, no 47º mês após plantio. Pontos com a mesma letra na posição radial indicam que médias não diferem entre si (teste Tukey, 5% de significância)

O valor das dimensões das fibras a 50% do raio das amostras do lenho é concordante com o reportado por Castro (2014) na avaliação de árvores ao 24º mês, com algumas diferenças próprias da amostragem do caule de árvores diferentes.

Pela análise integrativa da média das 2 posições radiais do tronco das árvores e as dimensões das fibras verifica-se o efeito dos fatores no desenvolvimento do lenho das árvores de eucalipto; assim, a Figura 18 mostra a comparação de médias (integrando as 2 posições, retirado o efeito da posição radial). Concordante com o descrito na análise por posição radial observa-se que o comprimento das fibras no lenho das árvores com o K e o Na é mais longo; ainda, o Na mostrou um efeito de aumento da largura e do diâmetro do lume das fibras, com K não se diferenciando do controle. Em relação à espessura da parede das fibras, no lenho das árvores de eucalipto fertilizadas com Na as fibras tem menor e significativa espessura da parede em relação ao controle e ao K.

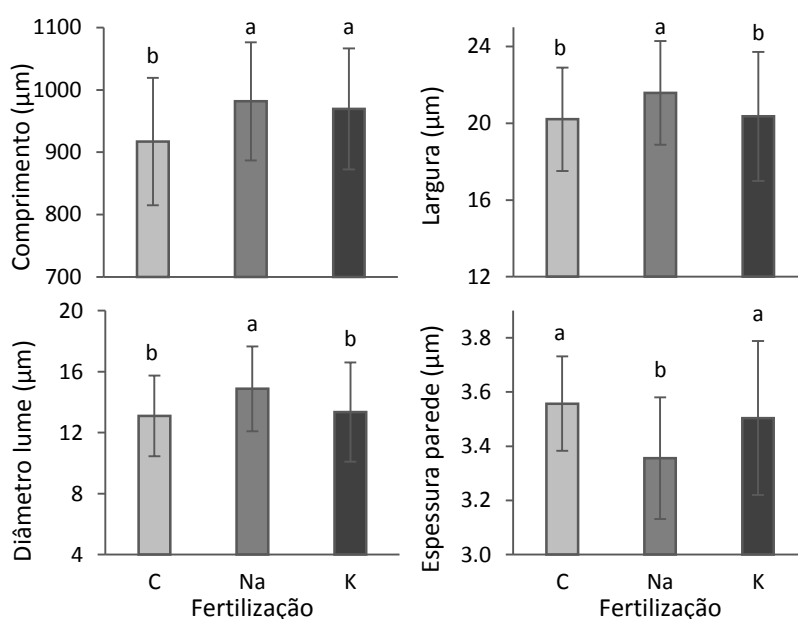


Figura 18 – Médias globais das dimensões das fibras do lenho das árvores de *E. grandis* - comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede, por nível de fertilização, no 47º mês após plantio. Letras acima das barras, diferentes entre barras, indicam diferença significativa de médias entre os níveis ($p < 0.05$). As barras de erros representam ao desvio padrão da média

Os resultados concordam com o reportado em experimento com árvores de *E. grandis* de mesma idade, com o Na promovendo a formação de fibra menos espessa e com maior diâmetro do lume no tronco das árvores de eucalipto; o K não tem efeito significativo em relação ao controle (SETTE JUNIOR et al., 2014); da mesma forma, a fertilização com NPK não influenciam a dimensão das fibras no

lenho do tronco das árvores de eucalipto (LIMA et al., 2010). Para árvores de *E. grandis* de 8 anos, no entanto, a fertilização com K e Na induziu a formação de fibras de parede mais delgada e de maior diâmetro do lume no lenho formado no último ano, principalmente (FRANCO, 2014).

Os resultados indicam, ainda, que o Na favoreceu a formação de fibras mais longas, com o K não mostrando efeito significativo; sendo diferentes do reportado por Sette Junior et al. (2014) quem não detectou efeito dos fertilizantes na dimensão das fibras no lenho de árvores de eucaliptos; da mesma forma diferente do apresentado por Franco (2014) que obteve fibras mais longas no lenho das árvores de eucalipto de 8 anos, com K e não com Na.

Assim, os resultados do presente trabalho e dos anteriores evidenciam que o Na induz o acréscimo no comprimento, largura e diâmetro do lume e decréscimo na espessura da parede das fibras do lenho das árvores de eucalipto; o efeito do K em relação à dimensão das fibras parece ser significativo em árvores de eucalipto de maior idade.

Em relação ao regime hídrico, a inexistência de diferença significativa para a dimensão das fibras - redução da precipitação (-A) e normal (+A) - indica que, possivelmente, a exclusão de 37% da chuva não resulta num significativo estresse hídrico no lenho das árvores de eucalipto. A literatura reportando o efeito de redução da disponibilidade hídrica na dimensão das fibras do lenho das árvores de eucalipto é escassa; as avaliações de Castro (2014) do 12º ao 36º mês mostram que, em geral, a menor disponibilidade hídrica não afeta a dimensão das fibras, corroborando os resultados do presente estudo.

O efeito de nutrientes como N, P, Br e outros em conjunto com o K tem sido avaliado, por exemplo, a fertilização com N e P tem efeito negativo no comprimento das fibras em sítios mais secos (RAYMOND; MUNERI, 2000); a fertilização nitrogenada (N) não tem efeito na dimensão das fibras (CHANDRASEKHARA PILLAI et al., 2013; ASSIS, 2013), enquanto que o P diminui a espessura da parede e aumenta o diâmetro do lume das fibras em plantas de eucaliptos (THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2005).

A função fisiológica do elemento mineral na formação e na estrutura anatômica do lenho das árvores não é, ainda, perfeitamente elucidada; para o P reportou-se que, quando sua menor disponibilidade ocorre, preferencialmente, as plantas destinam os recursos para engrossamento da parede das fibras em vez da formação

de novas fibras no lenho, e conseqüente aumento da densidade do lenho, pela inibição da atividade cambial (THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2005). Assim, de forma similar, grande quantidade de K ou Na, pode induzir a formação de novas células no tronco, a partir da atividade cambial e, assim, aumentar o volume de lenho, em vez do engrossamento da parede das fibras, dessa forma se reduz a densidade do lenho (ver item Densidade Básica, pág. 87), mas estudos específicos são necessários para esclarecer a forma na que atuam o K e Na para a formação do lenho.

Considerando a região intermediária (50% do raio) e externa do lenho (100% do raio) das árvores de eucalipto, independente do tratamento, verifica-se que o comprimento das fibras varia de 831-1065 μm , semelhante ao de outras pesquisas com árvores de eucalipto, de 4 anos, com K e Na; Sette Junior (2009) reporta variação de 841-1059 μm no comprimento das fibras; no lenho de árvores de 3 anos, o comprimento das fibras varia de 791-937 μm (FREITAS et al, 2015), com menor do comprimento em árvores mais jovens. Bhat, Bhat e Dhamodaran (1990) indicaram que o comprimento da fibra aumenta com a idade das árvores, e reportou fibras de comprimento médio de 810 μm para árvores de *E. grandis* de 3 anos; em *E. grandis* de 6 anos a média do comprimento da fibra variou de 800-840 (CHANDRASEKHARA PILLAI et al., 2013); outros autores reportam para árvores de *E. camaldulensis* de 5 e 6 anos não apresentam diferenças no comprimento das fibras apesar da diferença da idade (VEENIN et al, 2005).

Os resultados de outros trabalhos indicam que o comprimento das fibras é menor próximo da medula, aumentando significativamente e, então, ficando estável no lenho adulto do tronco das árvores (OHYASHI; SHIOKURA, 1990; KOJIMA et al. 2009a).

A espessura da parede das fibras variou de 3,39-3,66 μm , corroborando o resultado das análises de árvores de *E. grandis* da mesma idade (SETTE JUNIOR et al., 2014); em as árvores mais velhas de 6 anos a parede da fibra é mais espessa entre 4.12-4.21 μm (CHANDRASEKHARA PILLAI et al., 2013); existindo uma tendência de se acrescentar a espessura a maior idade; sendo demonstrado pela correlação positiva significativa da espessura da parede das fibras com a idade (10, 14, 20 e 25 anos) das árvores *E. grandis* (SILVA et al., 2007).

Nos resultados do presente estudo, a variação radial das dimensões das fibras (Figura 19) indica um aumento significativo para todos os parâmetros da região intermediária para a externa do lenho, exceto para a espessura da parede das fibras.

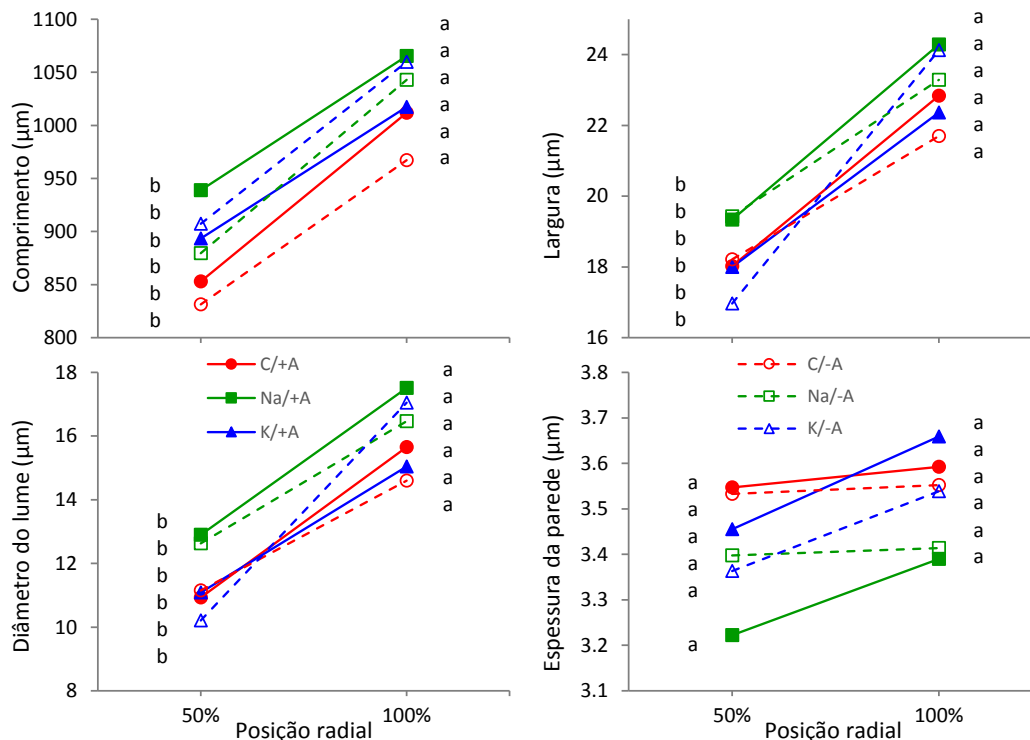


Figura 19 – Variação radial das dimensões das fibras no lenho das árvores de *E. grandis* - comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede, por tratamento, no 47º mês após plantio. Pontos com a mesma letra na posição radial indicam que as médias não diferem entre si (teste Tukey, 5% de significância).

Resultados similares são reportados na literatura, exceto para a espessura da parede das fibras, indica o aumento das dimensões no sentido radial do lenho de árvores de *E. grandis* (LIMA et al., 2010; SILVA et al., 2007); outros estudos reportam que, de 50 a 100% do raio ocorre somente o aumento do comprimento e espessura da parede das fibras em árvores fertilizadas com N (CHANDRASEKHARA PILLAI et al., 2013); para a variação radial do comprimento das fibras foram encontrados resultados similares em árvores de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* (QUILHO; MIRANDA; PEREIRA, 2006); igualmente, Jorge, Quilhó e Pereira (2000) reportaram uma variação radial significativa e crescente do comprimento das fibras no lenho de árvores de *E. globulus*.

A tendência observada no sentido radial do lenho do tronco das árvores adultas indica que conforme a árvore envelhece forma fibras mais longas, de maior diâmetro e maior lume; as pesquisas indicam que, depois de formado o lenho adulto, a

tendência de se acrescentar se mantém, isto é mostrado em árvores de *E. grandis* de 10^o até o 25^o ano (LIMA et al., 2010; SILVA et al., 2007); em árvores jovens a mesma tendência positiva foi observada para as árvores de 7 anos (ROCHA; FLORSHEIM; COUTO, 2004).

A dimensão das fibras varia no tronco das árvores em função de sua idade e da posição radial, além dos tratamentos silviculturais (GONÇALVES et al., 2004b; MACDONALD; HUBERT, 2002), da qualidade do sítio (MACDONALD; HUBERT, 2002) e do ritmo de crescimento das árvores. Neste aspecto, o resultado do trabalho evidencia que, apenas para o comprimento das fibras, o crescimento do tronco exerce certa, influência, embora fraca ($r=0,37$ $p<0,05$) (Figura 20); outros estudos relacionando a taxa de crescimento do tronco com o comprimento da fibra indicam relação mais baixa e não significativa para as árvores de *E. grandis* (KOJIMA et al., 2009c), e *Eucalyptus globulus* (KOJIMA et al., 2009c; IGARTÚA; MONTEOLIVA, 2010).

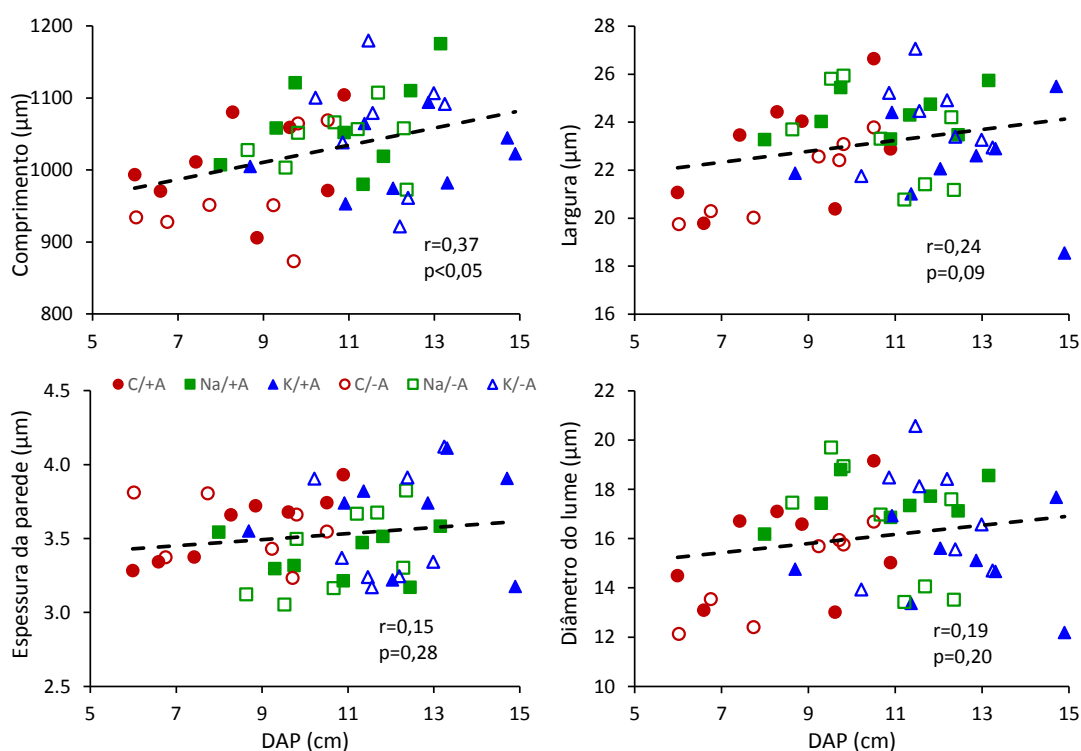


Figura 20 - Correlação das dimensões das fibras (região externa, 100% do raio) e o diâmetro (DAP) do tronco das árvores de *E. grandis*, pela média individual dos 6 tratamentos

Assim, o efeito do Na no lenho das árvores de eucalipto, induzindo a formação de fibras de maior comprimento e diâmetro do lume não é resultado da maior taxa de crescimento do diâmetro do tronco e, portanto, são alterações fisiológicas induzidas pelo Na em ausência de resposta do crescimento das árvores.

Conclui-se que o K não afeta as dimensões das fibras, o Na induz decréscimo da espessura da parede, embora induz o aumento do comprimento das fibras, melhorando este importante parâmetro de qualidade da polpa.

O presente estudo sugere que a manipulação do crescimento das árvores pela fertilização não atua em decremento significativo da qualidade da fibra, e consequentemente da polpa, e algumas perdas desejáveis na espessura da parede pelo sódio, é altamente compensado pela alta produtividade da plantação em rotações curtas.

5.2.2 Dimensões dos vasos do lenho das árvores de *Eucalyptus*

A frequência, área ocupada e o diâmetro tangencial dos vasos em 2 posições radiais do lenho das árvores de eucalipto, entre os tratamentos aplicados (Tabela 10, Figura 21) têm diferenças significativas. Para **frequência dos vasos**, os tratamentos de fertilização e regime hídrico K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A não apresentam diferenças significativas entre si (com valores decrescentes nessa ordem), sendo menores com diferença significativa em relação aos tratamentos controle (C/+A e C/-A), embora no lenho a 50% do raio, o tratamento Na/+A não foi diferente do de C/+A.

Os tratamentos com aplicação de K (K/+A e K/-A) aumentaram significativamente o **diâmetro tangencial dos vasos** em relação aos tratamentos controle (C/+A e C/-A), nos tratamentos com Na (Na/+A e Na/-A) também houve aumento do diâmetro dos vasos, mas as diferenças foram menores em relação ao controle (C/+A e C/-A). A análise de variância das 3 variáveis dos vasos no lenho das árvores de eucalipto não evidenciou efeito significativo da interação do regime hídrico e a fertilização.

A **área ocupada por vasos** das amostras do lenho, teve interação com a posição radial, com maiores valores na região intermediária (50%) para os tratamentos K/+A, K/-A, Na/+A e Na/-A, no entanto menores valores na região externa do lenho (100% do raio), em comparação com os tratamentos controle C/+A e C/-A; mas de qualquer forma apenas apresentou-se diferença significativa entre K/+A e C/-A na região intermediária, e entre C/+A e Na/+A na região externa do lenho.

Tabela 10 – Dimensões médias dos vasos no lenho das árvores de *E. grandis* – frequência, diâmetro, área ocupada (%), por tratamento e fatores regime hídrico e fertilização, a 50 e 100% do raio do lenho das amostras, no 47º mês após plantio

| | Posição do raio | Frequência (n°/mm ²) | | Diâmetro tangencial (µm) | | Área ocupada (%) | | | | |
|--|-----------------|----------------------------------|----|--------------------------|--------|------------------|-------|-------|-----|------|
| | | Média | DP | Média | DP | Média | DP | | | |
| Tratamento (Regime hídrico + Fertilização) | C/+A | 22,48 | ab | 3,83 | 80,30 | bc | 9,89 | 14,49 | bc | 1,03 |
| | Na/+A | 18,09 | bc | 3,09 | 93,51 | ab | 10,20 | 16,01 | abc | 1,39 |
| | K/+A | 16,10 | c | 2,57 | 99,04 | a | 10,51 | 17,55 | a | 1,99 |
| | C/-A | 23,97 | a | 5,18 | 75,74 | c | 7,04 | 13,89 | c | 1,27 |
| | Na/-A | 17,45 | c | 2,87 | 92,67 | ab | 11,02 | 16,01 | abc | 1,96 |
| | K/-A | 15,19 | c | 0,98 | 99,05 | a | 7,40 | 16,94 | ab | 2,58 |
| | C/+A | 16,59 | a | 2,68 | 94,65 | bc | 7,73 | 14,98 | a | 1,69 |
| | Na/+A | 12,06 | b | 1,94 | 101,24 | abc | 9,42 | 12,85 | c | 0,70 |
| | K/+A | 11,56 | b | 1,30 | 112,89 | a | 5,90 | 14,73 | ab | 1,10 |
| | C/-A | 16,63 | a | 2,86 | 92,68 | c | 8,66 | 14,42 | abc | 0,77 |
| | Na/-A | 12,00 | b | 1,68 | 104,96 | ab | 8,91 | 13,30 | bc | 0,87 |
| | K/-A | 10,38 | b | 0,59 | 111,94 | a | 5,68 | 14,06 | abc | 0,85 |
| Fator Regime hídrico | +A | 18,89 | a | 4,10 | 90,95 | a | 12,63 | 16,01 | a | 1,93 |
| | -A | 18,65 | a | 4,91 | 89,74 | a | 12,91 | 15,69 | a | 2,32 |
| | +A | 13,40 | a | 3,03 | 102,93 | a | 10,73 | 14,19 | a | 1,53 |
| | -A | 12,85 | a | 3,20 | 103,65 | a | 10,95 | 13,90 | a | 0,93 |
| Fator Fertilização | C | 23,18 | a | 4,41 | 78,17 | b | 8,70 | 14,21 | b | 1,14 |
| | Na | 17,77 | b | 2,90 | 93,09 | a | 10,26 | 16,01 | a | 1,64 |
| | K | 15,65 | b | 1,93 | 99,04 | a | 8,78 | 17,24 | a | 2,25 |
| | C | 16,61 | a | 2,66 | 93,73 | c | 7,94 | 14,72 | a | 1,33 |
| | Na | 12,03 | b | 1,75 | 103,10 | b | 9,06 | 13,08 | b | 0,80 |
| | K | 10,97 | b | 1,15 | 112,41 | a | 5,62 | 14,39 | a | 1,01 |

Valores na coluna DP representam o desvio padrão, médias de tratamentos seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

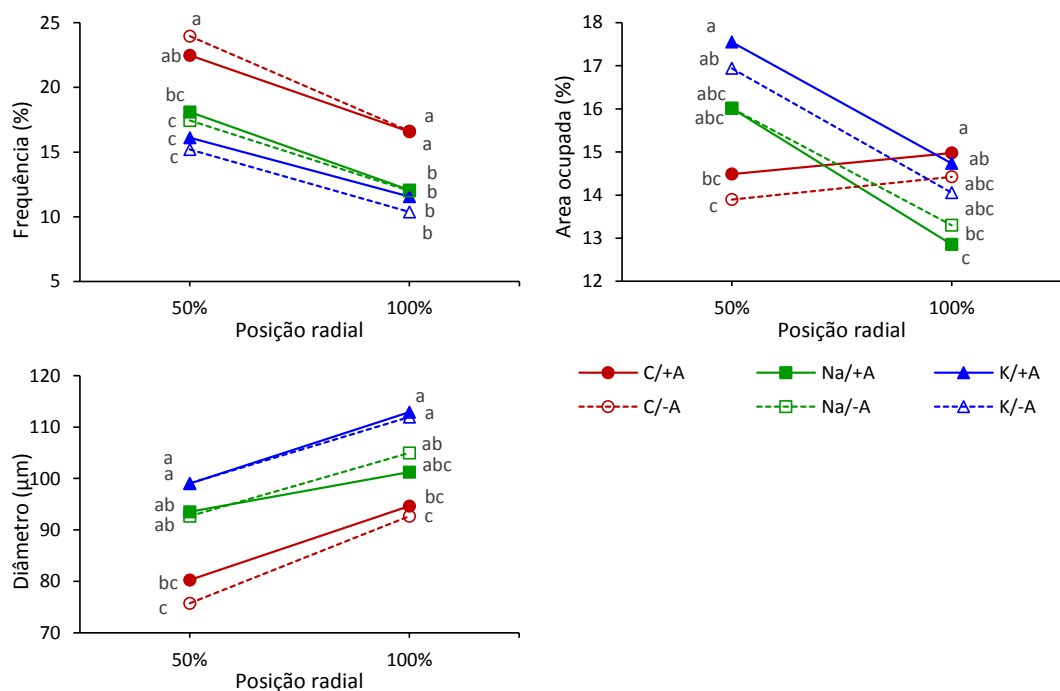


Figura 21 – Dimensões médias dos vasos no lenho das árvores de *E. grandis* - frequência, diâmetro, área ocupada (%), por tratamento, a 50 e 100% do raio, no 47º mês após plantio. Pontos com a mesma letra na posição radial, indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância)

No lenho das árvores de eucalipto a área ocupada pelos vasos é relacionada com a sua frequência e diâmetro, assim, é notório, que nos tratamentos de maior frequência e diâmetro detecte-se uma maior área de vasos. No entanto, na região externa (100%) do lenho das árvores de eucalipto do tratamento de fertilização com ou sem redução hídrica, houve forte redução da área de vasos em relação à região intermediária (50%); isto deve-se, principalmente, a redução do número de vasos/mm² sem a compensação do aumento do seu diâmetro. Na posição 100% as árvores do tratamento controle, mostraram também, a redução da frequência dos vasos, embora com maior aumento do seu diâmetro em relação aos demais tratamentos, provocando leve aumento da área de vasos na região externa (100%) do lenho comparada com a intermediária (50%). Nos tratamentos com ou sem redução hídrica, com um mesmo fertilizante, não se apresentaram diferenças significativa nas dimensões dos vasos, portanto, a menor disponibilidade hídrica não afetou as dimensões dos vasos, e assim as diferenças entre os tratamentos são devidas, principalmente, ao efeito da fertilização. A Tabela 10 evidencia, também, a comparação de médias por fator, reafirmando a tendência encontrada na análise por tratamentos.

No lenho das árvores de eucalipto verifica-se que a redução da disponibilidade hídrica não promoveu mudanças significativas nos vasos nas regiões intermédia (50%) e externa (100%) do lenho das árvores (Figura 22A).

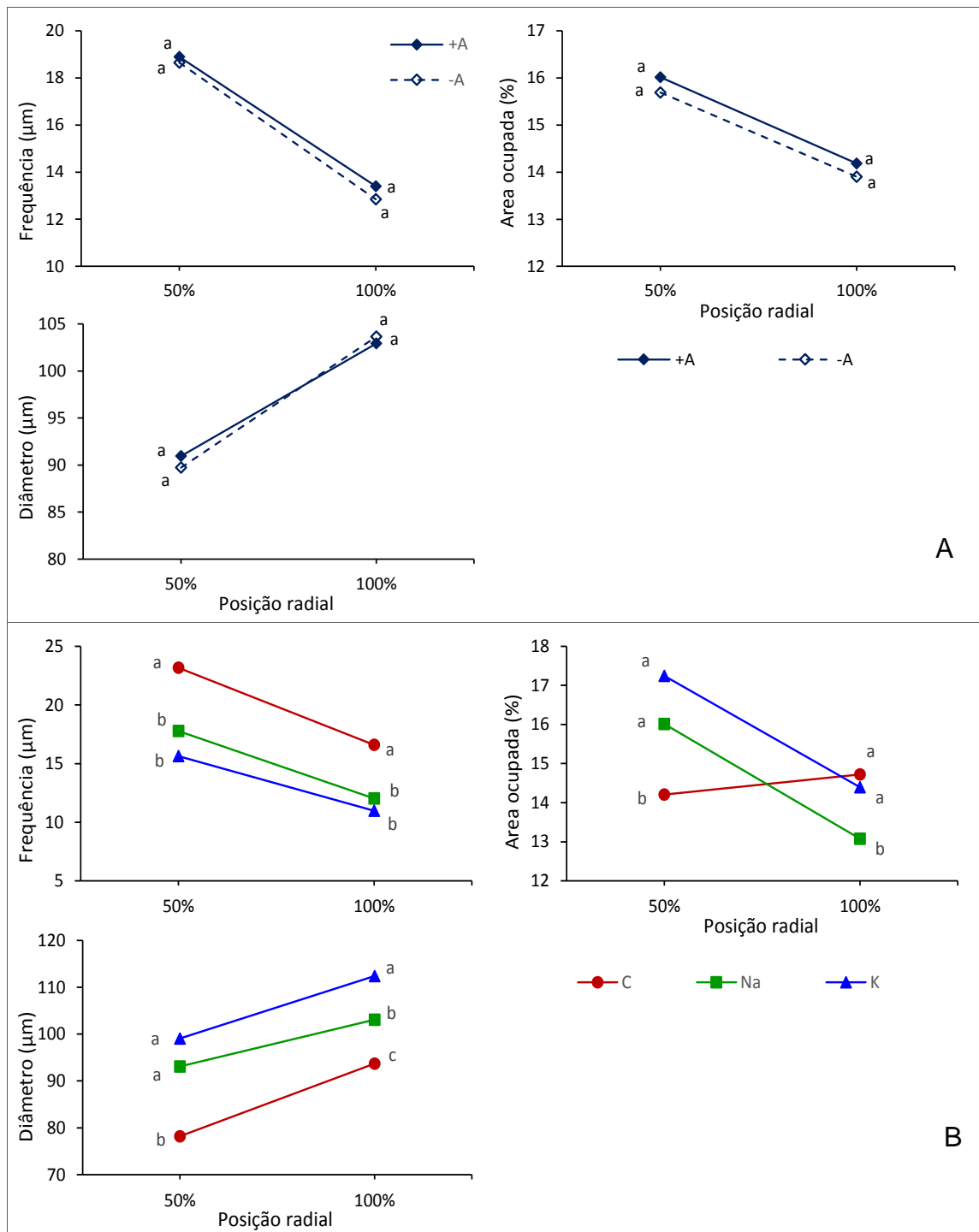


Figura 22 – Dimensões médias dos vasos no lenho das árvores de *E. grandis* - frequência, diâmetro, área ocupada (%), por (A) regime hídrico e (B) fertilização, a 50 e 100% do raio do lenho das amostras, no 47º mês após plantio. Pontos com a mesma letra na posição radial, indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância)

A análise da variância integrando a média das 2 posições radiais - retirando o efeito da posição - mostrou a mesma tendência da análise por posição radial; a redução da disponibilidade hídrica (-A) não afetou a frequência, diâmetro e área dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com valor muito similar (Figura 23A).

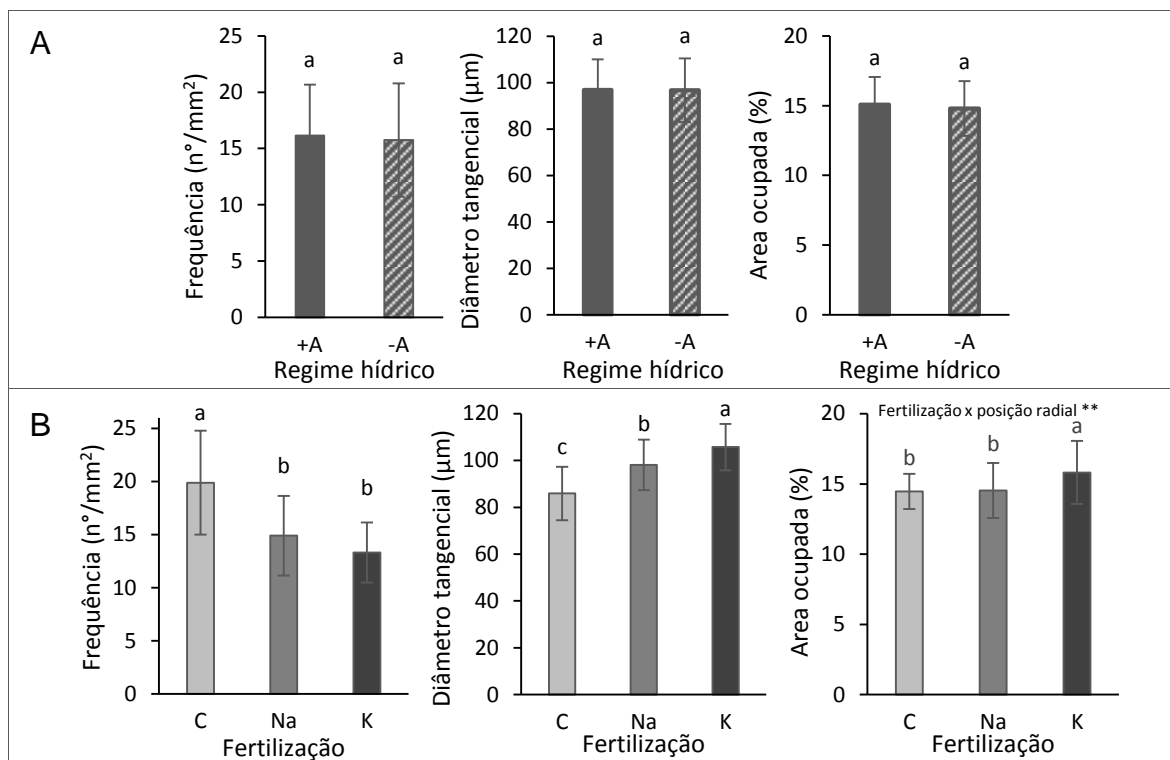


Figura 23 – Dimensões médias dos vasos no lenho das árvores de *E. grandis* - frequência, diâmetro, área ocupada (%), por níveis de (A) regime hídrico e (B) fertilização, no 47º mês após plantio. ** Área ocupada dos vasos teve interação significativa da posição radial. Letras acima das barras, diferentes entre barras por idade, indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). As barras de erros representam ao desvio padrão da média

Em relação ao efeito da fertilização, houve diferença significativa na avaliação dos vasos no lenho das árvores de eucalipto (Figura 22B), com o K e o Na reduzindo a frequência e aumentando o diâmetro dos vasos na região intermediária e externa, sem diferença significativa entre as árvores fertilizadas com Na e as com K, exceto para o diâmetro dos vasos na região externa do lenho. Além K e Na induziram a formação de lenho com mais área ocupada por vasos na região intermediária (50% do raio), embora sem efeito na região externa (100% do raio) (Figura 22B).

No fator fertilização, a análise integrando a média das posições radiais, excluindo o efeito da variação radial (Figura 23B), indicou a tendência já observada na análise por posição radial; os K e o Na induziram o decréscimo da frequência dos vasos com acréscimo do seu diâmetro tangencial, principalmente para o K no lenho

das árvores; para a área ocupada por vasos o K, em geral, resulta em maior área de vasos no lenho das árvores, com interação significativa da fertilização x posição radial, sendo que região externa (100%) não difere significativamente do controle (Figura 22B).

A literatura reporta que no lenho de árvores de espécies de eucalipto a limitação da água no solo, de modo geral, resulta na diminuição do diâmetro e aumento da frequência dos vasos (BAAS; SCHWEINGRUBER 1987; ZHANG; DENG; BAAS, 1988; FEBRUARY, 1993). Este comportamento foi, da mesma forma, reportado no lenho das árvores jovens de *E. grandis* (FEBRUARY et al., 1995) como também em estágios iniciais de *E. grandis* e *E. occidentalis* (SEARSON et al., 2004). Os estudos sugerem que as árvores apresentam 2 estratégias para melhorar a eficiência do transporte da água quando a disponibilidade hídrica é baixa, sendo (i) aumentando a área do xilema funcional (alburno) do tronco das árvores, (ii) alterando a estrutura anatômica dos elementos de vaso do seu lenho, relacionados com a condutividade hidráulica, como as modificações do diâmetro, comprimento e frequência dos vasos (EWERS, 1985). Assim, o aumento da frequência dos vasos e diminuição do diâmetro dos vasos constitui-se em adaptação da planta em resposta ao estresse hídrico para compensar a perda da capacidade de transporte da água com a redução do diâmetro dos vasos (SEARSON et al., 2004). Além disso, a literatura indica que as árvores de *E. grandis* são altamente intolerantes às condições climáticas adversas resultando em significativa redução do crescimento em sítios secos (BODEN, 1991); para esta espécie a disponibilidade de água é um dos fatores mais importantes e que altera a estrutura anatômica do seu lenho, demonstrando a alta plasticidade a redução da disponibilidade hídrica (FEBRUARY et al. 1995).

No presente estudo, a menor disponibilidade hídrica não alterou a frequência nem o diâmetro dos vasos; e em base aos antecedentes dos estudos anteriores descritos, isto pode indicar que nas árvores a exclusão de 37% da chuva não gerou estresse hídrico considerável, que ocasionasse a necessidade de regular a condutividade hidráulica do tronco, e, portanto, provocar mudanças na anatomia do lenho para sua adaptação ao meio. A real diminuição da disponibilidade hídrica talvez tenha sido interferida por outros fatores, como o mecanismo de maior

desenvolvimento das raízes em busca de água disponível (DYE, 1996; REIS et al., 2006; BATTIE-LACLAU et al., 2014b).

Apesar que existiram diferenças significativas no diâmetro e frequências dos vasos entre os tratamentos, verificou-se que a área do lenho ocupada por vasos não é alterada, isto é devido a que uma maior frequência de vasos compensa a área ocupada por vasos menores (FEBRUARY et al., 1993); concordando com estes resultados, outros pesquisadores, como Atwell et al. (2000), reportam que a área ocupada por vasos é conservada no lenho das árvores de *E. teretecornis* em condições de limitação da disponibilidade de água; e, também, por February et al. (1995) em estudo do lenho de árvores de *E. grandis* irrigadas e com limitação de água, evidenciando que a área de vasos permaneceu inalterada; e Searson et al. (2004) no xilema de mudas de *E. grandis* demonstrando a inalterabilidade da área ocupada por vasos a pesar da diferenças no diâmetro e frequência dos vasos. No resultado do processo de adaptação do lenho das árvores ao déficit hídrico, com o aumento da frequência e diminuição do diâmetro dos vasos, não mantém o nível de condutividade hidráulica do xilema, pela relação da quarta potência entre o raio (ou diâmetro) do vaso e a condutividade hidráulica; menor taxa de condutividade hidráulica, foi obtida para o lenho de árvores com limitação de água, em comparação com as irrigadas, apesar da igual área ocupada por vasos (SEARSON et al., 2004).

O efeito do K e Na no sistema condutor (características dos vasos) do lenho das árvores de eucalipto tem poucos estudos relatados na literatura. As informações disponíveis, mostram concordância com os resultados do presente estudo, por exemplo Castro (2014) relatou em árvores de eucaliptos grandis de 3 anos, do mesmo experimento, que o lenho das árvores com K apresentou vasos de maior diâmetro e menor frequência significativo em relação ao Na e o controle, embora sem alteração do valor da área ocupada pelos vasos; o Na não mostrou efeito na dimensão e na frequência dos vasos. Similarmente, Sette Junior et al. (2014) reporta a mesma tendência no lenho de árvores de *E. grandis* de 4 anos, o K promoveu o aumento do diâmetro e área ocupada por vasos. No lenho e árvores de eucalipto de 8 anos, verificou-se resultados mais similares por Franco (2014) que reportou o efeito significativo do Na e o K acrescentando o diâmetro dos vasos, mas só o K mostrou efeito na redução da frequência dos vasos.

Similar ao presente trabalho, nos estudos citados, os efeitos do K e Na de acréscimo do diâmetro e decréscimo da frequência dos vasos, se mantem ao longo

do raio do lenho (SETTE JUNIOR et al., 2014; FRANCO, 2014; CASTRO, 2014), mas o efeito na área ocupada por vasos é variável não existindo uma tendência definida.

O efeito da aplicação de fertilizante NPK, também mostra efeitos similares aos do K e Na na frequência dos vasos; no lenho de árvores de *E. grandis* de 21 anos, em que o NPK afetou diminuindo a frequência dos vasos, em comparação com o tratamento sem fertilização (LIMA et al., 2010).

Em relação às funções fisiológicas dos vasos no lenho das árvores indica-se que um pequeno aumento do seu raio (ou diâmetro) resulta em significativo aumento da condutividade hidráulica (Zimmermann, 1983). Battie Laclau (2013) observou para as árvores de eucalipto, do mesmo experimento que, independente do regime hídrico, a fertilização com K induzia o dobro do valor do fluxo de seiva, em comparação com as árvores sem aplicação de K, significando maior eficiência hidráulica e maior consumo de água pelas árvores. Portanto, o lenho das árvores de eucalipto com K e Na possui vasos de maior diâmetro, propiciando maior transporte ascendente de seiva mineral, resultando em maior atividade fotossintética e produção de biomassa.

O conhecimento do mecanismo de adaptação da planta com a menor disponibilidade hídrica é bem reportado na literatura para atenuar a perda de condutividade hidráulica; analogamente no presente estudo demonstrou-se que a aplicação de K vai promover um mecanismo de adaptação provocando maiores mudanças significativa nos vasos, para aumentar a condutividade hidráulica para maior consumo de água, que permitisse altas taxas de crescimento. Os resultados do presente trabalho permitem, portanto, o melhor entendimento da influência do K na função fisiológica e morfológicas dos vasos como mecanismo de adaptação para um maior crescimento.

A variação radial das dimensões dos vasos em 2 posições do lenho das árvores de eucalipto (Figura 24) por tratamento de fertilização e de disponibilidade de água indica, para todos os tratamentos um (i) aumento significativo do diâmetro tangencial e (ii) diminuição significativa da frequência dos vasos, da posição intermediária (50% do raio) a externa (100% do raio). O modelo de variação radial reportado no lenho do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* confirma os reportados para outras espécies do gênero; assim, no lenho juvenil de árvores de *E.*

camaldulensis, *E. globulus* e *E. grandis*, a dimensão dos vasos aumenta e sua frequência diminui da medula até a casca (VEENIN et al., 2005; LEAL et al., 2004; RAMIREZ et al., 2009; CARRILLO et al., 2015; SETTE JUNIOR et al., 2014). Da mesma forma, no lenho adulto de árvores de *E. citriodora* e *E. propinqua* verifica-se o mesmo modelo de variação radial para os elementos de vaso (SHASHIKALA; VIJENDRA RAO, 2009; LONGUI et al., 2014).

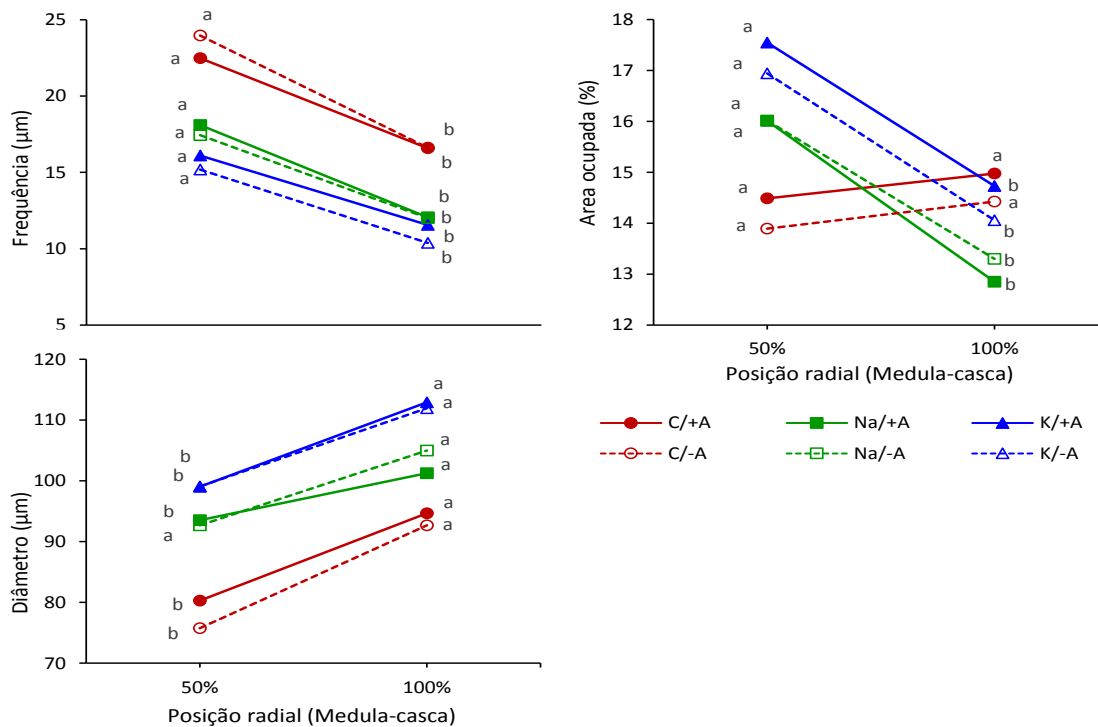


Figura 24 – Variação radial das dimensões dos vasos no lenho das árvores de *E. grandis* - frequência, diâmetro, área ocupada (%), no 47º mês após plantio. Pontos com a mesma letra na posição radial, indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância)

No sentido radial (medula-casca) do lenho das árvores a **área de vasos** diminui significativamente em 2.71-3.16% nos tratamentos com fertilização de K ou Na e, contrariamente, aumentou ligeiramente nos tratamentos controle em 0.49-0.53%, embora sem variação significativa (Figura 24); a literatura indica que, em geral, a área de vasos não apresenta variação radial característica para as árvores de *E. globulus* (LEAL et al., 2004; RAMIREZ et al., 2009), *E. camaldulensis* (VEENIN et al., 2005). No entanto, Freitas et al. (2014) e Sette Junior et al. (2014) reportam que a área de vasos aumenta significativamente no sentido medula-casca no lenho das árvores de eucaliptos com fertilização e controle.

No sentido radial do lenho das árvores de eucalipto, o aumento do diâmetro e a correspondente diminuição da frequência dos vasos possibilitam o maior fluxo ascendente de seiva mineral e maior condutividade hidráulica, necessárias para o desenvolvimento e o crescimento das árvores. A relação do crescimento do lenho das árvores e as características dos vasos (Figura 25) permite explicar esta tendência.

No sentido radial do lenho das árvores com fertilização de K ou Na, a diminuição dos vasos constitui-se em resultado novo e que demanda o entendimento de ordem fisiológica e funcional.

Os estudos que indicam o efeito da aplicação de fertilizantes nas dimensões dos vasos no lenho das árvores de eucalipto relacionam-se com a sua taxa de crescimento; menor frequência e maior diâmetro dos vasos são relacionados ao maior diâmetro do tronco das árvores, induzido pela aplicação de fertilizantes (BAMBER; HORNE; GRAHAM-HIGGS, 1982; MALAM, 1989 apud MALAM, 1991); mesma tendência foi encontrada quando comparadas as árvores de eucalipto de rápido e de lento crescimento (WILKES; ABBOTT, 1983); de modo similar, no lenho das árvores de eucalipto da classe dominada (menor diâmetro) verifica-se maior frequência dos vasos, em relação às da classe dominante (maior diâmetro) (ROCHA; FLORSHEIM; COUTO, 2004; FLORSHEIM et al., 2000), com tendência contrária para o diâmetro dos vasos (FLORSHEIM et al., 2000).

Os resultados do presente trabalho corroboraram estas relações reportadas para as dimensões dos vasos e a taxa de crescimento do tronco das árvores de eucalipto; a relação entre os vasos e o DAP do tronco, de todas as árvores avaliadas, indica que a variação da frequência, diâmetro e área dos vasos obedece à taxa de crescimento do tronco, influenciada pela aplicação dos tratamentos. Na Figura 25, são descritas as correlações das dimensões dos vasos e o DAP do tronco das árvores, como a forte, significativa e negativa correlação com a frequência dos vasos ($r=-0.87$ $p<0.0001$) e positiva com o diâmetro dos vasos ($r=0.89$ $p<0.0001$); a correlação da área ocupada por vasos e o DAP do tronco mostrou menor robustez, embora altamente significativa ($r=0.50$ $p=0.0004$).

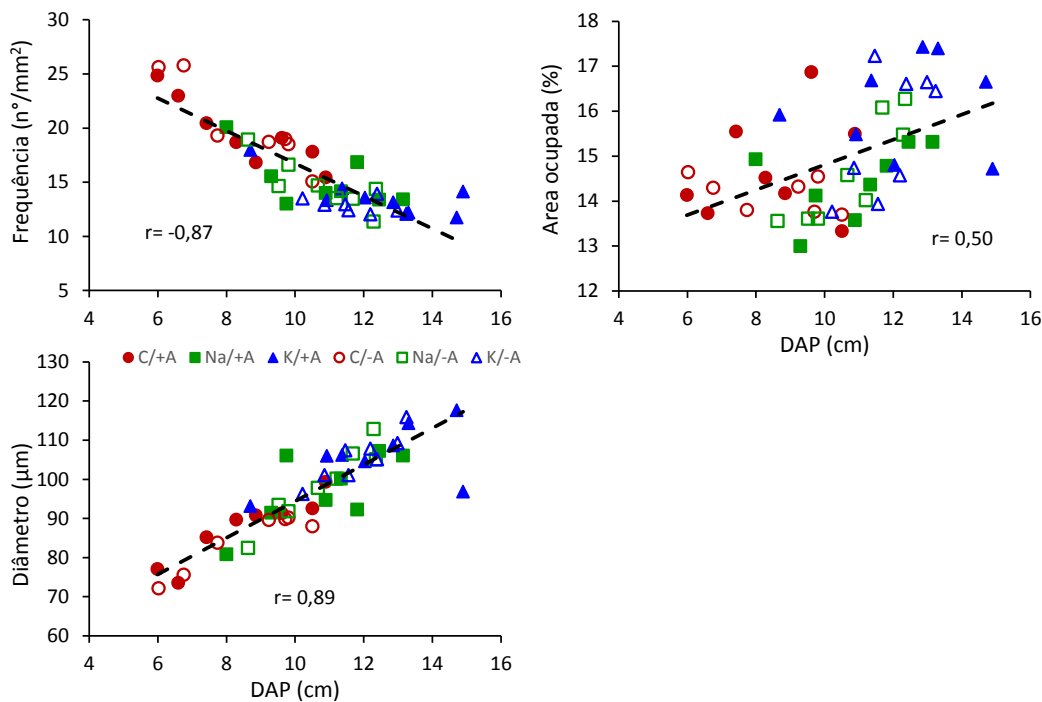


Figura 25 - Correlações entre as dimensões dos vasos da parte mais externa (100% do raio) e o DAP, plotando médias individuais, nos seis tratamentos, no 47º mês após plantio

O coeficiente de determinação demonstra que a variação do DAP do tronco das árvores explica 75% da variação da frequência dos vasos ($r^2=0.75$), 78% da variação do diâmetro dos vasos ($r^2=0.78$) e 25% da variação da área ocupada por vasos ($r^2=0.25$), assim em quanto maior for o crescimento secundário da árvore, será formado lenho com menor frequência de vasos, embora de maior diâmetro.

As correlações por nível de fertilização mostraram coeficientes de correlação (i) muito altos no lenho das árvores de eucalipto controle ($r= -0.90$ $p<0.0001$ e $r= 0.91$ $p<0.0001$); (ii) alto, para as árvores com Na ($r= -0.71$ $p= 0.002$ e $r= 0.81$ $p=0.0002$) e (iii) médios, para as árvores com K ($r= -0.60$ $p=0.01$ e $r= 0.61$ $p=0.01$), respectivamente, para a frequência e o diâmetro dos vasos, reafirmando o forte efeito do crescimento, independente do tratamento aplicado.

A alta taxa de crescimento do tronco das árvores significa uma maior produção de biomassa, resultado da sua maior taxa fotossintética, com maior do consumo de água, conforme Battie Laclau (2013) para as árvores com K; portanto, a correlação (i) forte e positiva do DAP do tronco das árvores com o diâmetro dos vasos e (ii) negativa do DAP com a frequência dos vasos, reforça a hipótese sobre a mudança dos vasos como adaptação para atingir maior condutividade hidráulica do lenho das árvores e, assim, a alta taxa de crescimento.

5.3 Propriedades físicas do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*: densidade do lenho

5.3.1 Densidade básica do lenho

A análise da variância da densidade básica média do lenho das árvores de eucaliptos, de 4 anos de idade, por regime hídrico e fertilização (Tabela 11) mostra diferença significativa entre os níveis de cada fator, sem interação significativa entre os 2 fatores. Verifica-se que menor disponibilidade hídrica (-A) no solo pela exclusão de 37% da chuva aumentou significativamente a densidade básica do lenho das árvores de eucalipto em relação às sem exclusão de chuva (+A) (Figura 26A).

Para o fator fertilização, a aplicação de K e Na diminuiu significativamente a densidade básica do lenho das árvores de eucalipto em relação às árvores do controle (C); com o Na evidenciando maior efeito na redução da densidade do lenho, em relação ao K (Figura 26A).

Tabela 11 – Densidade básica média do lenho das árvores de *E. grandis* por fator regime hídrico e fertilização e por tratamento (Fertilização + Regime hídrico).

| | | | Densidade básica do lenho (g/cm ³) | |
|---|----------------|-------|--|-------|
| | | | Média | DP |
| Fator | Regime hídrico | +A | 0,429 b | 0,018 |
| | | -A | 0,444 a | 0,014 |
| | Fertilização | C | 0,453 a | 0,009 |
| | | Na | 0,419 c | 0,014 |
| | | K | 0,438 b | 0,011 |
| Tratamento (Regime hídrico + Fertilização) | | C/+A | 0,448 a | 0,006 |
| | | Na/+A | 0,408 c | 0,008 |
| | | K/+A | 0,430 b | 0,009 |
| | | C/-A | 0,457 a | 0,009 |
| | | Na/-A | 0,429 b | 0,009 |
| | | K/-A | 0,445 a | 0,007 |

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

Castro (2014) avaliando as árvores de *Eucalyptus grandis*, no 1^o, 2^o e 3^o anos, do mesmo experimento, verificou que a menor disponibilidade hídrica não teve efeito na densidade básica; diferindo do resultado com as árvores no 4^o ano, do presente

estudo; mas Castro (2014) assume que seus resultados foram influenciados pelas características anatômicas do lenho juvenil das árvores de eucalipto nos anos iniciais (TOMAZELLO FILHO, 1985b; TOMAZELLO FILHO, 1987; SETTE JUNIOR et al., 2012).

Mas diversos estudos corroboram os resultados do presente estudo, em que o aumento da densidade do lenho pode estar associado à diminuição da disponibilidade de água em árvores de *E. globulus* (WIMMER; DOWNES; EVANS, 2002; DOWNES et al., 2006; DREW et al., 2009), *E. nitens* (BEADLE et al., 2001) e de *E. grandis* (NAIDOO; ZBOŇÁK; AHMED, 2006; NAIDOO et al., 2007); no entanto, alguns estudos não apontam relação da densidade do lenho e o forte estresse hídrico em árvores de *E. globulus* cultivadas em solos salinos (MACFARLANE; ADAMS, 1998; CATCHPOOLE et al., 2000). Searson et al. (2004) avaliando o efeito da limitação da água na densidade do caule de mudas de eucaliptos não indicaram resultados consistentes, sendo que outros fatores como a temperatura, nutrientes do solo e os extrativos da parede celular do lenho podem interferir na detecção do efeito da limitação de água na densidade do lenho (SEARSON et al., 2004). Mesmo que não haja consenso total, os resultados sugerem que a maior disponibilidade hídrica possui uma alta probabilidade de induzir alterações nas propriedades do lenho, do que outras práticas silviculturais (GONÇALVES et al., 2004b).

O efeito de K e Na na densidade básica do lenho das árvores de eucalipto do presente estudo é considerado novo; anteriores estudos não conseguiram detectar efeito significativo do K e Na na densidade básica (SETTE JUNIOR, 2010; SETTE JUNIOR et al., 2014; FRANCO, 2014), embora as doses de fertilizante aplicados nestes estudos ($3,0 \text{ Kmol ha}^{-1}$ para Na e K) foram menores em relação ao aplicado no presente estudo ($4,5 \text{ Kmol ha}^{-1}$ de Na e K), podendo ter influenciado nos resultados, pois alguns trabalhos (ASSIS, 2013; BARBOSA et al., 2014) indicam que maior dose de fertilizante implica em redução da densidade do lenho das árvores.

No mesmo plantio avaliado Castro (2014) ao 3º ano encontrou que K e Na atua em diminuição da densidade, embora os efeitos são equivalentes entre K e Na; portanto, é importante a avaliação da densidade básica do lenho das árvores de eucalipto no 5º e 6º anos, para determinar a evolução dos efeitos de K e Na ao longo da idade das árvores.

Vale lembrar que o presente estudo compara o tratamento controle de fertilização básica (N+P+FTE) com os de fertilização básica + Na (N+P+FTE+Na) ou

+ K (N+P+FTE+K) (ver item, Métodos) e, portanto é importante diferenciar da maioria de estudos que avaliaram só o efeito do N e do P sendo que, segundo os pesquisadores, os efeitos de N e P são controversos: i) não induzem efeito na densidade (WILKINS; HORNE 1991; DEBELL; KEYES; GARTNER, 2001), ii) induzem um pequeno incremento (WILKINS, 1990; VIGNERON et al., 1995; CROMER et al., 1998), ou iii) induzem uma redução da densidade do lenho (ASSIS, 2013). Assim, o efeito isolado da fertilização com N, P, ou NP juntos, é considerado como não determinante em relação à densidade básica do lenho das árvores.

A literatura reporta que a super-fertilização (grandes doses de fertilizantes) no lenho das árvores de *E. grandis*, comparado com 2 tratamentos padrão (similar ao K do presente estudo), reduz significativamente em 8% a sua densidade básica (BARBOSA et al., 2014); no presente estudo o tratamento com K (fertilização básica + K) induziu uma redução de 3,3% da densidade do lenho das árvores em comparação com o controle (fertilização básica -K), indicando que a maior fertilização maior afetará reduzindo a densidade do lenho.

A interação da fertilização com a disponibilidade hídrica na densidade do lenho é controversa; segundo Raymond e Muneri (2000) o efeito significativo do N e P contido nos fertilizantes na densidade básica do lenho das árvores de eucalipto se expressa na interação com a precipitação; sendo que, em sítios mais secos, o NP induz a diminuição da densidade básica; mas em experimento com o controle da disponibilidade de água por irrigação, Tomazello Filho (2006) considera que N, P e K só apresentam efeito decréscimo da densidade do lenho sob árvores irrigadas. No entanto o presente estudo não encontrou interação do efeito do K e Na com o nível de disponibilidade hídrica, sendo que houve diferente grau de estresse hídrico e diferente regime hídrico aplicado do trabalho de Tomazello Filho (2006) (irrigação), e variação geográfica da precipitação no estudo de Raymond e Muneri (2000), os quais não possibilitam fazer comparações adequadas. Ainda, a inconsistência do efeito do fertilizante na densidade do lenho, pode indicar que o fertilizante interatua com o ambiente, com efeito positivo se houver disponibilidade de água para promover o crescimento das árvores no período de formação do lenho tardio (denso). Assim, pode ocorrer a diminuição ou não haver efeito na densidade média, se ocorrer restrição da disponibilidade de água na fase de formação do lenho tardio, com a razão lenho tardio/inicial diminui ou inalterada (GONÇALVES et al, 2004b).

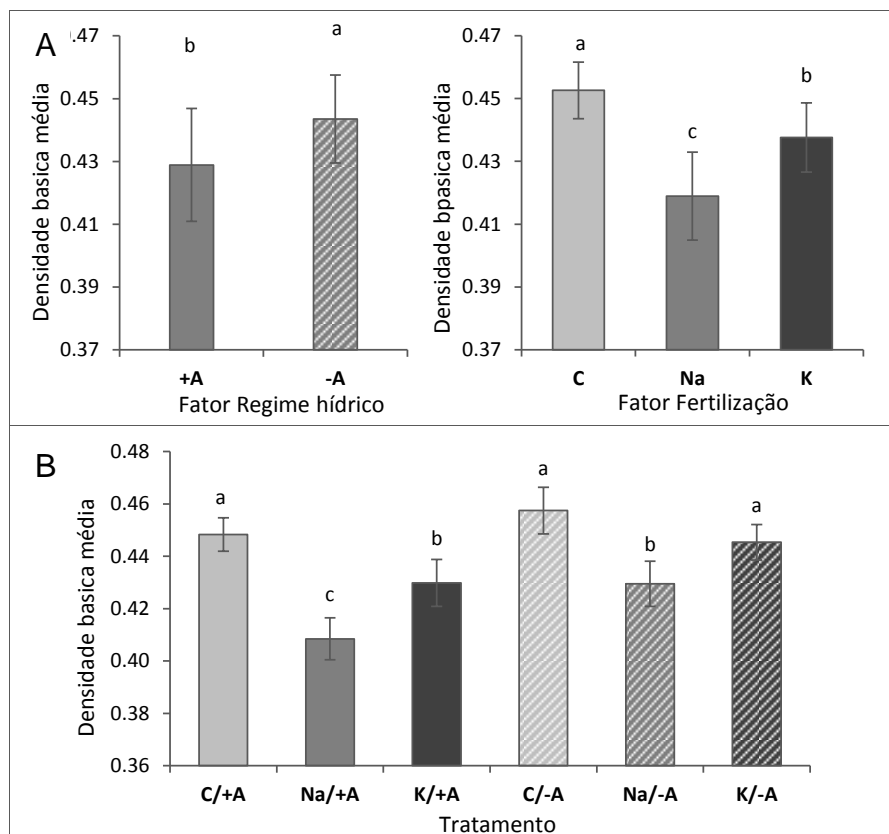


Figura 26 – Densidade básica média do lenho das árvores de *E. grandis*, por (A) níveis de regime hídrico e fertilização e (B) por tratamento, no 47º mês após plantio. Letras acima das barras, diferentes entre barras por idade, indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0.05$). As barras de erros representam ao desvio padrão da média

O resultado da análise da densidade básica média do lenho das árvores de eucalipto por tratamento (regime hídrico + fertilização) (Figura 26B, Tabela 11) indica que a densidade básica média do lenho foi significativamente menor nas árvores do tratamento Na/+A, seguido do Na/-A e K/+A diferindo do K/-A e dos controle C/-A e C/+A, sendo que estes últimos tratamentos induziram em maior valor de densidade do lenho, com diferença significativa aos demais tratamentos.

A combinação do efeito da fertilização e do regime hídrico ressalta a tendência da análise isolada por fator, e permite, também, obter interessante comparação, como (i) as árvores de eucalipto do tratamento controles com ou sem redução de chuva (C/+A e C/-A) têm a mesma densidade do lenho (diferença não significativa), quando poderia se inferir que a redução de chuva afetaria a densidade do lenho; (ii) em árvores sob condição hídrica normal, K e Na contribuem para diminuir sua densidade básica; (iii) a aplicação do K na árvores de menor disponibilidade hídrica (tratamento K/-A) não afeta a densidade do seu lenho (Figura 26B).

O valor da densidade básica do lenho, é similar ao reportado por Sette Junior (2010) em árvores de *E. grandis* da mesma idade (4 anos), também similar ao reportado por Barbosa et al. (2014) e Githiomi e Kariuki (2010), ou levemente menores ao encontrado por Assis (2013) e Tomazello Filho (2006), em árvores de 5-7 anos; com tudo para árvores de *E. grandis* a densidade básica do lenho do 4º ao 7º ano tem pouca variação, embora exista um leve aumento (GITHIOMI; KARIUKI, 2010).

Mas em comparação com árvores de idades mais avançadas, o valor da densidade do lenho das árvores do presente estudo é menor, como apresentado por Lima, Rosado e Oliveira (1992); Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005), Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005); Trevisan et al. (2012), dentre outros, devido que a partir do 8º ano a densidade do lenho aumenta consideravelmente em relação ao lenho de idades inferiores (GITHIOMI; KARIUKI, 2010). Contudo o modelo de variação da densidade do lenho mais comumente reportado na literatura indica o seu aumento com a idade das árvores (WILKINS, 1990), pela mudança das células cambiais e formação da madeira adulta (TOMAZELLO FILHO, 1985b; TOMAZELLO FILHO, 1987).

A variação anual da densidade do lenho das árvores de eucalipto (Figura 27) indica, para todos os tratamentos, um contínuo aumento do seu valor do 1º ao 4º ano. Inúmeras pesquisas reportam o efeito da idade das árvores de eucaliptos na densidade básica do lenho sendo, no entanto, escassas são as informações sobre o efeito da disponibilidade de água e da fertilização com K e Na ao longo da vida da árvore. Variação similar para a densidade básica do lenho de árvores de *E. grandis*, do 2º ao 4º ano, com K e Na, em condição edafo-climática similar foi reportado (SETTE JUNIOR, 2010). Na Figura 27, no 1º e 2º ano, não observou-se modelo característico de aumento da densidade do lenho das árvores entre tratamentos, com a fertilização (K e Na) induzindo menor densidade em relação ao controle. O lenho das árvores de eucalipto no 3º ano apresentou maior densidade no tratamento com K/-A; a maior densidade do lenho nas árvores do 4º ano dos tratamentos C/-A, C/+A, e K/-A foi mantida, com significativa redução para os tratamentos Na/-A; o K e o Na com a maior disponibilidade hídrica induziram significativo efeito supressor da densidade básica do lenho das árvores do 2º até o 4º ano.

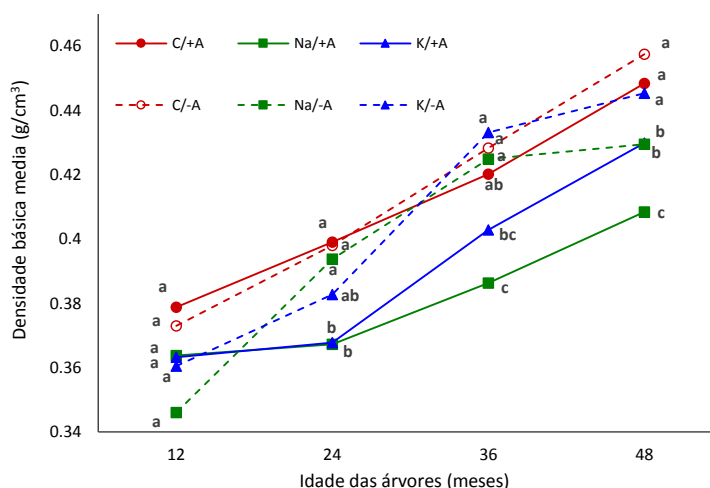


Figura 27 - Efeito da fertilização e do regime hídrico na densidade básica do lenho das árvores de *E. grandis*, do 12^o ao 48^o mês por tratamento. Pontos com a mesma letra na idade indicam que as médias não diferem entre si, pelo teste Tukey (5% de significância). Dados do 12^o ao 36^o mês foram extraídas de Castro (2014)

O resultado do presente estudo demonstra que a aplicação de fertilizantes e a menor disponibilidade hídrica atuam diminuindo a densidade básica do lenho das árvores, embora não seja afetada pela aplicação de K em menor disponibilidade hídrica. No entanto, a diminuição da densidade é compensada pelo maior volume do lenho do tronco das árvores, induzido pela aplicação do K e do Na. Mas devido ao maior efeito negativo do Na (substituindo o K na adubação básica) na densidade do lenho, sugere-se o estudo de outras possibilidades como sua adição parcial junto ao K.

Avaliando a relação da **densidade básica do lenho e o crescimento do tronco (DAP) das árvores** observou-se uma correlação fraca e negativa, embora altamente significativa ($r = -0,36$ $p < 0,01$) (Figura 28). O DAP explica o 13% da variação da densidade básica do lenho ($r^2 = 0,13$).

Os testes por tratamento indicam a inexistência de correlação entre o DAP e a densidade básica do lenho das árvores confirmando que, sob um mesmo efeito do tratamento, a taxa de crescimento do tronco não influencia a sua densidade básica.

Assim, os resultados indicam, que a densidade do lenho não está fortemente relacionada ao crescimento do tronco das árvores pela aplicação de K e Na (ou pela sua ausência). O significativo incremento do tronco das árvores influenciado pelo K e Na não acompanha, necessariamente, o valor da densidade básica do lenho; e outros fatores do ambiente e da planta (efeito fisiológico, etc.) associados à aplicação do tratamento estão influenciando no valor da densidade básica do lenho.

A literatura reporta resultado similar e com correlação mais tênue para árvores de *E. saligna* (DEBELL; KEYES; GARTNER, 2001); ainda, a inexistência de correlação para árvores de *E. globulus* (RAYMOND; MUNERI 2000; MIRANDA; ALMEIDA; PEREIRA, 2001), de *E. grandis* (KOJIMA et al, 2009c; MALAN, 1991; WILKINS; HORNE, 1991) e de *E. tereticornis* (SREEVANI; RAO, 2014). No entanto Wilkins e Horne (1991) consideram que árvores de eucalipto submetidas a tratamentos indutores de rápido crescimento podem apresentar relação forte e negativa com a densidade básica do seu lenho.

Por outro lado, árvores de *E. globulus* em plantações irrigadas e testemunha implantadas em sítios secos não mostraram o efeito da taxa de crescimento na densidade básica do lenho (DOWNES et al., 2006); este resultado é coerente com o do presente trabalho, sendo que a menor ou maior disponibilidade hídrica não mostrou relação ($r^2=0,10$ $p=0,14$) ou, ainda, uma tênue relação ($r^2=0,18$ $p<0,05$) com o DAP do tronco das árvores, respectivamente, com redução (-A) e sem redução de chuva (+A). Embora, mesmo em sítios com maior ou menor disponibilidade hídrica, a presença ou ausência da resposta do crescimento à aplicação de fertilizantes não forneceram nenhuma indicação quanto aos efeitos potenciais sobre a qualidade da madeira (RAYMOND; MUNERI, 2000).

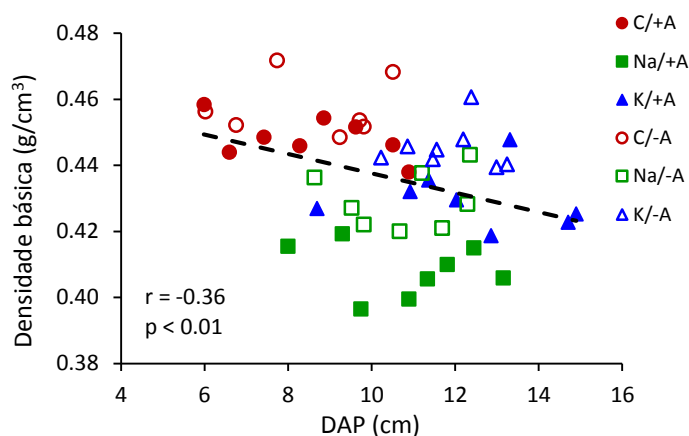


Figura 28 – Correlação da densidade básica e diâmetro do tronco (DAP) das árvores de *E. grandis* com todos os indivíduos dos 6 tratamentos, no 47º mês após plantio

Foi avaliada a **relação entre a densidade básica e a anatomia do lenho (fibras e vasos)** com a finalidade de comprovar se mudanças na densidade do lenho é provocada pela alteração da anatomia do lenho como consequência da aplicação de fertilizantes:

Em relação às fibras foram obtidas correlações regulares e altamente significativas para os dados individuais; negativas para o diâmetro do lume ($r = -0.53$ $p=0.0001$) e comprimento das fibras ($r= -0.47$ $p= 0.0007$); positiva para a espessura da parede das fibras ($r= 0.42$ $p= 0.0028$) no lenho das árvores (Figura 29A).

Em relação aos vasos foram obtidas correlações mais tênues, embora altamente significativas; positiva para a frequência ($r= 0.40$ $p= 0.005$) e negativa para o diâmetro dos vasos ($r= -0.35$ $p= 0.017$) não havendo correlação com a área de vasos ($r= -0.017$ $p= 0.912$) no lenho das árvores de eucalipto (Figura 29B).

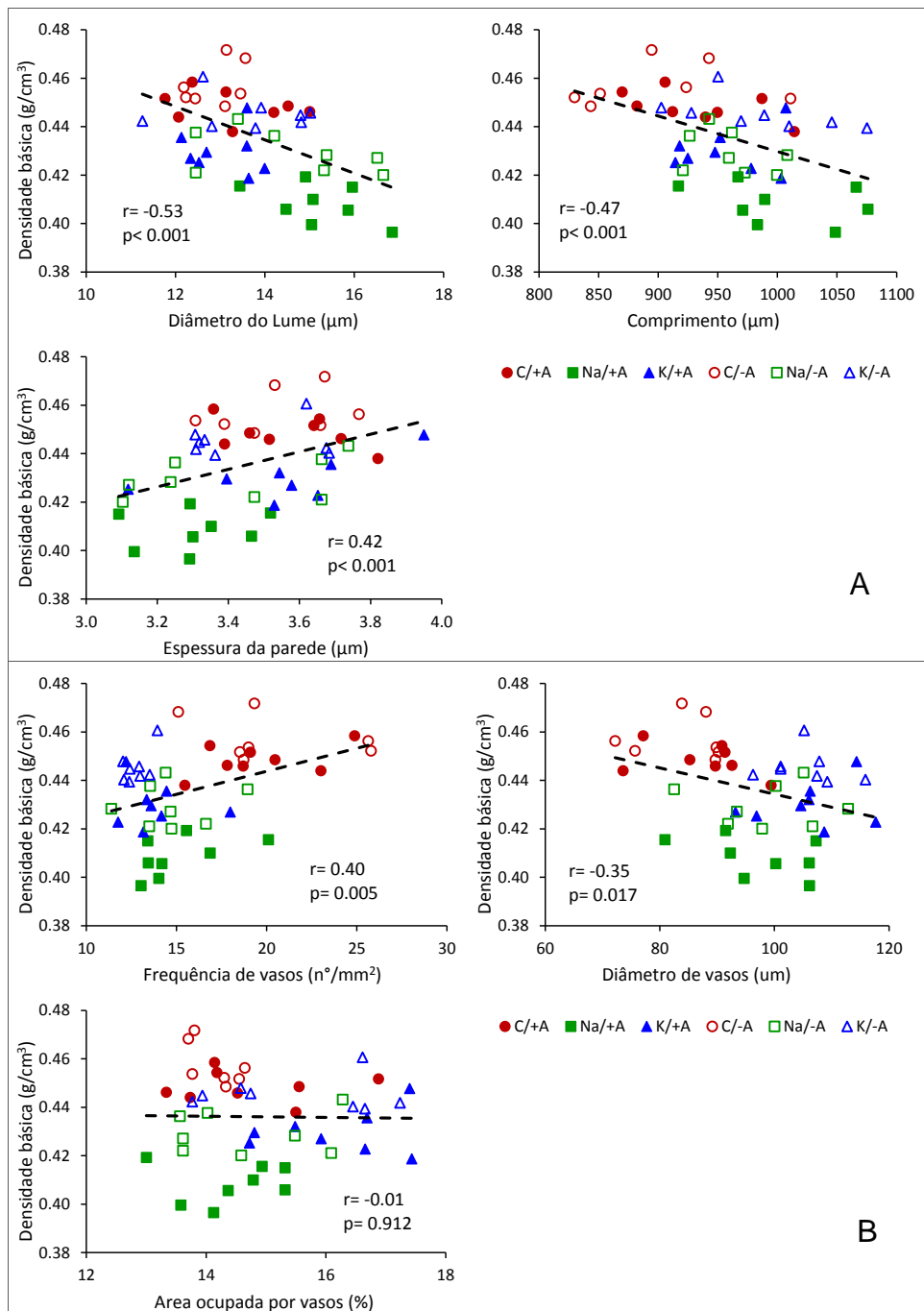


Figura 29 - Correlação entre a densidade básica do lenho e as dimensões das (A) fibras e (B) vasos no lenho das árvores de *E. grandis*, nos 6 tratamentos, no 47º mês após plantio

O coeficiente de Pearson e a significância mostraram que, em relação à anatomia, a densidade básica do lenho é influenciada pelo diâmetro do lume, comprimento e espessura da parede das fibras; e em menor proporção pela frequência e diâmetro dos vasos. Assim, árvores de eucalipto com lenho constituído de fibras de menor diâmetro do lume, curtas e de maior espessura da parede apresentarão maior valor de densidade básica e, em menor medida a densidade se relacionará à maior frequência e menor diâmetro dos vasos.

A literatura referente à relação da densidade básica e as características anatômicas do lenho de árvores de eucaliptos não é conclusiva. Coincidente com o estudo, há pesquisadores que têm reportado a boa relação do diâmetro do lume e a espessura da parede das fibras do lenho de árvores de diferentes espécies de eucaliptos; o lenho de árvores de *E. globulus* de alta densidade apresenta fibras de parede espessa e de menor diâmetro do lume (CARRILLO et al., 2015); Wimmer, Downes e Evans (2002) encontraram em árvores de *E. globulus* uma correlação negativa entre o comprimento da fibra e a densidade básica do lenho ($r=-0.44$). Por outro lado, correlação positiva foi reportada entre o comprimento e a largura das fibras e a densidade do lenho de árvores de *E. grandis x urophylla*, sendo altamente significativa, embora com menor coeficiente de correlação ($r=0.5$ e 0.4 respectivamente) (QUILHÓ; MIRANDA; PEREIRA, 2006); em árvores de *E. regnans* o coeficiente de correlação foi mais tênue e positivo para o comprimento das fibras ($r= 0.35$) (RAYMOND et al., 1998); para árvores de *E. tereticornis* obteve-se, também, correlação positiva ($r= 0.50$) com o comprimento das fibras (SREEVANI; RAO, 2014). Ainda, a correlação da densidade do lenho e o comprimento das fibras de árvores de *E. nitens* foi nula (KUBE; RAYMOND; BANHAM, 2001).

Em relação aos vasos, embora no presente estudo tenha sido detectada uma tênue correlação positiva com a frequência e tênue negativa com o diâmetro dos vasos e a densidade do lenho; a literatura tem resultados discrepantes, indicando que a densidade básica tem correlação positiva altamente significativa com o diâmetro e negativa com a frequência dos vasos no lenho das árvores de *E. tereticornis* (SREEVANI; RAO, 2014); e inexistência de correlação em árvores de *E. globulus* a relação entre a densidade do lenho e a frequência e o diâmetro dos vasos (CARRILLO et al., 2015). Concordante com os resultados, na aplicação de P em

plantas de *E. grandis*, a área do lenho ocupada por vasos não se relacionou com a densidade básica do lenho, sendo o espessamento da parede das fibras o primeiro parâmetro que influenciou na alteração da densidade (THOMAS; MONTAGU; CONROY, 2005). Assim, a relação da densidade do lenho e as dimensões dos vasos do lenho das árvores de eucalipto não mostra consenso sendo que, no presente estudo, a dimensão e a frequência dos vasos tem menor influência no valor da densidade do lenho em relação às dimensões das fibras, que contribuem em maior medida na variação da densidade do lenho.

Assim, deve-se considerar que os resultados das pesquisas relacionando a densidade x anatomia do lenho foram obtidas de árvores em diferentes condições e tratamentos, quando comparados com os do presente estudo de fertilização de Na e K e de disponibilidade hídrica em árvores de *E. grandis*, e, portanto, as diferenças de relação entre anatomia e densidade do lenho pode ter sido devido aos efeitos próprios (respostas fisiológicas) dos distintos tratamentos ou fatores ambientais submetidos.

Os estudos de fertilização de Na e K e disponibilidade hídrica na relação da densidade e anatomia do lenho das árvores são raros; os resultados de Sette Junior et al. (2014), Castro (2014) e de Franco (2014) indicam que a densidade básica do lenho dos tratamentos de Na, K e controle não acompanham, geralmente, alterações das dimensões das fibras e dos vasos.

Os resultados dos trabalhos indicam a ampla variação das características anatômicas do lenho das árvores das espécies de eucaliptos (CARRILLO et al, 2015) reflexo da variabilidade genética das características do lenho e que resultam nas diferenças entre as árvores de mesma idade em plantações e no mesmo sítio (WILKES, 1988). Como no presente estudo foram utilizados clones de *E. grandis* cultivados em um mesmo sítio, o efeito do ambiente foi minimizado; assim, a correlação da densidade básica e as dimensões das fibras e dos vasos mostram um confiável grau de influência na densidade básica, embora como explicado essa correlação não é forte e outros processos estão, da mesma forma, envolvidos na variação da densidade do lenho das árvores.

5.3.2 Densidade aparente do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis* por densitometria de raios X

As árvores de eucalipto no tratamento de Na com ou sem exclusão de chuva (Na/+A e Na/-A) apresentaram menor **densidade aparente média do lenho** com diferença significativa em relação ao controle (C/+A e C/-A) (equivalentes e sem diferença significativa); a fertilização do K mostrou efeito negativo somente quando aplicado em condição de maior disponibilidade hídrica (+A); assim, a densidade do lenho das árvores com a aplicação do K e com a exclusão parcial de chuva (-A) é equivalente ao da do controle (Tabela 12, Figura 30A).

A **densidade aparente mínima e máxima** do lenho das árvores de eucalipto não mostrou a mesma relação que a densidade aparente média, havendo diferença significativa do tratamento K/+A com o controle C/+A e C/-A, e com o menor valor da densidade para o tratamento K/-A. A densidade máxima do lenho das árvores apresentou diferença significativa para as árvores dos tratamentos Na/+A e K/-A (Tabela 12; Figura 30A).

A **densidade aparente mínima e máxima** do lenho das árvores variou de 0,33-0,38 e 0,82-0,96 g/cm³, respectivamente, nos 6 tratamentos de fertilização e de regime hídrico; a amplitude de variação da densidade do lenho indica a alternância de zonas fibrosas (incrementos de crescimento) no lenho das árvores detectadas com precisão pela densitometria de raios X (leitura a cada 80 µm).

A **densidade aparente média** do lenho das árvores de eucalipto, ao 47^o mês, variou de 0,50-0,55 g/cm³ sendo ligeiramente menores à determinada para árvores de eucaliptos de idade mais avançada pela densitometria de raios X; em árvores de *E. grandis x urophylla*, de 7,11 anos, a densidade foi de 0,63-0,66 g/cm³ (TOMAZELLO FILHO et al., 2008); de *E. grandis*, de 8 anos, de 0,53-0,55 (FRANCO, 2014), de 23 anos de 0,53-0,62 g/cm³ (OLIVEIRA ET AL., 2012). Esta diferença da densidade aparente do lenho é associada aos teores de lenho juvenil (menor densidade) e lenho adulto (maior densidade) e à idade das árvores (HILLIS e BROWN, 1984). A densidade do lenho de árvores de eucalipto foi ligeiramente superior à reportada por Sette Junior et al. (2010) para as árvores de *E. grandis* ao 48^o mês, no mesmo sitio, com 0,47-0,50 gr/cm³; mas similar ao obtido por Castro

(2014) para árvores de *E. grandis* ao 36º mês, de 0,50-0,55 g/cm³, em idênticas condições edafo-climáticas.

Tabela 12 – Densidade aparente do lenho das árvores de *E. grandis*, densidade mínima, máxima e média por tratamento e densidade média por nível de fertilização e regime hídrico, no 47º mês após plantio

| | | Densidade aparente do lenho (g/cm ³) | | | | | |
|--|----------------|--|-----------------|--------|------------------|----------------|-----------------|
| | | Mínima | DP | Máxima | DP | Média | DP |
| Tratamento (Regime hídrico + Fertilização) | C/+A | 0,375 | A 0,033 | 0,870 | bc 0,039 | 0,550 | a 0,018 |
| | Na/+A | 0,346 | Ab 0,017 | 0,817 | c 0,056 | 0,504 | c 0,010 |
| | K/+A | 0,312 | B 0,051 | 0,894 | abc 0,060 | 0,529 | b 0,016 |
| | C/-A | 0,360 | A 0,028 | 0,887 | abc 0,064 | 0,554 | a 0,014 |
| | Na/-A | 0,356 | Ab 0,023 | 0,899 | ab 0,049 | 0,529 | b 0,012 |
| | K/-A | 0,339 | Ab 0,017 | 0,959 | a 0,042 | 0,539 | ab 0,006 |
| Fator | Fertilização | | C | | 0,552 | a 0,016 | |
| | | | Na | | 0,516 | c 0,017 | |
| | | | K | | 0,534 | b 0,013 | |
| | Regime hídrico | | +A | | 0,527 | a 0,024 | |
| | | | -A | | 0,540 | b 0,015 | |

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

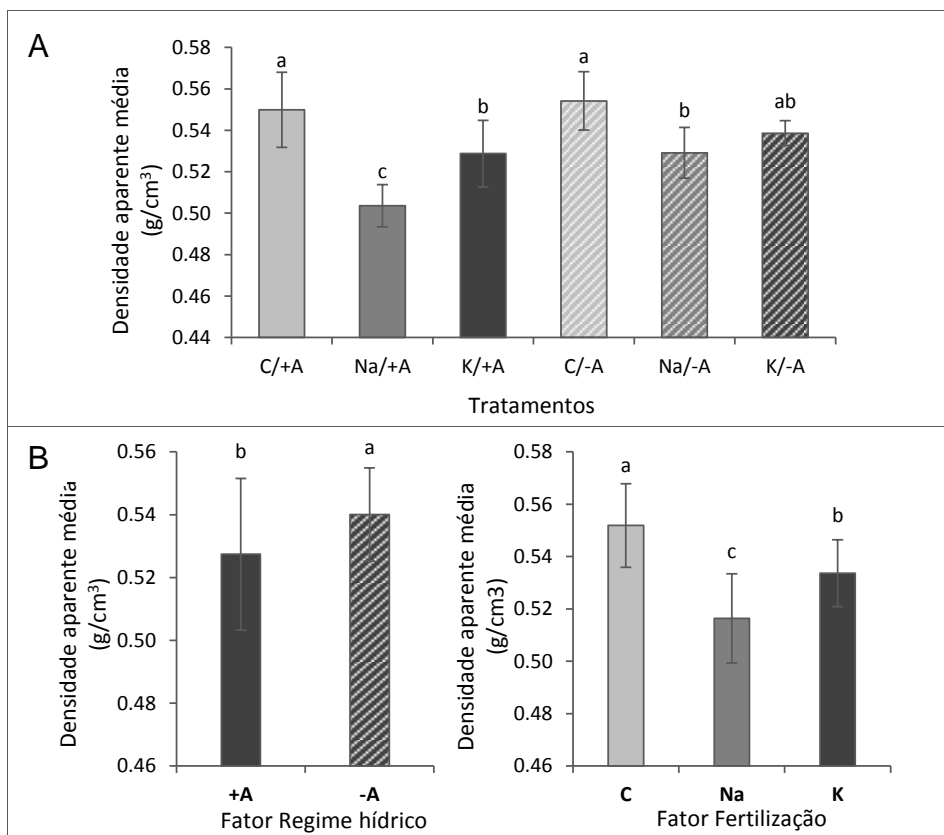


Figura 30 – Densidade aparente média do lenho das árvores de *E. grandis*, (A) por tratamento e (B) por regime hídrico e fertilização, no 47º mês após plantio. Letras acima das barras, diferentes entre barras por idade, indicam diferença significativa de médias entre tratamentos ($p < 0,05$). As barras de erros representam ao desvio padrão da média

Em ausência de interação significativa do regime hídrico vs fertilização; para o fator fertilização (retirando o efeito do regime hídrico) confirma-se o mesmo resultado observado para a densidade básica; a aplicação do K e do Na induziram o decréscimo da densidade aparente média do lenho, em relação às árvores controle (sem aplicação do K e Na); o Na teve efeito negativo mais forte em relação ao K (Tabela 12, Figura 30B).

Para o fator regime hídrico (retirando o efeito da fertilização) constatou-se, também, diferença significativa entre as árvores com 100 e 63% de chuva, sendo que as árvores com redução de chuva apresentaram maior de densidade aparente média do lenho; portanto, o estresse hídrico gerado pela exclusão de 37% da chuva induz a formação de lenho de maior densidade aparente; sendo coerentes com o reportado para a densidade básica.

O efeito da fertilização e a disponibilidade hídrica na densidade do lenho das árvores de eucalipto foram discutidos amplamente (vide item 5.4.1), sendo as pesquisas avaliando o efeito de fertilizantes minerais na densidade do lenho por densitometria de raios X, escassas; as pesquisas disponíveis indicam a diminuição da densidade aparente do lenho com NPK (TOMAZELLO FILHO et al., 2008), e ausência de efeito com a aplicação do lodo de esgoto e do N (SETTE JUNIOR et al., 2009).

Em relação ao efeito do K e Na na densidade aparente do lenho das árvores, verifica-se certa coerência com os resultados da avaliação das árvores aos 36º mês, sendo que o K e Na induziram a diminuição da densidade aparente do lenho, embora, similares entre si (CASTRO, 2014); em outro experimento similar árvores de *E. grandis* aos 48º mês, com K e Na não mostrou efeito significativo na densidade aparente do lenho, embora com valor médio menor que a do controle (SETTE JUNIOR et al., 2014); para árvores de 8 anos, houve um decréscimo para o K e o Na na densidade aparente do lenho (FRANCO, 2014). Assim, há o consenso de que o K e o Na influênciam significativamente na formação do lenho de menor densidade aparente em árvores de *E. grandis*.

O aumento da densidade aparente do lenho das árvores de eucalipto com a redução da disponibilidade hídrica (-A) corrobora os resultados obtidos com *E. grandis* ao 36º mês (CASTRO, 2014) e *E. grandis x urophylla* aos 7,11 anos (TOMAZELLO FILHO et al., 2008). Conclui-se, também, que o efeito K e Na se

mantêm mesmo com a variação da disponibilidade hídrica (ausência de interação significativa).

A variação da densidade do lenho das árvores de eucalipto, aos 12^o até o 48^o mês confirma o modelo de aumento da densidade a maior idade das árvores, embora com menor incremento ao 48^o mês, em comparação com os incrementos anteriores. O modelo de variação é amplamente conhecido para as árvores das espécies de *Eucalyptus*; em árvores de *E. grandis* verifica-se um significativo aumento da densidade do lenho com o aumento da idade das árvores (MIRANDA; ALMEIDA; PEREIRA, 2001; GITHIOMI; KARIUKI, 2010; SETTE JUNIOR et al., 2012). O aumento da densidade do lenho é devido à formação do lenho adulto no tronco das árvores, além do desenvolvimento do cerne (ver item 5.5.2) com maior quantidade de extrativos (GOMINHO; PEREIRA, 2000; GOMINHO et al., 2001).

A densidade aparente média do lenho das árvores de eucalipto em 4 diferentes idades – 12^o, 24^o, 36^o, 48^o mês – para os tratamentos de K e Na e de restrição hídrica (Figura 31) evidencia o mesmo modelo de variação discutido nos itens anteriores. Para todos os tratamentos verifica-se um aumento da densidade aparente média do lenho no período inicial, até o 36^o mês, quando ocorre uma estabilização, exceto para as árvores de eucalipto do tratamento K/+A.

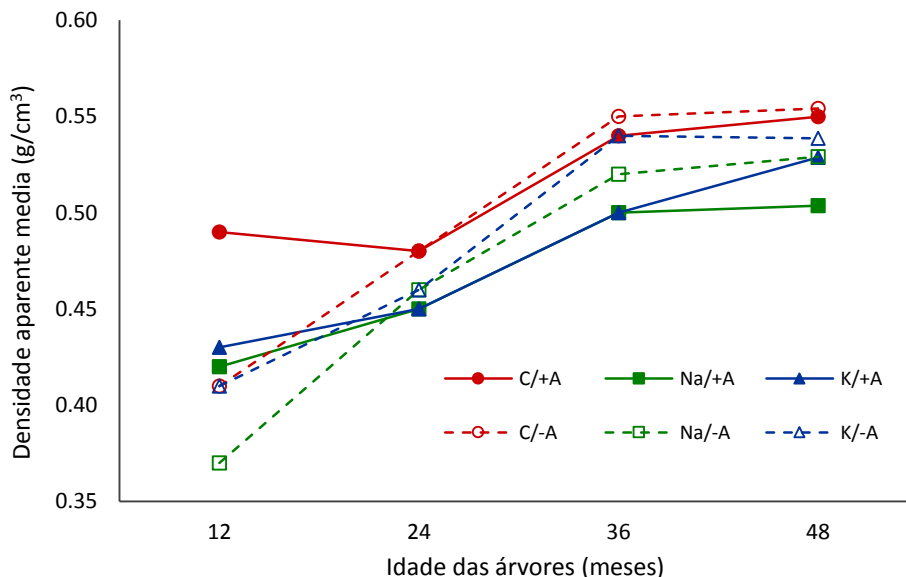


Figura 31 – Variação da densidade aparente média do lenho das árvores de *E. grandis*, aos 12^o, 24^o, e 36^o mês (CASTRO, 2014) e 48^o mês por tratamento

O perfil radial da densidade aparente do lenho, pela densitometria de raios X (Figura 32), comprova a sua importância e elevada acurácia na avaliação da resposta das árvores de eucalipto aos diferentes tratamentos. Considerando que a mensuração da densidade do lenho é realizada a intervalos de 80 μm – ao longo do raio das amostras - a oscilação dos valores de densidade aparente está relacionada com a estrutura anatômica do lenho, representada pelos vasos (frequência e diâmetro) e fibras (faixas de parede espessa e delgada com maior e menor atenuação de feixes de raios X, respectivamente).

A densitometria de raios X tem demonstrado sua aplicação na demarcação e datação dos anéis de crescimento no lenho das árvores de folhosas, incluindo as de espécies tropicais, pela diferenciação dos lenhos inicial e tardio, em resposta à sazonalidade climática. Da mesma forma, a densitometria de raios X tem sido aplicada na análise do lenho de árvores de *Eucalyptus sp* possibilitando a identificação dos anéis de crescimento e a sua cronologia (MUCHA, 1979; HUDSON; WILSON; BEVEREN, 1998; LEAL et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2011); apesar da presença de anéis de crescimento indistintos e falsos que dificultam a análise dos perfis radiais de densidade aparente do lenho (HUDSON; WILSON; BEVEREN, 1998). Em árvores de eucaliptos de plantações florestais a informação da data do plantio constitui na comprovação da sua idade e permite a reconstrução do crescimento do tronco. A técnica “re-scaling” (DOWNES et al., 2004) é aplicada quando se mensura o crescimento radial do tronco longo do raio da amostra do lenho extraída do tronco da árvore, permitindo inferir sobre o período de formação das regiões do lenho (DREW et al., 2009). Com a aplicação dos dados de incremento corrente periódico do tronco das árvores de eucalipto obtidos com os dendrômetros é possível explicar a relação das propriedades do lenho com o clima, nutrição e outras variáveis, recomendando-se fazê-lo, no entanto, no fim da rotação com a análise do lenho das árvores em corte final.

De modo geral, o perfil de densidade radial do lenho das árvores em cada tratamento evidencia o modelo de variação caracterizado por maior valor na região da medula, seguindo-se a diminuição e aumento do lenho com variações máximas e mínimas de densidade de 0,33-0,38 a 0,82-0,96 g/cm^3 , respectivamente (Figura 32). A maior densidade na região da medula é devida à presença de cristais e de amido nas células de parênquima, atenuando a passagem dos raios X, conforme verificado

por Fonseca e Lousada (2000) e Tomazello Filho (2006). A flutuação do valor da densidade aparente do lenho na direção medula-casa deve-se às variações da estrutura anatômica do lenho, seja pela formação de faixas de xilema com (i) vasos de maior diâmetro e fibras de parede delgada (zonas fibrosas mais claras) ou de (ii) vasos de menor diâmetro e fibras de parede mais espessa (zonas fibrosas mais escuras). Essa variação radial da densidade - e da correspondente estrutura anatômica - do lenho das árvores de eucalipto nos 6 tratamentos é resultado da sazonalidade da atividade cambial, formando, ainda, um lenho característico de madeira juvenil.

Um modelo de variação da densidade radial do lenho foi obtido por Sette Junior (2010) para árvores de *E. grandis* ao 48º mês, com característica de madeira juvenil e evidenciando o início da transição com a madeira adulta. Em árvores de eucaliptos, de 10-30 anos, avaliado por diversos autores como Oliveira (1997); Alzate (2004); Silva et al. (2004); Moya et al. (2005); Tomazello Filho (2006) ficou demonstrada a similaridade dos perfis de densidade aparente do lenho nos anos iniciais – região interna, madeira juvenil-, com menor valor de densidade, seguindo-se a região de transição e da madeira adulta, com aumento e estabilização da densidade. Os primeiros estudos realizados com *E. grandis*, na Austrália, reportam o menor valor da densidade do lenho nas camadas iniciais de crescimento seguindo-se o seu aumento, similar ao observado no Brasil (BAMBER; HUMPHREYS, 1963).

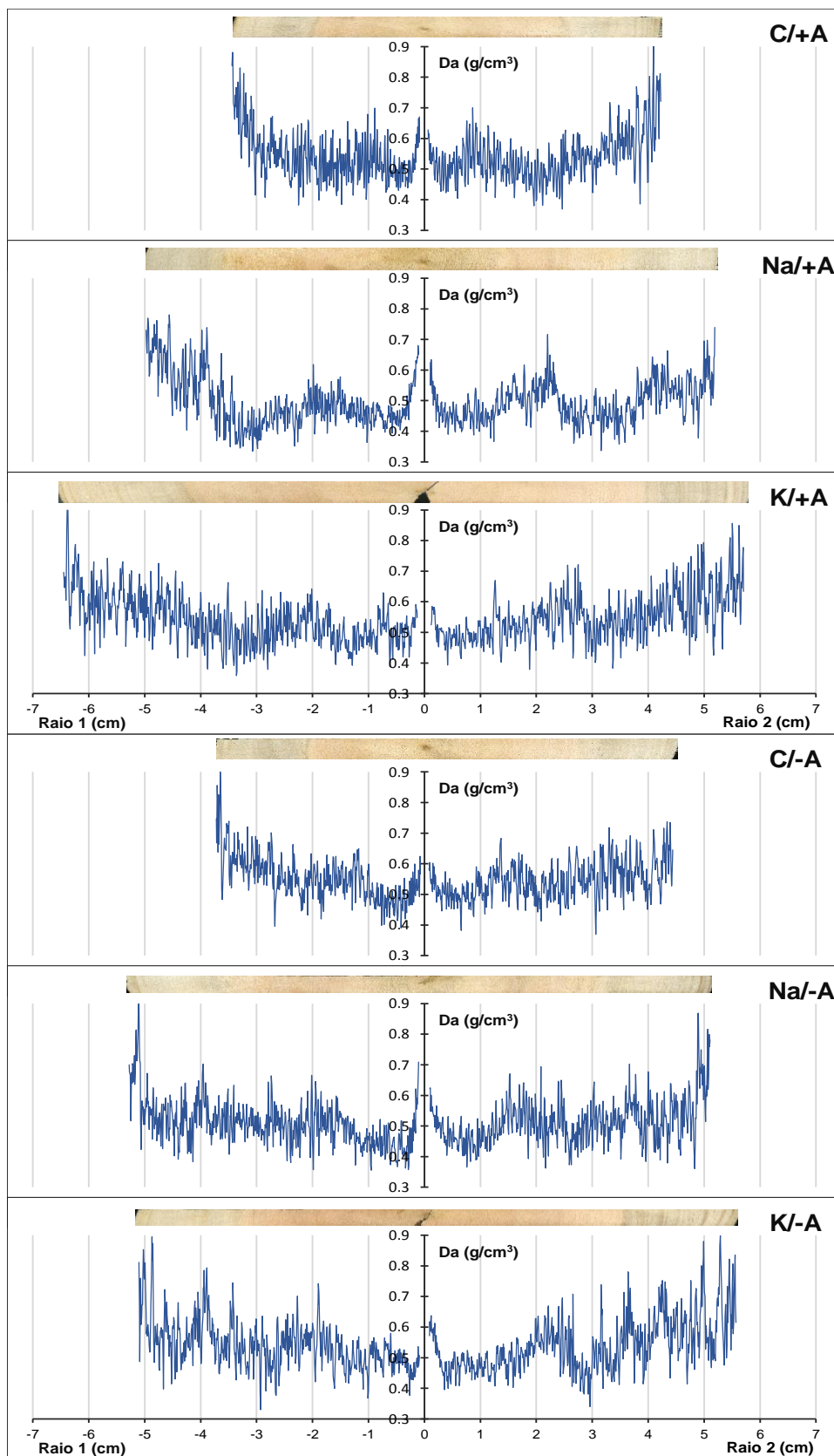


Figura 32 – Variação da densidade aparente do lenho das árvores de *E. grandis*. Perfil radial de densidade do lenho por densitometria de raios X de árvores médias por tratamento, no 47º mês após plantio

A densidade aparente média do lenho, obtida a cada 5% do raio das amostras do lenho das árvores de eucalipto nos 6 tratamentos (Figura 33) indica um característico aumento da densidade a 85-100% do raio. Esta região do lenho corresponde, aproximadamente, ao tecido formado no último ano de crescimento do tronco das árvores para todos os tratamentos. Nesse período, a maior variação do valor da densidade do lenho é constatada nas árvores submetidas aos tratamentos com redução de chuva indicando que, independente do tratamento de nutrição, o estresse hídrico resulta na maior variação e elevado valor da densidade aparente do lenho externo (próximo da casca) do tronco das árvores de eucalipto.

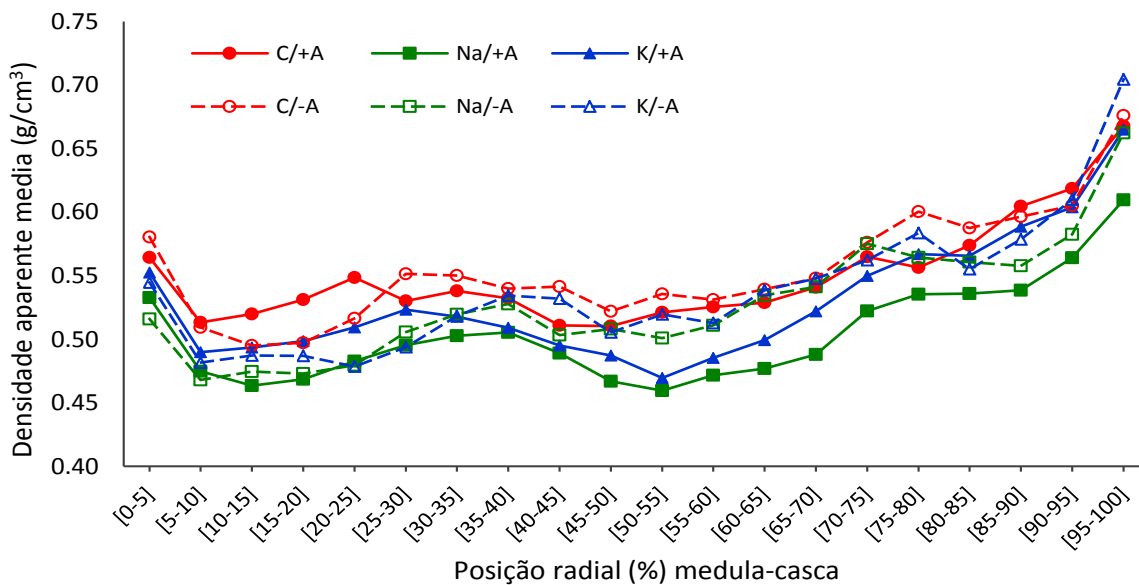


Figura 33 - Variação radial da densidade aparente do lenho das árvores de *E. grandis* por tratamento; perfil de densidade do lenho obtido a cada 5% do raio, no 47º mês após plantio

5.4 Avaliação da estrutura anatômica macroscópica do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*

5.4.1 Identificação do cerne e alburno do lenho

A análise macroscópica da seção transversal polida do lenho no DAP do tronco das árvores de eucalipto, ao 48^o mês, submetidas aos 6 tratamentos possibilitou distinguir as regiões do cerne e do alburno (Figura 34).

A diferenciação das regiões do cerne e do alburno do lenho das árvores de eucalipto é realizada, de modo geral, pela distinção da sua coloração natural devida à diferença na composição química. Assim, a literatura relata como um dos métodos mais simples e efetivos na delimitação e quantificação das duas regiões do xilema (GITHIOMI; DOUGAL, 2012; MORAIS; PEREIRA, 2007).

No entanto, no lenho de árvores de eucaliptos jovens e, mesmo nas adultas de rápido crescimento, torna-se difícil a delimitação e a mensuração das regiões do cerne e do alburno. Como exemplo, nas amostras do lenho das árvores de eucalipto das menores classes de diâmetro (classes 1 e 2) a distinção da transição entre o alburno e o cerne é complexa pela análise visual direta, sendo que o desenvolvimento do cerne depende do crescimento da árvore (MORAIS; PEREIRA, 2007), conforme destacam Jóia et al. (2006).

Assim, com a aplicação do corante Dimethyl yellow na seção transversal do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*, permitiu identificar e delimitar facilmente a região do cerne, mostrando resultados promissores e indicativos do seu potencial na delimitação das regiões do cerne e do alburno (Figura 35).

Essa possibilidade de aplicação do Dimethyl yellow deve-se às suas propriedades de indicador ácido-básico reagindo com o pH do lenho, alterando a cor do cerne para vermelho-alaranjado (reação ao pH abaixo de 2.9) e do alburno para o amarelo (reação ao pH acima de 4.0). O cerne é reconhecidamente a região do lenho com valor baixo de pH pelo elevado teor de extrativos (taninos, ácidos tânicos, fenóis, etc.) reportado por inúmeros artigos científicos (HILLIS, 1987; KLUMPERS; JANIN; BECKER, 1993).

A análise da formação do cerne e do alburno no lenho das árvores de eucalipto, ao 36^o mês, realizada por Castro (2014) não comprovou, até esta idade a

presença de cerne, com apenas o lenho das árvores com K e redução hídrica (K/-A) apresentaram pequenas áreas de reação dimethyl-yellow e extrativos na região interna do lenho, próximo da medula.

Assim, os resultados indicam que a formação do cerne se inicia no lenho das árvores de eucalipto no período do 36º ao 48º mês após o plantio; sendo indicado o mesmo período para as árvores de *E. globulus* (GOMINHO; PEREIRA, 2005); ainda a partir do 48º mês (GOMINHO; PEREIRA, 2001) ou, 60º mês para árvores de *E. urophylla x grandis* e de outras espécies (GOMINHO et al., 2001; HILLS, 1987). A literatura menciona que, além da idade, estão envolvidos outros fatores na formação do cerne das árvores, como o tratamento silvicultural, qualidade do sítio, ritmo de crescimento das árvores, etc. (BAMBER; FUKAZAWA, 1985; HILLS, 1987; TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002), e principalmente além da idade, a dimensão da árvore (diâmetro) constituem variáveis com papel determinante no teor e formação do cerne (GOMINHO; PEREIRA, 2005).

Na análise da diferença da intensidade da coloração do cerne e alburno (com a aplicação do Dimethyl yellow) do lenho das árvores dos 6 tratamentos indica que, (i) o cerne não foi bem contrastado no tratamento Na/+A em relação aos demais tratamentos, o que indica, possivelmente, menor acúmulo de extrativos, hipótese a ser confirmada pela análise da composição química (extrativos) do cerne.

A análise da seção transversal do lenho do DAP do tronco das árvores de eucalipto exposta em equipamento de raios X digital permite a identificação de regiões do xilema distinguíveis pela diferença na atenuação da passagem dos raios X. Essas regiões do lenho são caracterizadas pela variação da estrutura anatômica e da densidade, resultando em áreas de diferentes tonalidades de escala de cinza na imagem digital radiográfica do lenho (Figura 36).

Assim, na imagem digital do lenho das árvores de eucalipto dos 6 tratamentos são visualizadas regiões características de coloração mais clara (maior densidade, resultado da maior atenuação da passagem dos raios X) e mais escura (menor densidade, resultado da menor atenuação da passagem dos raios X).

A interpretação dessas imagens da seção transversal do lenho – em comparação com as da Figura 34 - indica a presença de camadas de crescimento concêntricas de tonalidades clara (maior densidade) e escura (menor densidade). A análise quantitativa do lenho - e sua interpretação da estrutura anatômica e física – foi apresentada em detalhes na Figura 32 e item 5.4.2. Da mesma forma, a região

central do lenho do tronco das árvores de eucalipto, caracterizada pela presença da medula, é evidenciada por uma contrastante tonalidade clara. Como mencionado, também no item 5.4.2, deve-se à elevada atenuação à passagem dos raios X, pela presença de amido e cristais preenchendo as células do tecido de parênquima, com densidade de 0,70-0,85 g/cm³, corroborando estudos de Tomazello Filho (2006), Tomazello Filho et al. (2008), Sette Junior et al. (2009) e Castro (2014), etc.

Como são árvores de eucaliptos jovens, com baixo teor de extrativos no cerne verifica-se que as imagens digitais da seção transversal do seu lenho não permitem, ainda, a nítida e segura definição da região do cerne. No entanto, diversos autores relataram que, em árvores de eucalipto em idade mais avançada a densitometria de raios X permite diferenciação precisa das regiões do cerne e do alburno (TOMAZELLO FILHO et al., 2008). Além, da possibilidade de diferenciação e demarcação do cerne esta metodologia possibilita a análise dos anéis de crescimento do lenho de árvores de coníferas e de folhosas para estudos de dendrocronologia, conforme destacado no item 5.4.2.

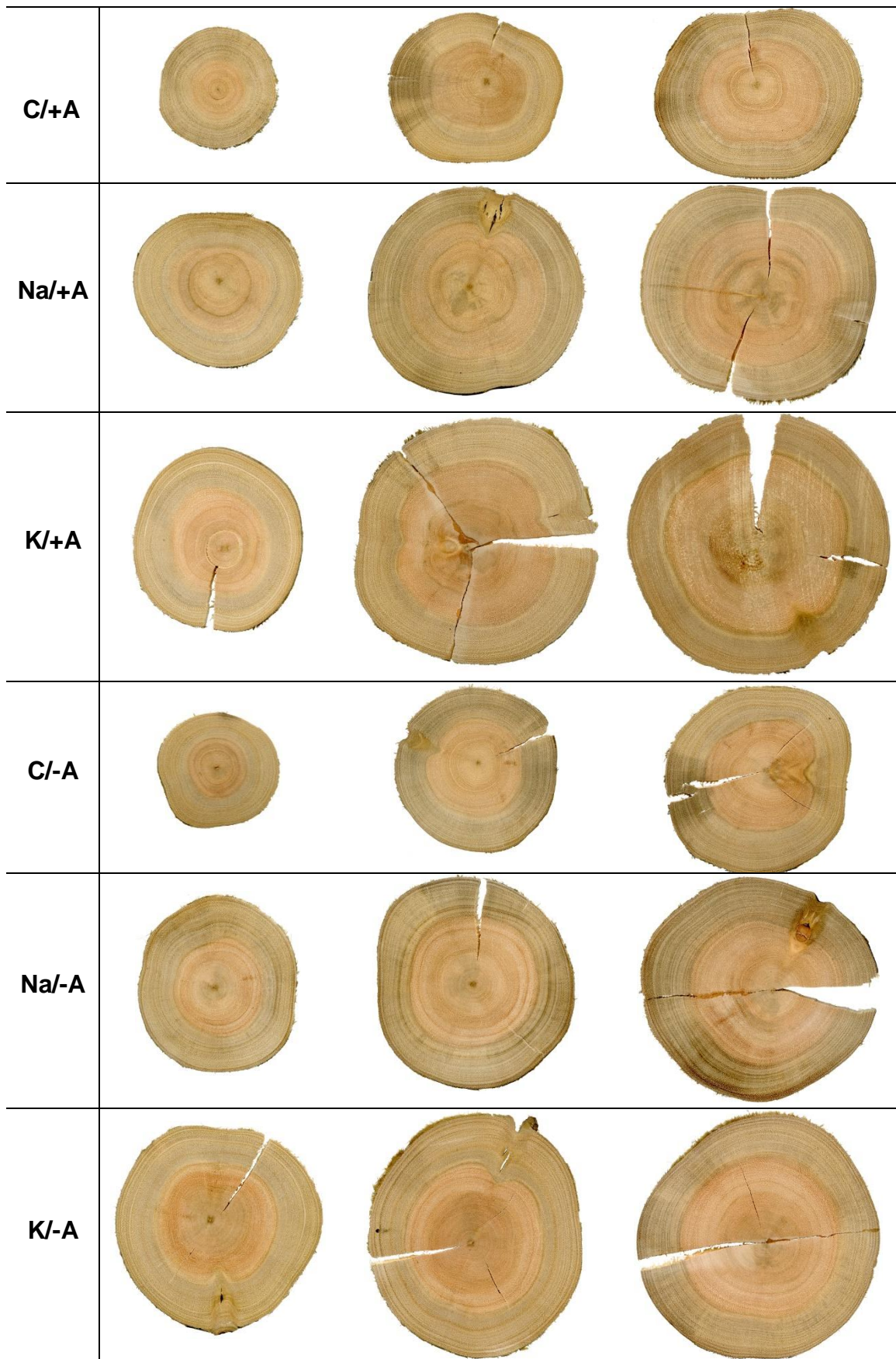


Figura 34 – Seção transversal do lenho das árvores de *E. grandis* de 3 classes de diâmetro do tronco, no 47º mês após plantio: diferenciação do cerne e albarno e das camadas de crescimento pela coloração natural

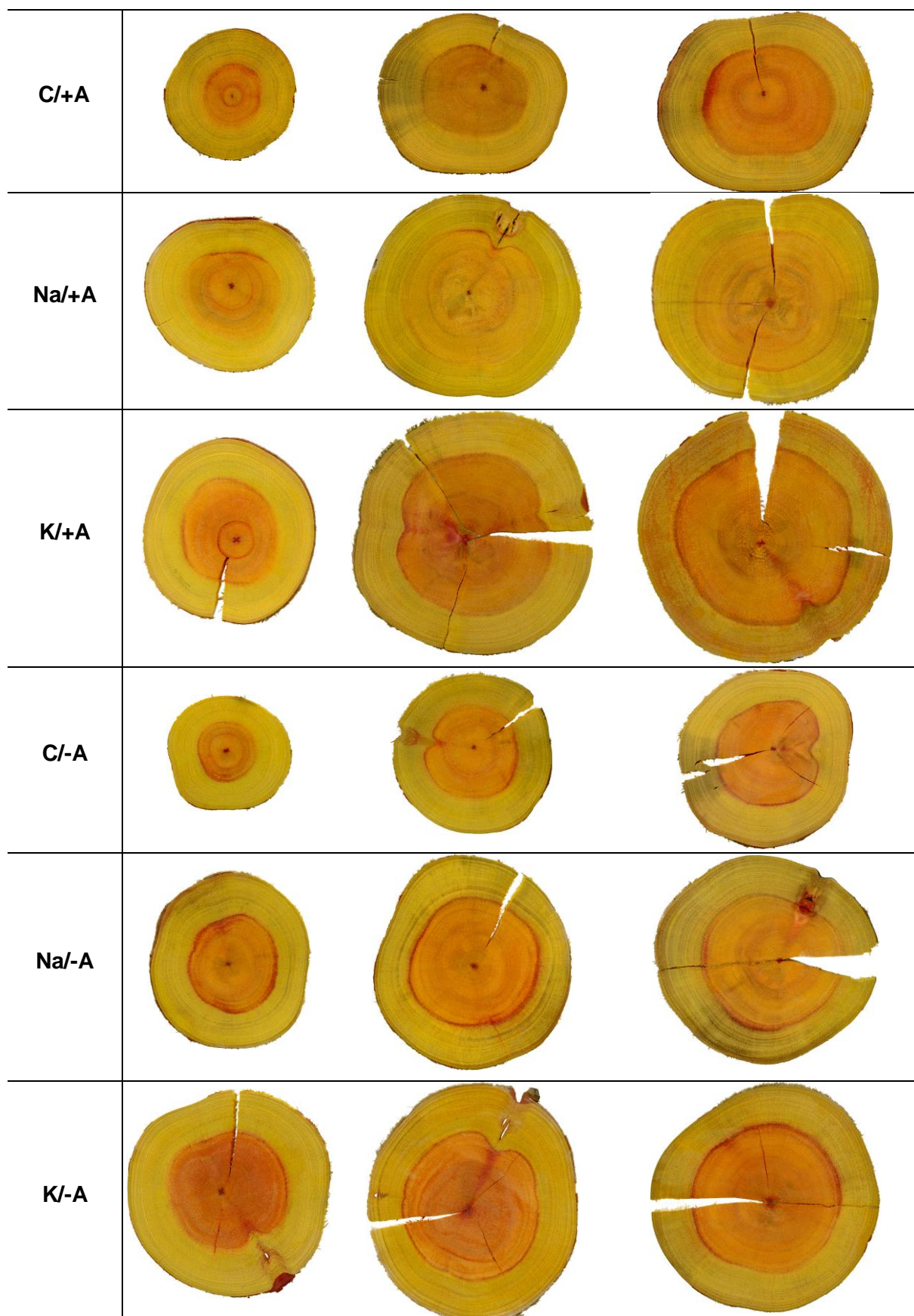


Figura 35 – Seção transversal do lenho das árvores de *E. grandis* de 3 classes de diâmetro do tronco, nos 6 tratamentos, no 47º mês após plantio: diferenciação do cerne e alborno pela aplicação de dymethyl yellow. O cerne adquire coloração laranja-avermelhada

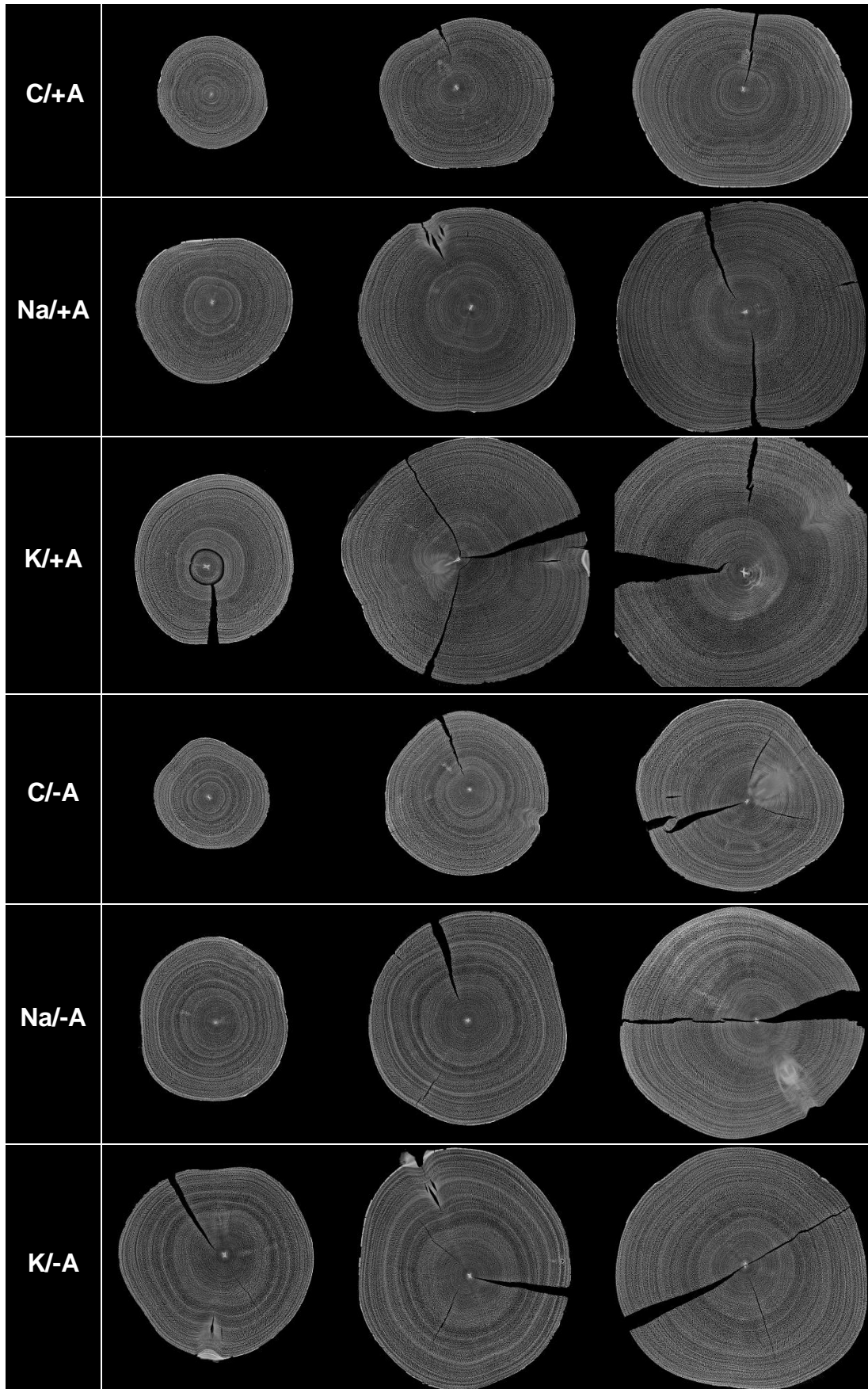


Figura 36 – Seção transversal do lenho das árvores de *E. grandis* de 3 classes de diâmetro do tronco, nos 6 tratamentos, no 47º mês após plantio: diferenciação do cerne e albúrco e das camadas de crescimento pela densitometria de raios X

5.4.2 Teor de cerne e alburno

Não houve interação significativa do regime hídrico x Fertilização; a menor disponibilidade de água (-A) não influenciou significativamente na % de cerne e alburno no DAP do tronco, sendo similar aos tratamentos sob regime hídrico normal (+A) (Figura 37A). Por outro lado, no lenho das árvores com a aplicação de K e Na verificou-se maior % de cerne em relação às árvores dos tratamentos controle, assim a aplicação de K e o Na aumentaram em 35 e 30% o teor de cerne, respectivamente, em comparação com a % de cerne dos controles (Figura 37A).

As árvores de eucalipto no regime hídrico +A (100% de chuva) mostraram, em relação às do regime hídrico -A (63% das chuvas) uma variação da % de cerne no seu lenho de apenas 2%. No entanto, para o tratamento de fertilização, as árvores de eucalipto com K e Na apresentaram similar teor de cerne (41,17%; 39,5%) e de alburno (60; 58%) embora, diferente, em relação à do controle, com cerne e alburno de 30,55 e de 69,45%, respectivamente.

De acordo com as informações anteriores, a análise dos resultados por tratamento (fertilização + regime hídrico) evidenciou que a % de cerne no lenho do tronco foi maior nas árvores fertilizadas/com maior disponibilidade hídrica (K/+A, Na/+A), embora, sem diferença significativa com as árvores fertilizadas/com menor disponibilidade hídrica (K/-A e Na/-A); as árvores do tratamento controle (C/+A e C/-A) apresentaram, significativamente, menor % de cerne (Tabela 13, Figura 37B).

Tabela 13 – Porcentagem do teor de cerne-alburno no lenho do tronco das árvores de *E. grandis*, por fatores regime hídrico e fertilização e por tratamento, no 47º mês após plantio

| | | | % de Cerne | | % de Alburno | |
|--|----------------|-------|------------|--------|--------------|--------|
| | | | Média | DP | Média | DP |
| Fator | Regime hídrico | +A | 38,22 | a 7,90 | 61,78 | a 7,90 |
| | | -A | 36,16 | a 5,43 | 63,84 | a 5,43 |
| | Fertilização | C | 30,55 | b 6,22 | 69,45 | a 6,22 |
| | | Na | 39,50 | a 3,95 | 60,50 | b 3,95 |
| | | K | 41,17 | a 4,89 | 58,83 | b 4,89 |
| Tratamento (Regime hídrico + Fertilização) | | C/+A | 30,55 | b 7,42 | 69,45 | a 7,42 |
| | | Na/+A | 40,40 | a 4,31 | 59,60 | b 4,31 |
| | | K/+A | 43,71 | a 4,96 | 56,29 | b 4,96 |
| | | C/-A | 30,55 | b 5,10 | 69,45 | a 5,10 |
| | | Na/-A | 38,60 | a 3,60 | 61,40 | b 3,60 |
| | | K/-A | 38,64 | a 3,48 | 61,36 | b 3,48 |

DP significa desvio padrão da média. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey ($\alpha = 0.05$)

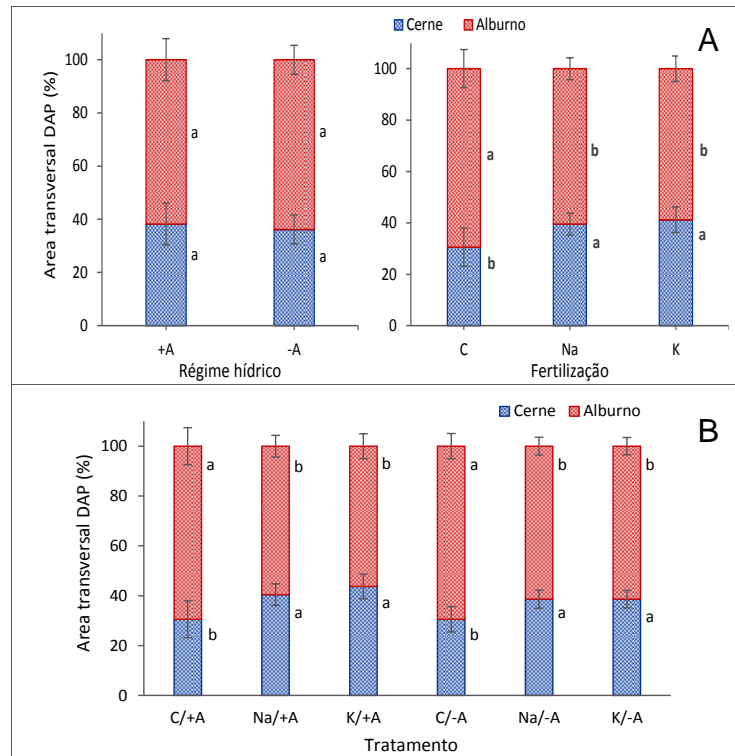


Figura 37 – Porcentagem do cerne e alburno no lenho do tronco das árvores de *E. grandis* (A) por regime hídrico e fertilização e (B) por tratamento, no 47º mês após plantio. Letras iguais nas colunas da mesma cor, indicam que as médias não diferem pelo teste Tukey ($\alpha = 0.05$). Barras de erros representam o desvio padrão da média

A interação da fertilização e a disponibilidade hídrica em árvores de eucalipto avaliada em outras pesquisas, indicam que a aplicação de fertilizantes em maior disponibilidade hídrica aumenta de 6-10% o teor de cerne no lenho do tronco, em relação ao controle (TOMAZELLO FILHO, 2006; MIRANDA et al., 2006), com forte efeito dos dois fatores. Em diferença do estudo citado, no presente trabalho não houve aumento da disponibilidade de água e por tanto as diferenças do efeito entre os regimes hídricos aplicados não são significativas.

A significativa influência da fertilização na % de cerne do lenho das árvores de eucalipto, foi confirmada em estudos de Wilkins (1991), Tomazello Filho (2006) e Miranda et al. (2006). Ainda, a proporção do cerne e do alburno no lenho do tronco das árvores varia: entre as espécies (HILLIS, 1987), tratamento silvicultural, como o espaçamento (GOMINHO; PEREIRA, 2005), fertilização e irrigação (MIRANDA et al., 2006), outras condições do sítio, idade das árvores (HIGGINS 1984; WILKINS, 1991), etc. e que afetam, principalmente, a taxa de crescimento do tronco das árvores, que está relacionado fortemente com a formação e o teor do cerne (MIRANDA et al., 2006; GOMINHO; PEREIRA, 2005).

Assim, entende-se que a fertilização, disponibilidade hídrica e os tratamentos silviculturais afetam a proporção do cerne/alburno das árvores em função do efeito na sua taxa de crescimento do tronco; o crescimento do tronco das árvores é, assim, consequência dos tratamentos silviculturais e do sítio e, portanto, pode ser considerado com a causa principal da variação da % do cerne e do alburno, sendo que, as árvores com K e Na foram as de maior diâmetro do tronco (Tabela 1) e com maior % de cerne, evidenciando uma relação direta (Tabela 13).

Com este objetivo, o teste de covariância (Tabela 14) indica que a co-variável DAP do tronco das árvores de eucalipto é altamente significativa e explica 76% da variação do teor do cerne e do alburno; e significa que o DAP do tronco é o maior responsável pela diferença da % cerne/alburno.

Tabela 14 – Análise de covariância, com a covariável diâmetro do tronco (DAP) das árvores de *E. grandis* e relação da proporção cerne-alburno

| Fonte de variação | GL | SQ | QM | Valor F | Pr > F |
|-------------------------------|----|--------|--------|---------|--------|
| Regime hídrico | 1 | 40.46 | 40.46 | 4.52 | 0.0396 |
| Fertilização | 2 | 70.49 | 35.25 | 3.94 | 0.0274 |
| Regime hídrico x Fertilização | 2 | 28.48 | 14.24 | 1.59 | 0.2161 |
| DAP | 1 | 661.24 | 661.24 | 73.95 | <.0001 |

A análise de regressão linear mostra, também, forte relação e alto coeficiente de determinação explicando 77% da variação da proporção de cerne/alburno; correlação positiva e altamente significativa para o cerne ($r^2=0.77$, $r= 0.88$, $p<0.0001$) e negativa para o alburno ($r^2=0.77$, $r=-0.88$, $p<0.0001$) com o diâmetro do tronco das árvores, independente da fertilização e do regime hídrico (Figura 38A).

A alta correlação da taxa de crescimento do tronco e % de cerne e alburno em árvores de Eucaliptos é amplamente mencionada na literatura (BAMBER, 1976; WILKINS, 1991; GOMINHO; PEREIRA, 2000; GOMINHO; PEREIRA, 2005; MIRANDA et al., 2006; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009).

Assim, ao influenciar o crescimento do tronco das árvores, a fertilização induz um efeito considerável no aumento da % de cerne e de diminuição da % alburno, no DAP do tronco das árvores; portanto árvores de eucalipto de menor DAP ou de baixo crescimento das parcelas controle (sem fertilização adicional) apresentam menor % de cerne e maior % de alburno.

Na literatura especializada não foram identificados estudos avaliando o efeito isolado do K e do Na na % do cerne e do alburno no tronco das árvores de eucalipto.

No entanto, outros estudos, como o de fertilização com NPK + micronutrientes, mostram tendência similar ao do trabalho, com as árvores de *E. grandis x urophylla*, de 7 anos, que formaram maior e significativa % de cerne (50%) em relação às do controle (44%) (TOMAZELLO FILHO, 2006); da mesma forma, em árvores de eucalipto, de 18 anos, com aplicação de NPK + micronutrientes verificou-se maior % de cerne (65%) em relação às do controle (55%) com fertilização básica (MIRANDA et al., 2006).

A menor % de cerne no tronco das árvores de eucalipto do presente trabalho, em relação às árvores de maior idade, deve-se ao seu crescimento, uma vez que proporção de cerne é acumulativa no tronco (TAYLOR; GARTNER; MORRELL, 2002) e aumentando com a idade das árvores (SELLIN, 1996); assim, árvores de eucalipto, de 7 anos, apresentaram 44-50% e 50-56% de cerne e de alburno, respectivamente (TOMAZELLO FILHO, 2006); para árvores de eucaliptos de 12-17 anos, a % de cerne é maior de 50% (MORAIS; PEREIRA, 2007), aos 18 anos a % de cerne é de 55,6-65,6% (MIRANDA et al., 2006; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009).

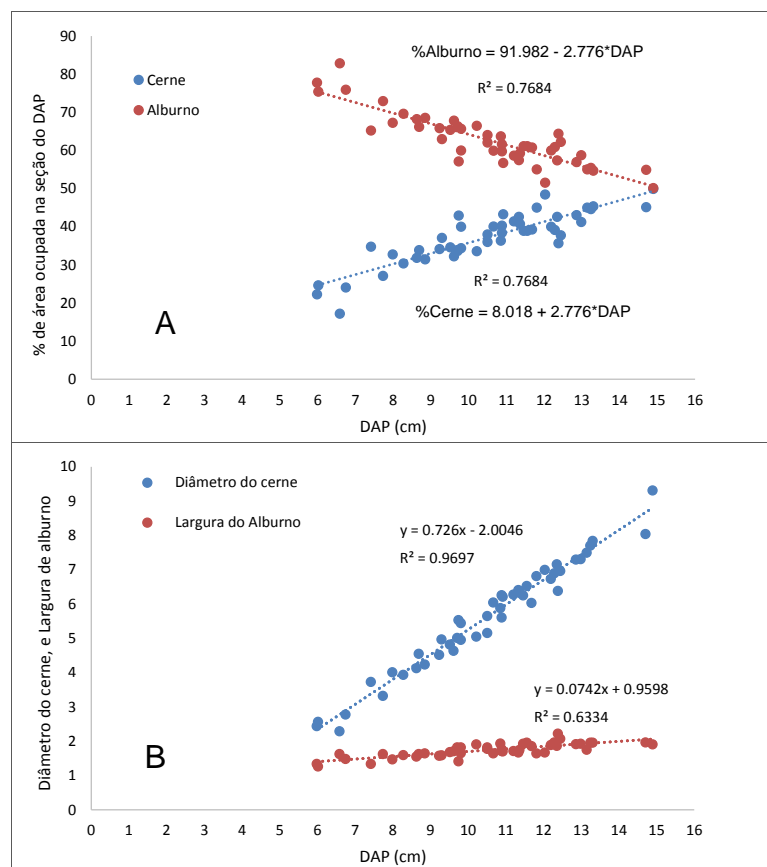


Figura 38 – Regressão linear do diâmetro (DAP) do tronco das árvores de *E. grandis* em relação à (A) % de área do cerne-alburno e (B) diâmetro do cerne e largura do alburno, no 47º mês após plantio. Todas as médias individuais são plotadas

Similarmente, a relação do diâmetro do tronco (DAP) e do diâmetro do cerne mostrou uma forte correlação linear e altamente significativa ($r^2= 0,97$, $r= 0,98$, $p<0,001$) com a equação “diâmetro do cerne = $-2,004 + 0,726 \cdot \text{DAP}$ ”; similar a reportada em outras pesquisas com eucaliptos. Para a largura do alburno, a correlação linear positiva é menos forte, embora altamente significativa, com o DAP do tronco das árvores ($r^2=0,63$, $r=0,79$, $p<0,001$), com a equação “largura do alburno = $0,959 + 0,074 \cdot \text{DAP}$ ” (Figura 38B).

Estas relações diâmetro do tronco x cerne, concorda com o reportado para árvores de *E. grandis x urophylla* de 7 anos (TOMAZELLO FILHO, 2006), *E. globulus* de 9, 12-15 e de 18 anos (GOMINHO; PEREIRA, 2005; MORAIS; PEREIRA, 2007; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009). A relação indica que à medida que a árvore cresce em diâmetro do tronco, ocorre o correspondente crescimento do cerne, com o processo de certificação das células internas do alburno.

Em relação à largura do alburno, o resultado concorda com os de *E. grandis* e *E. globulus*, de 18 anos (BAMBER; FUKASAWA, 1985; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009), com correlação média a baixa, altamente significativa; mas é discrepante com a reportada para o *E. grandis x urophylla* de 7 anos (TOMAZELLO FILHO, 2006), *E. globulus* de 9 e 12-15 anos (GOMINHO; PEREIRA, 2005; MORAIS; PEREIRA, 2007), *E. grandis* de 9,5 anos (WILKINS, 1991), que encontraram baixa correlação, não significativa com o diâmetro do tronco das árvores.

No presente estudo, a variação máxima da largura do alburno na seção transversal do lenho do tronco foi menor do que de 1 cm (1,2-2,2 cm), considerada pequena em relação à dimensão das árvores de eucalipto (Figura 38B); a literatura reporta para *E. globulus*, de 18 anos, uma menor variação (1,6 até 1,9 cm) (MIRANDA et al., 2006), indicando que mantém sua largura quase que invariável independentemente da idade das árvores. O cerne no tronco é formado para regular a quantidade de alburno, em relação da ecofisiologia e biomecânica do tronco das árvores (função de condução e de sustentação) (BAMBER, 1976); neste estudo, comprovou-se esta característica, com largura variando de forma limitada em relação ao crescimento do tronco da árvore, sendo que a formação do cerne iniciou-se cedo (3º e 4º ano) (Item 5.5.1) devido também à menor largura da região do

alburno; similarmente *E. globulus* com a região do alburno de alguns centímetros o cerne começa formar-se aos 2-4º ano (MIRANDA et al., 2006).

O resultado da análise da formação e teor de cerne e alburno em árvores jovens de eucalipto, com fertilização de K e de Na em variação da disponibilidade hídrica, pode ser considerada inédita e importante, e ser tomados em conta no balanço de cerne e alburno esperado, para o planejamento da instalação do plantio considerando a utilização ou aplicação do lenho, por exemplo, para polpa de celulose maior conteúdo de cerne impactara negativamente no rendimento de polpa, devido ao maior uso de produtos químicos, água e tempo (WILKINS, 1991), e portanto será necessário considerar que, com o aumento da idade das árvores ocorrerá o aumento da proporção de cerne, por exemplo, no valor de 37%, aos 48º mês (média do estudo), podendo representar 60% da seção transversal do lenho no DAP (MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2009). No entanto, a maior proporção de cerne constitui uma grande vantagem para outros usos da madeira, como produção de madeira serrada, para construção ou movelaria, devido a suas melhores propriedades mecânicas, físicas e químicas.

6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

- o **crescimento em diâmetro e altura das árvores** de eucalipto corrobora o efeito do K e do Na descrito para as árvores em idades anteriores; a aplicação do K aumentou consideravelmente o diâmetro, altura e volume das árvores independente do regime hídrico aplicado; a aplicação de Na atingiu um nível intermediário em relação ao tratamento sem e com adição de K;
- o **efeito positivo do K** foi menor com a **exclusão de 37% da chuva**, houve redução expressiva do crescimento das árvores de eucalipto; no entanto, não se observou efeito da redução hídrica nas árvores controle e árvores com aplicação de Na, pelo seu menor requerimento de água para o seu crescimento. Diferentemente o crescimento das árvores com K foi afetado no tratamento de exclusão de 37% da chuva, pela redução da disponibilidade de água no solo, e forte demanda de água das árvores;
- comprovou-se que a **aplicação de K e Na afeta negativamente o crescimento** das árvores de eucalipto, no período de baixa pluviosidade, pela sua alta de demanda por água coincidente com o forte estresse hídrico do solo; as árvores sem a aplicação de K e Na mantêm o seu crescimento, embora, em menores taxas;
- a **aplicação do K e o Na propicia**, em condição de média-alta pluviosidade, a **rápida recuperação** do crescimento das árvores de eucalipto; assim, o manejo silvicultural deve prever as medidas necessárias para evitar o efeito do estresse hídrico nas árvores de eucalipto de crescimento rápido em regiões sujeitas ao período de seca prolongada;
- a **temperatura mínima**, além da precipitação, mostrou efeito positivo e significativo para o crescimento das árvores de eucalipto; a ocorrência de baixa temperatura no dia irá influenciar os seus processos fisiológicos, com redução do seu crescimento;
- foram verificadas **modificações na estrutura anatômica do lenho** do tronco das árvores de eucalipto, principalmente, pela fertilização, sendo que, a menor disponibilidade hídrica não influenciou significativamente; a aplicação do K e do Na resultou em um sistema vascular caracterizado pela (i) menor frequência e maior diâmetro dos vasos; (ii) a aplicação de Na resultou em um sistema de sustentação

com fibras mais longas, largas e de menor espessura da parede; do K com fibras mais longas;

- a **densidade do lenho do tronco das árvores** de eucalipto aumentou com a redução da disponibilidade hídrica; a aplicação do Na resultou na diminuição da densidade do lenho independente da disponibilidade hídrica; o K induziu o mesmo efeito, embora menos intenso nas árvores com disponibilidade hídrica normal; o modelo de variação foi caracterizado pelo aumento da densidade do lenho na direção medula-casca, descrito na literatura para as árvores do gênero;

- as **alterações adaptativas da anatomia** relacionam-se com a densidade do lenho do tronco das árvores; o aumento da sua densidade implica na formação de fibras mais curtas, mais estreitas e de maior espessura da parede; não foi detectada a influência das dimensões dos vasos na densidade do lenho;

- **taxa de crescimento do tronco das árvores** não mostrou nítida relação com a densidade do lenho; significativo incremento da taxa de crescimento do tronco das árvores promovidas pelo K ou Na não é, sempre, acompanhado pela diminuição da sua densidade; a redução da densidade do lenho e perdas desejáveis nas características das fibras com a aplicação de K e do Na é compensada pelo aumento do seu volume de lenho do tronco;

- a menor % de cerne no lenho do tronco das árvores, ao 47º mês, foi verificada para todos os tratamentos; **a % de cerne aumentou** no lenho das árvores com K e Na; além, a % de cerne é relacionada, positivamente, com o diâmetro do tronco das árvores: o K e o Na resultam em maior taxa de crescimento do tronco e aumentam o teor de cerne; **a largura do alburno** relacionou-se, positivamente, com o diâmetro do tronco das árvores, com valor praticamente constante, apesar da diferença da dimensão das árvores.

REFERÊNCIAS

- ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**, ano base 2012. Brasília, 2013. 140 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da densidade básica** ABNT (NBR 11941). Rio de Janeiro: 2003. 6 p.
- ALMEIDA, J.C.R.; LACLAU J.P.; GONÇALVES, J.L.M, RANGER, J. SAINT-ANDRÉ, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils, **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1786-1795, abr. 2010.
- 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. 112p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- ALLEN, C.D. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? **Unasylva**. Rome, v. 60, p. 231-232, 2009.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis x urophylla***. 2004. 133p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais – Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.
- ALZATE, S.B.; TOMAZELLO 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*. **Scientia Forestalis**, 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.
- ASSIS, C.O.D. **Níveis de fertilização e seus efeitos no crescimento, nas características da madeira e do carvão em clones de híbrido de *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla***. 2013. 150p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2013.
- ATWELL, B.J.; BARLOW, S.; ROGERS, G.; CONROY, J.P. **Farm trees for the 1990s and beyond**. Canberra: Rural Industries Research and Development Corporation, 2000. 60 p.
- BAAS, P.; SCHWEINGRUBER, F.H. Ecological trends in the anatomy of trees, shrubs and climbers from Europe. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 8, n. 3, p. 245-274, 1987.

BAMBER, R.K.; HUMPHREYS, F.R. A preliminary study of some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Journal/Institute of Wood Science**, London, v. 11, p. 63-70, 1963.

BAMBER, R.K. **Sapwood and heartwood: Technical Publication N° 2**. Sydney: Forestry Commission of New South Wales, Wood Technology and Forest Research Division, 1987. 7 p.

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

BAMBER, R.K.; FUKAZAWA, K. Sapwood and heartwood: a review. **Forestry Abstract**, v. 46, n. 9, p. 567-580, 1985.

BAMBER R.K., Heartwood, its function and formation. **Wood Science and Technology**, New York, v. 10, n. 1, p. 1–8, 1976.

BARRICHELO, 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, volumen 13. Brasília: Ministério da agricultura, 1976. 145 p.

BARBOSA, B. M.; COLODETTE, J. L.; CABRAL, C. P. T.; GOMES, F. J. B.; SILVA, V. L. Efeito da fertilização na qualidade da madeira de *Eucalyptus spp.s*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 29-39, mar. 2014.

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.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M.R. ALMEIDA.; ARENQUE, B. C.; DE CASSIA 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 and Environment**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 70–81, Jan. 2014a.

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.-P.; DOMEQ, J.-C.; CHRISTINA, M.; BOUILLET, J.-P.; DE CASSIA PICCOLO, M.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; MOREIRA, R. M. e.; KRUSCHE, A. V.; BOUVET, J.-M; NOUVELLON, Y. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. **New Phytologist**, Cambridge, v. 203, n. 2, p. 401–413, Jul. 2014b.

BEADLE, C.L.; BANHAM, P.W.; WORLEDGE, D.; RUSSELL, S.L.; HETHERINGTON, S.J.; HONEYSETT, J.L.; WHITE, D.A. Effect of irrigation on growth and fibre quality of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. **Appita Journal**, Victoria, v. 54, n. 2, p. 144 –147, 2001.

BELLOTE, A.F.J. **Concentração, acumulação e exportação de nutrientes em *Eucalyptus grandis* (Hill, ex Maiden) em função da idade.** 1979. 129 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Planta) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.

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, cap.7, p.145-171. 2001.

BOWYER, J.L; HAYGREEN, J.G. **Forest products and wood science: An introduction.** 5. ed, Ames: Wiley-Blackwell, 2007. 576p.

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.

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, n. 1498, p. 1839-1848, May. 2008.

BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* ao nível do DAP: análise preliminar. **Revista IPEF**, Piracicaba, n.5, p.81-90, Dez. 1972.

BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. **Biochemistry and molecular biology of plants.** Rockville, Md: American Society of Plant Physiologists, 2000. 1367 p.

CABRAL, O.M.R.; GASH, J.H.C.; ROCHA, H.R.; MARSDEN, C.; LIGO, M.A.V.; FREITAS, H.C.; TATSCH, J.D.; GOMES, E. Fluxes of CO₂ above a plantation of *Eucalyptus* in southeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, n. 1, p. 49-59, Jan. 2011.

CARRILLO, I.; AGUAYO, M. G.; VALENZUELA, S.; MENDONÇA, R. T.; ELISSETCHE, J. P. Variations in wood anatomy and fiber biometry of *Eucalyptus globulus* genotypes with different wood density, **Wood Research**, Kyoto, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2015.

CARTER, J.L.; WHITE, D.A. Plasticity in the Huber value contributes to homeostasis in leaf water relations of a mallee *Eucalypt* with variation to groundwater depth. **Tree Physiology**, Victoria, v. 29, n. 11, p. 1407-1418, Set. 2009.

CASTRO, V.R. **Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2014, 141p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

CATCHPOOLE, S.J.; DOWNES, G.; READ, S.M. **The effect of salt on wood and fibre formation in eucalypts: A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation**. Rural Industries Research & Development Corporation, Canberra, 2000. 55 p.

CPTEC/INPE. Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC. Relatório 1/Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC. 185 p. 2007.

CHANDRASEKHARA PILLAI, P.K.; PANDALAI, R.C.; DHAMODARAN, T.K.; SANKARAN, K.V. Effect of silvicultural practices on fibre properties of *Eucalyptus* wood from short-rotation plantations. **New Forests**, Dordrecht, v. 44, n. 4, p. 521-532, Nov. 2012.

CHATTAWAY, M. M. The sapwood-heartwood transition. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 16, n. 1, p. 25-34, Jan. 1952.

COLLATZ, G. J.; BALL, J. T.; GRIVET, C.; BERRY, J. A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration; A model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and forest meteorology**, Amsterdam, v. 54, n. 2-4, p. 107-136, Abr. 1991.

CONDIT, R.; HUBBELL, S.P.; LAFRANKIE, J.V.; SUKUMAR, R.; MANOKARAN, N.; Foster, R.B.F.; Ashton, P.S. Species-area and species individual relationships for tropical trees: a comparison of three 50-ha plots. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 84, n. 4, p. 549-562, Ago. 1996.

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.

COWAN, I. R. **Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants**. In: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C.B.; ZIEGLER, H. *Physiological Plant Ecology II*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1982. p. 589-613.

DEBELL, D.S.; KEYES, C.R.; GARTNER, B. L. Wood density of *Eucalyptus saligna* grown in Hawaiian plantations: Effects of silvicultural practices and relation to growth rate. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 64, n. 2, p. 106-110, Feb. 2001.

DESCH H. E.; DINWOODIE, J. M. **Timber - Structure, Properties, Conversion and Use**. 7. ed. London: Macmilan Press, 1996. 306 p.

DOWNES, G. M.; WORLEDGE, D.; SCHIMLECK, L. R.; HARWOOD, C. E.; FRENCH, J. R. J.; BEADLE, C. L. The effect of growth rate and irrigation on the basic density and kraft pulp yield of *Eucalyptus globulus* and *E-nitens*. **New Zealand Journal of Forestry**, Wellington, v. 51, n. 3, p. 13-22, Nov. 2006.

DREW, D.M.; DOWNES, G.M. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review. **Dendrochronologia**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p.159-172, jan. 2009.

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, n. 4, p. 1-10, jan. 2009.

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

FAO. **El eucalipto en la repoblación forestal**. Roma, 1981. 747p.

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, 2002.

FAXITRON, User Manual Faxitron DX Radiography System, 95p. 2009.

FEBRUARY, E.C. Sensitivity of xylem vessel size and frequency to rainfall and temperature: implications for paleontology. **Paleontologia Africana**, v. 30, p. 91-95, 1993.

FEBRUARY, E.C.; STOCK, W.D.; BOND, W.J.; Le ROUX, D.J. Relationships between Water Availability and Selected Vessel Characteristics in *Eucalyptus Grandis* and Two Hybrids. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 16, n. 3, p. 269 – 276, 1995.

FEIKEMA, P.M.; MORRIS, J.D.; BEVERLY, C.R.; COLLOPY, J.J.; BAKER, T.G.; Lane, P.N.J. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+forest growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 5, p. 663-678. 2010

FLORSHEIM, 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.

FRANCO M. P. **Efeito da substituição do potássio pelo sódio em árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, visando a expansão das plantações florestais sob condições de estresse hídrico**. 2014. 153p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

FREITAS, P.C.; SETTE JR, C.R.; CASTRO, V.R.; CHAIX, G.; LACLAU, J.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 405-416, Abr. 2015

FREY-WYSSLING, A.; BOSSHARD, H.H. Cytology of the ray cells in the sapwood and heartwood. **Holzforschung**, Berlin, v. 13, n. 5, p. 129-137. Nov. 1959.

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.

GITHIOMI, J.K.; KARIUKI, J.G. Wood basic density of *Eucalyptus grandis* from plantations in central Rift Valley, Kenya: Variation with age, height level and between sapwood and heartwood. **Journal of Tropical Forest Science**, vol. 22, n. 3, p. 281-286, jul. 2010.

GITHIOMI J. K.; DOUGAL E. Analysis of Heartwood-Sapwood Demarcation Methods and Variation of Sapwood and Heartwood within and Between 15 Year Old Plantation Grown *Eucalyptus Regnans*. **International Journal of Applied Science and Technology**, Bangladesh, v. 2, n. 8, p. 63-70, Out. 2012.

GOMINHO, J.; FIGUEIRA, J.; RODRIGUES, J.; PEREIRA, H. Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid *Eucalyptus grandis* x *urophylla*. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 33, n. 1, p. 3-8, Jan. 2001.

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

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

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

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 e BENEDETTI, V. (Ed.) **Forest Nutrition and Fertilization**. Piracicaba: IPEF, p. 13-64, 2004a.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, n. 1-2, p. 45-61, Mai. 2004b.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.-P.; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008.

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, Jul, 2011.

HIGGINS, H.G. **Pulp and paper**. In: Hillis, W.E.; Brown, A.G. Eucalyptus for Wood Production. Melbourne: CSIRO/Academic Press, 1984. 484 p.

HILLIS, W.E. 1978. **Wood quality and utilisation**. In: Hillis, W. E; Brown, A. G. 1984. Eucalypts for wood production. Melbourne: CSIRO/ Academic Press, p. 259-289.

HILLIS, W.E. Some basic characteristics affecting wood quality. **Appita**, Victoria, v. 33, n. 5, p. 339-344, 1980.

HILLIS, W.E. Biological aspects of heartwood formation. In. IUFRO Meeting: Section 41, Melbourne, Australia, 1965. 11p.

HILLIS, W.E. Chemical aspects of heartwood formation. **Wood Science and Technology**, New York, v. 2, n. 4, p. 241-259, 1968.

HILLIS, W.E. Properties of eucalypt woods of importance to the pulp and paper industries. **Appita Journal**, Victoria, v. 26, p. 113-122, 1972.

HILLIS, W.E. **Heartwood and tree exudates**. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 268 p.

IGARTÚA, D.; MONTEOLIVA, S. Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. **Bosque**, Valdivia, v. 31, n.2, p. 150-156, 2010.

IPCC- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 pp.

IPCC- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Working Group I Contribution To The Ipcp Fifth Assessment Report (Ar5), Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 2013.

JOHANSEN, D. **Plant microtechnique**. New York: MacGraw-Hill Book, 1940, 450p.

JÓIA, H.A.; FONSECA, T.; SILVA, M.E.; PACHECO MARQUES, C. Avaliação por métodos não destrutivos do diâmetro de cerne à altura do peito em eucalipto e em choupo. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 4, p. 309-313, 2006

JORGE, F.; PEREIRA, H. Influência da silvicultura na qualidade da madeira. **Revista Florestal**, Lisboa, v.11, n.2, p.27-31, jul./dez.1998.

JORGE, F.; QUILHO, T.; PEREIRA, H. Variability of fibre length in wood and bark in *Eucalyptus globulus*. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 21, p. 41–48, 2000.

KUMPLERS, J.; JANIN, G.; BECKER, M. The influences of age, extractive content and soil water on wood color in oak: the possible genetic determination of wood color. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v. 50, n. 1, p. 403-409, 1993.

KOJIMA, M.; YAMAMOTO, H.; YOSHIDA, M.; OJIO, Y.; OKUMURA, K. Maturation property of fast-growing hardwood plantation species: a view of fiber length. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 1, p. 15–22, Jan. 2009a.

KOJIMA, M.; YAMAJI, F.M.; YAMAMOTO, H.; YOSHIDA, M.; NAKAI, T. Effects of the lateral growth rate on wood quality parameters of *Eucalyptus grandis* sampled from different latitudes in Brazil and Argentina. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 10, p. 2175–2181, abr. 2009b.

KOJIMA, M.; YAMAMOTO, H.; OKUMURA, K.; OJIO, Y.; YOSHIDA, M.; OKUYAMA, T.; ONA, T.; MATSUNE, K.; NAKAMURA, K.; IDE, Y.; MARSOEM, S.N.; SAHRI, M.H.; HADI, Y.S. Effect of the lateral growth rate on wood properties in fast-growing hardwood species. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 55, n. 6, p. 417–424, Dez. 2009c.

KOZLOWSKI, T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity. **Tree Physiology**, Oxford, v. 17, n. 7, p. 490-490, Jul. 1997.

KUBE, P.D.; RAYMOND, C.A.; BANHAM, P.W. Genetic parameters for diameter, basic density, cellulose content and fibre properties for *Eucalyptus nitens*. **Forest Genetics**, Zvolen, v. 8, n. 4, p. 285–294, Nov. 2001.

KRAMER, P.J.; KOZLOWSKI, T.T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1960. 745 p.

LACLAU, J.-P. **Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'Eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais; conséquences pour la gestion des plantations industrielles**. 2001, 146 p. Tese (Doutorado em Sciences de la vie) - Institut National Agronomique Paris Grignon, Paris, 2001.

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.; 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**, Victoria, v. 29, p. 111-114, 2009.

- LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; VERHOEF, W.; PONZONI, F.J.; LO SEEN, D.; BÉGUÉ, A.; STAPE, J-L.; NOUVELLON, Y. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 2, p.586-599, fev. 2011.
- LENZ, O.; SCHÄR, E.; SCHWEINGRUBER, F.H. Methodische Probleme bei der radiographisch-densitometrischen Bestimmung der Dichte und der Jahrringbreiten von Holz. **Holzforschung**, Berlin, v. 30, 114-123, 1976.
- LI, C.; BERNINGER, F.; KOSKELA, J.; SONNINEN, E. Drought responses of *Eucalyptus microtheca* provenances depend on seasonality of rainfall in their place of origin. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 27, n. 3, p. 231-238, 2000.
- LIMA, J.T.; ROSADO, S.C.S.; OLIVEIRA, A.D. Variação da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, *E. tereticornis* e *E. camaldulensis* no sentido longitudinal dos caules. **Ciência e Prática**. Lavras, v.16, n.1, p.123-127, jan./mar. 1992.
- 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.
- LOPES, M. C. **Agrupamento de árvores matrizes de Eucalyptus grandis em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira**. 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal – Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- MACDONALD, E.; HUBERT, J. A review of the effects of silviculture on timber quality of *Sitka spruce*. **Forestry**, Oxford, v. 75, n. 2, p. 107–138, Fev. 2002.
- MACFARLANE, C.; ADAMS, M.A. Delta13C of wood in growth-rings indicates cambial activity of drought-stressed trees of *Eucalyptus globulus*. **Functional Ecology**, Oxford, v. 12, n. 4, p.655-664, Ago. 1998.
- MALAN, F.S. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. **South African Forestry Journal**, Grahamstown, v. 157, n. 1, p.16-23, jun. 1991.
- MARCATI, C.R. **Sazonalidade cambial em espécies tropicais**. 2000. 147p, Tese de doutorado. Instituto de Biociências, USP, São Paulo. 2000.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

- MENDES, H.S.J.; PAULA, N.F.; SCARPINATTI, E.A.; PAULA, R.C. Respostas fisiológicas de genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* à disponibilidade hídrica e adubação potássica. **CERNE**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 603-611, Dec. 2013.
- MEETRS, P. Mineral nutrient concentrations in sapwood and heartwood: a literature review. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 59, n. 7, p. 713-722, Nov. 2002.
- MERCHANT, M.; CALLISTER, A.; ARNDT, S.; TAUSZ M.; ADAMS M. Contrasting physiological responses of six *Eucalyptus* species to water deficit. **Annals of Botany**, Oxford, v. 100, p. 1507-1515, 2007.
- 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.
- MIRANDA, I.; ALMEIDA, M. H.; PEREIRA, H. Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. at harvest age and its relation to a non-destructive early assessment. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 149, n. 1-3, p. 235-240, Ago. 2001.
- MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. The influence of irrigation and fertilization on heartwood and sapwood contents in 18-years-old *Eucalyptus globulus* trees. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 36, n. 10, p. 2675-2683, Out. 2006.
- MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacings. **Trees**, Berlin, v. 23, n. 2, p. 367-372, Nov. 2009.
- MORA, A.L.; GARCIA, C.H. A cultura do eucalipto no Brasil. São Paulo: SBS, 2000. 112p.
- MORAIS, M. C.; PEREIRA, H. Heartwood and sapwood variation in *Eucalyptus globulus* Labill. trees at the end of rotation for pulpwood production. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 64, n. 6, p. 665-671, Jan. 2007.
- MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. **New Phytologist**, Cambridge, v. 167, n. 3, p. 645-663, jul. 2005.
- NAIDOO, S.; ZBONÁK, A.; PAMMENTER, N. W.; AHMED, F. Assessing the effects of water availability and soil characteristics on selected wood properties of *E. grandis* in South Africa. In: IUFRO 2007 WORKING GROUP 2.08.03 MEETING "EUCALYPTS AND DIVERSITY: BALANCING PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY", 2007, Durban. **Anais...** Durban: IUFRO, 2007. p. 1-11.
- NAIDOO, S.; ZBONÁK, A.; AHMED, F. The effect of moisture availability on wood density and vessel characteristics of *Eucalyptus grandis* in the warm temperate region of South Africa. In: "Wood structure and Properties '06", 2006, Sielnica. **Anais...** Sielnica: IUFRO symposium, Set. 2006, p. 1-8.

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, jun. 2011

OHBAYASHI, H., SHIOKURA, T. Wood anatomical characteristics and specific gravity of fast-growing tropical tree species in relation to growth rate. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 36, n. 10, p. 889–893, 1990.

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.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, Feb. 2005.

ONA, T.; SONODA, T.; ITO, K.; Shibata, M. Relations between various extracted basic densities and wood chemical components in *Eucalyptus globulus*. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 44, p. 165–168. 1998

PANSHIN, A.J.; de ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3ed, New York: Mac Graw-Hill, 1970. 705 p.

PARKER, M.L.; KENNEDY, W.W. The status of radiation densitometry for measurement of Wood specific gravity. In: PEDERSEN, J. G.; HOFFMEYER, P.; JACOBSEN, U. G.; REFFSTRUP, T. **Non-destructive evaluation of wood by near infrared reflectance spectroscopy**. Report n. 93- I- 1, Kolding, Denmark, Biotechnological Institute, 1993, 57p.

POLGE, H. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitometrique de radiographies d'échantillons prélevés a la tarière sur des arbres vivants. Aplication dans les domaines technologique et physiologique. **Annual Science Forestry**, v.23, n.1, p.1-206, 1966.

QUILHO, T.; MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Within-tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). **IAWA Journal**, Utrecht, v. 27 n. 3, p. 243–254, 2006.

RAYMOND, C.A.; BANHAM, P.; MACDONALD, A.C. Within tree variation and genetic control of basic density, fiber length, and coarseness in *Eucalyptus regnans* in Tasmania. **Appita Journal**, Victoria, v. 51, n. 4, p. 299-305, 1998.

RAYMOND, C.A.; MUNERI, A. Effect of fertilizer on wood properties of *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal Forest Resources**, Ottawa, v. 30, n. 1, p. 136–144, 2000.

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.

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, jun. 2012.

ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z.; SPEGIORIN, L. Variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade. In: ENCONTRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURA DA MADEIRA, 7, 2002.Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: 2002. p.1-10.

ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden aos sete anos. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, 2004.

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

SAS INSTITUTE. **Statistical analysis system user's guide**. Version 6.08. Cary, 1997. 1014p.

SASS, J.E. **Botanical microtechnique**. 2ed. Iowa: State College Press, 1951, 350p.

SEARSON, M.J.; THOMAS, D.S.; MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. Wood density and anatomy of water-limited eucalypts. **Tree Physiology**, Oxford, v 24, n. 1, p. 1295-1302, Nov. 2004.

SELLIN, A. Sapwood amount in *Picea abies* (L.) Karst determined by tree age and radial growth rate. **Holzforschung**, Berlin, 50, n. 4, p. 291–296, 1996.

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, PR, v. 39, n. 3, p. 535-546, jul./set. 2009.

SETTE JUNIOR, C.R. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 2010. 153p. 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 do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex.

Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, 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.; LOUSADA, J.L.; LACLAU, J.P. Sazonalidade do incremento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* pelo uso de dendrômetros. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 763-775, out.-dez., 2012

SETTE JUNIOR, C.R.; DEUS JUNIOR, J.C, TOMAZELLO FILHO, M.; PÁDUA, F.A, CALIL, F.N.; LACLAU, J.P. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. **CERNE**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 251-258, Jun. 2014.

SILVA, M. p.R.; KLAR, A.E.; PASSOS, J.R. Efeitos do manejo hídrico e da aplicação de potássio nas características morfofisiológicas de mudas de *Eucalyptus grandis* (Hill ex. Maiden). **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 31-40, 2004.

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

SILVA, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 61, p. 279-291, Dez. 2007.

SILVEIRA, R.L.V.A.; GONÇALVES, J.L.M.; GONÇALVES, A.N.; BRANCO, E.F. **Levantamento e estudo de mercado de fertilizantes em florestas brasileiras**. Relatório Técnico. Piracicaba: IPEF/FEALQ, 1995. 117 p.

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

SREEVANI, P.; RAO, R.V. Variation in basic density and anatomical properties of *Eucalyptus Tereticornis* sm. Clones, **Research Journal of Recent Sciences**, Indore, v. 3, n. ISC-2013, p. 271-274, 2014.

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

STONEMAN, G.L.; CROMBIE, D.S.; WHITFORD, K.; HINGSTON, F.J.; GILES, R.; PORTLOCK, C.C.; GALBRAITH, J.H.; DIMMOCK, G.M. Growth and water relations of *Eucalyptus marginata* (jarrah) stands in response to thinning and fertilization. **Tree Physiology**, Victoria, v. 16, p. 267-274, 1996.

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, n. 5, p. 391–416. Set. 2003

TARDIEU, F.; SIMONNEAU, T. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 419-432, 1998.

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

TEIXEIRA, P.C.; LEAL, P. G.L.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Nutrición potásica y relaciones em plantas de *Eucalyptus spp.* **Bosque**, Valdivia, v. 16, n. 2, p. 61-68, 1995.

TEIXEIRA, P. C.; GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JUNIOR, J.C.; DEZORDI, C. *Eucalyptus* sp. seedling response to potassium fertilization and soil water. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 47-63, jan.-mar. 2008.

TEZARA, W.; MITCHELL, V.J.; DRISCOLL, S.D.; LAWLOR, D.W. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. **Nature**, London, v. 401, p. 914-917, 1999.

THOMAS, D.D.; MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. Changes in wood density of *Eucalyptus camaldulensis* due to temperature—the physiological link between water viscosity and wood anatomy. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p.157-165, Mai. 2004.

THOMAS, D.S.; MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. Why does phosphorus limitation increase wood density in *Eucalyptus grandis* seedlings?. **Tree Physiology**, Oxford, v. 26, p. 35–42, Out. 2005.

THOMAS, D.S.; MONTAGU, K.D.; CONROY, J.P. Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. **Tree Physiology**, Oxford, v. 27, n. 2, p. 251-260, Fev. 2007

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

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

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **Revista IPEF**, Piracicaba, n.36, p.35-42. ago.1987.

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

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

TSOUMIS, G. **Science and Technology of wood. Structure, Properties, Utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

TURNER, N.C.; SCHULZE, E.D.; GOLLAN, T. The response of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water contents. I. Species comparisons at high soil water contents. **Oecologia**, Heidelberg, v. 63, p. 338-342, 1984.

VEENIN, T.; FUJITA, M.; NOBUCHI, T.; SIRIPATANADILOK, S. Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 26, n. 3, p. 353–361, 2005.

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.

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.

WILKINS, A.P. Influence of silvicultural treatment on growth and wood density of *Eucalyptus grandis* grown on a previous pasture site. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 53, n. 3, p.168-172, Jan. 1990.

WILKINS, J. Sapwood, heartwood and bark thickness of silviculturally treated *Eucalyptus grandis*. **Wood Science and Technology**, New York, v. 25, n. 6, p. 415-423, Set. 1991.

WILKINS, A.P.; HORNE, R. Wood-density variation of young plantation-grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 40, n. 1-2, p.39-50, Mai. 1991.

WILKES, J.; ABBOTT, D. Influence of the rate of tree growth on the anatomy of eucalypt species. **Appita**, Melbourne, v. 37, n. 3, p. 231-231, 1983.

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

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

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**, Victoria, v. 16, n. 5, p. 469-476, Mai. 1996.

WHITE, D.A.; TURNER, N.C.; GALBRAITH, J.H. Leaf water relations and stomatal behavior of four allopatric *Eucalyptus* species planted in Mediterranean southwestern Australia. **Tree Physiology**, Victoria, v. 20, n. 17, p. 1157-1165, Nov. 2000.

WHITE, D.A.; CROMBIE, D.S.; KINAL, J.K.; BATTAGLIA, M.; MCGRATH, J.F.; MENDHAMA, D.S.; WALKER, S.N. Managing productivity and drought risk in *Eucalyptus globulus* plantations in south-western Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 33-44, 2009.

WRIGHT, S.J.; YAVITT, J.B.; WURZBURGER, N.; TURNER, B.L.; TANNER, E.V.J.; SAYER, E.J.; SANTIAGO, L.S.; KASPARI, M.; HEDIN, L.O.; HARMS, K.E.; GARCIA, M.N.; CORRE, M.D. Potassium, phosphorus, or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland Tropical Forest. **Ecology**, Ithaca, v. 92, n. 8, p.1616-1625, 2011.

ZHANG, X.; DENG, L.; BAAS, P. The ecological wood anatomy of the Lilacs (*Syringa oblata* var. *giraldii*) on Mount Taibei in North-western Chiu. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 9, n. 1, p. 24-30, 1988.

ZOBEL, B.J.; BUIJTENEN, J.P. **Wood variation: its causes and control**. Berlin: Springer Verlag, 1989. 361 p.