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

**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**

Mariana Pires Franco

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

**Piracicaba
2014**

Mariana Pires Franco
Engenheira Florestal

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

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2014

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

Franco, Mariana Pires

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 / Mariana Pires Franco. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.

199 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.
Bibliografia.

1. Fertilização 2. Qualidade do lenho 3. Variação radial de nutrientes 4. Mudanças climáticas
5. Crescimento em diâmetro 6. Dendrômetros I. Título

CDD 634.9734
F825e

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

**Dedico este trabalho aos meus pais,
Maria José e Roberto,
pelo imenso amor e
por não medirem esforços para tornarem
realidade meus sonhos.**

AGRADECIMENTOS

À DEUS, pelo dom da vida, pela saúde, pelas oportunidades, pelas conquistas e por iluminar meu caminho sempre;

À meu grande companheiro de vida, Felipe, pelo amor incondicional;

À minha família, em especial meus avós Maria Nilce e Roberto, pelo exemplo de união e por sempre acreditarem em meus sonhos e incentivarem minhas conquistas;

Ao meu tio Elsio (*in memoriam*), pelo incentivo e por me mostrar as belezas que vêm da natureza;

Ao meu orientador Mario Tomazello Filho, por todo conhecimento transmitido, pela dedicação, atenção e confiança no meu trabalho;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão da bolsa de mestrado e auxílio à pesquisa no país;

Aos pesquisadores Gilles Chaix e Bénédicte Favreau, pela imensa contribuição, ensinamentos, confiança e amizade;

Ao pesquisador Jean Paul Laclau, pelas importantes contribuições ao trabalho e disponibilização da área experimental;

Ao prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin, pela sempre pronta ajuda e receptividade em seu laboratório;

Ao prof. Dr. Francisco Krug e toda equipe do laboratório de química analítica do CENA pela oportunidade de realização das análises químicas do lenho e pelo incentivo ao trabalho;

Ao prof. Dr. Carlos Roberto Sette Junior, pela amizade, confiança, receptividade e imensa ajuda sem a qual meu trabalho não teria se concretizado;

À Estação Experimental de Itatinga, em especial ao Rildo, Eder e Elaine, por todo o apoio e atenção durante a realização dos trabalhos de campo;

À Maria Bermudez, pelo cuidado na execução das análises de anatomia e, principalmente, pela amizade e bons momentos proporcionados;

Ao Aparecido Candido Siqueira, pela imensurável ajuda em todas as etapas do meu trabalho, pela amizade e boas risadas;

Ao Udemilson Ceribelli por toda ajuda nas análises químicas;

Ao Aílton de Lima Lucas e à Julia Heliodoro, pela atenção e ajuda na condução dos ensaios mecânicos;

À Samara D. Franzol, pela amizade e pela imensurável ajuda nas análises químicas e no NIR;

À Tatiane A. da Silva, pela ajuda na reta final do trabalho e pelos momentos de descontração;

À família Petean e Coelho de Souza pelo carinho, incentivo e bons momentos;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, pelo espaço para condução do trabalho e por satisfazer minhas expectativas diante à pesquisa;

Aos amigos de laboratório e da pós-graduação Alisson Rangel, Alejandro Venegas, Angel Boschiero, Camila Sarto, Caroline Caum Perim, Claudio Anholetto, Danilo Ignacio, Eraldo Bonfatti Jr, Ivanka Rosada, Karina Modes, Laura Trebbi, Magnus Vivian, Marco Arizapana, Paula Surdi, Priscila Geroto, Renata Bovi, Saly Takeshita, Tassio Trevizor, Tiago Segura, Ugo Belini, Victor Moutinho, Victor Cezar e Vinícius Castro, pela amizade e bons momentos;

Aos amigos Matheus Chagas e Marta Leite por não medirem esforços para me ajudar em várias etapas deste trabalho e, principalmente, pela amizade e incentivo;

À todos meus amigos que, perto ou longe, contribuíram e incentivaram meu trabalho.

À Ana Claudia Fattori, Luigi Maricato di Bella, Paula Alves, Mateus Bergamin, Tais Rosa, Flavio Marcon e Victória Pires por todos os ótimos momentos e boas risadas;

À todas as pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse possível, meu muito obrigada.

**“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus,
não sou o que era antes”.**

Marthin Luther King

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	21
1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	29
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 Resposta do eucalipto à adubação potássica	31
3.2 Fertilização sódica em espécies arbóreas e a substituição do potássio pelo sódio	33
3.3 Efeito da aplicação de fertilizantes minerais e da taxa de crescimento nas propriedades do lenho de eucalipto	35
3.4 Conceito de estresse hídrico e seu efeito sobre as plantas	38
3.4.1 Interação entre os efeitos do potássio e o estresse hídrico.....	40
3.4.2 Mudanças climáticas e efeitos do estresse hídrico nas florestas	41
3.4.3 Estratégias desenvolvidas pelas plantas durante o déficit hídrico.....	43
3.4.4 Qualidade do lenho de eucalipto submetido ao estresse hídrico	44
3.5 Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto medido por dendrômetro e relação do crescimento com variáveis climáticas.....	46
3.6 Propriedades do lenho de eucalipto	48
3.6.1 Densidade básica e aparente.....	48
3.6.2 Características anatômicas	50
3.6.3 Propriedades mecânicas	52
3.6.4 Propriedades químicas.....	55
3.7 Variação radial de elementos químicos no lenho das árvores	58
3.7.1 Princípios e usos do LIBS	61
3.8 Princípios da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	64
3.8.1 Método de análise dos resultados obtidos pelo NIR	67
3.8.2 Emprego do NIR no Brasil e vantagens da técnica	71
3.8.3 Uso do NIR para determinação da qualidade do lenho	72
4 MATERIAL E MÉTODOS	77
4.1 Local de estudo	77

4.2 Delineamento experimental	78
4.3 Seleção, corte e coleta das amostras do lenho das árvores de eucalipto	79
4.4 Incremento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto	80
4.5 Variáveis climáticas	81
4.6 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto: densidade aparente e básica	82
4.6.1 Densidade aparente do lenho das árvores de eucalipto	82
4.6.2 Densidade básica do lenho das árvores de eucalipto	84
4.6.3 Densidade básica do lenho por espectroscopia NIR	85
4.7 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto	87
4.7.1 Dimensões das fibras	87
4.7.2 Confeção das lâminas histológicas e dimensões dos vasos	88
4.8 Propriedades mecânicas do lenho das árvores de eucalipto	89
4.9 Propriedades químicas do lenho das árvores de eucalipto	92
4.10 Determinação de elementos químicos no lenho das árvores de eucalipto	93
4.11 Análises estatísticas	96
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5.1 Diâmetro e volume do tronco das árvores de eucalipto	97
5.2 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto	110
5.2.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X	110
5.2.2 Densidade básica do lenho pelo método da balança hidrostática	116
5.2.3 Densidade básica do lenho por espectroscopia NIR	121
5.2.3 Cartografia da densidade básica predita pelo NIR	125
5.3 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto	127
5.3.1 Dimensões das fibras	127
5.3.2 Dimensões e frequência dos vasos	134
5.4 Características anatômicas e a densidade aparente média do lenho	139
5.5 Propriedades mecânicas do lenho das árvores de eucalipto	145
5.6 Propriedades químicas do lenho das árvores de eucalipto	147
5.7 Intensidade das linhas de emissão dos analitos no lenho das árvores de eucalipto	150
6 CONCLUSÕES	159
7 RECOMENDAÇÕES	161
REFERÊNCIAS	163

RESUMO

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

O presente estudo tem por objetivo avaliar o efeito da substituição do potássio pelo sódio no crescimento em diâmetro e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, plantadas em espaçamento 3x2 m e fertilizadas com potássio e sódio (no plantio, 6° e 12° mês), visando orientar a fertilização mineral com potássio e sódio em plantações florestais sujeitas ao déficit hídrico. Foram selecionadas 60 árvores de eucalipto, no 101° mês após plantio, em cinco classes de área basal e avaliado o incremento em diâmetro do tronco, a cada 14 dias, de fevereiro de 2006 a setembro de 2012, através de dendrômetros. Para a amostragem do lenho, foram coletados discos em seis posições (base, DAP, 25, 50, 75 e 100%) da altura total das árvores. As amostras coletadas foram utilizadas para avaliação das propriedades anatômicas (fibras e vasos), físicas (densidade básica ponderada através dos métodos da balança hidrostática, da espectroscopia por infravermelho próximo e densidade aparente por densitometria de raios X), mecânicas (resistência e rigidez à flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras), químicas (teores de lignina, holocelulose, extrativos e cinzas) e variação radial de Ca, K, Mg, Na e P (por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser) segundo os tratamentos de fertilização, classes de área basal, posições radial e longitudinal do tronco. Os resultados mostram que as árvores de eucalipto dos tratamentos potássio e sódio e as de maior classe de área basal, apresentaram taxas de incremento do tronco superiores em relação às árvores controle e demais classes de área basal. Foi verificado efeito da sazonalidade climática no diâmetro do tronco, com períodos de máximo e mínimo crescimento. Com exceção da densidade básica ponderada, todas as outras propriedades do lenho apresentaram efeito significativo dos tratamentos de fertilização. A determinação da densidade básica pelo NIR demonstrou resultados satisfatórios com coeficiente de determinação próximo a 0,70. Maiores valores dos elementos químicos K e Na foram encontrados no lenho das árvores dos respectivos tratamentos. Todos os nutrientes estudados apresentaram maiores valores na posição mais externa do lenho (100% do raio). Os resultados permitem concluir que a fertilização com K e Na induziu maiores crescimentos em diâmetro do tronco e influenciou as propriedades do lenho. A influência da fertilização potássica e sódica demonstrada pelo *Eucalyptus grandis* nos períodos de déficit hídrico para região estudada é clara, uma vez que durante os períodos de baixa pluviosidade a variação sazonal do crescimento apresentou-se de forma diferenciada em relação aos períodos com maior quantidade de chuvas.

Palavras-chave: Fertilização; Qualidade do lenho; Variação radial de nutrientes; Mudanças climáticas; Crescimento em diâmetro; Dendrômetros

ABSTRACT

Effect of the substitution of potassium by sodium on trees of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, aiming the expansion of forest plantations under hydric stress

This study aims to evaluate the replacement of potassium by sodium in diameter growth and wood quality of *Eucalyptus grandis* trees, planted in spacing 3x2 m and fertilized with potassium and sodium (at planting, 6 and 12th month), order to guide the mineral fertilization with potassium and sodium in forest plantation subjected to water stress. Were selected 60 eucalyptus trees at 101th month, in five classes of basal area and were evaluated the increment in trunk diameter, every 14 days, from February 2006 to September 2012, through dendrometer bands. For sampling the wood, discs were collected in six positions (base, DBH, 0, 25, 50, 75 and 100%) of the total tree height. The samples were used to evaluate the anatomical properties (fibers and vessels), physical (basic density weighted by hydrostatic balance, near infrared spectroscopy and apparent density by X rays densitometry), mechanical (strength and stiffness in static bending and strength in compression parallel to grain), chemical (lignin, holocellulose, extractives and ash contents) and radial variation of Ca, K, Mg, Na, and P (by laser induced breakdown spectroscopy) according to the fertilization treatments, classes of basal area, radial and longitudinal positions of the stem. The results show that the eucalyptus trees with potassium and sodium treatments and larger class of the basal area demonstrated higher rates of increase in stem in relation to control trees and other classes of basal area. Effect of seasonality was found in trunk diameter, with periods of maximum and minimum growth. Except the weighted density, all other properties of the wood analyzed showed significant differences due to fertilization. The determination of the density by NIR showed satisfactory results with coefficient of determination close to 0.70. Higher values of the chemical elements K and Na were found in the tree's wood of the respective treatments. All studied nutrients were higher in the wood in external position (100 % of the radius). The results allow to conclude that the fertilization with K and Na induced the largest increases in trunk diameter and influenced the properties of the wood. The influence of sodium and potassium fertilization demonstrated by *Eucalyptus grandis* in water deficit periods for the region studied is clear, once during periods of low rainfall the seasonal variation of growth presented itself differently in relation to periods with higher amounts of rainfall.

Keywords: Fertilization; Wood quality; Radial variation of nutrients; Climate change; Diameter growth; Dendrometer bands

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro eletromagnético	64
Figura 2 - Interações entre a radiação e a amostra.....	66
Figura 3 - Esquema de calibração, validação e predição pelo NIR realizado para a densidade básica a partir dos discos de madeira	70
Figura 4 - Balanço hídrico observado na área experimental, durante os três anos iniciais da plantação (capacidade de armazenamento do solo igual a 200 mm).....	77
Figura 5 - Aspecto da parcela experimental com árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> com 101 meses, na Estação Experimental de Itatinga do Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP.....	79
Figura 6 - Esquema da amostragem do lenho das árvores de eucalipto para a realização das análises anatômicas, físico-mecânicas e químicas.....	80
Figura 7 - Confecção e instalação da faixa dendrométrica no tronco da árvore; (A) faixa dendrométrica devidamente instalada no tronco da árvore; (B) sobreposição da escala e do nônio; (C) gabarito para gravação da escala e do nônio; (D) faixa dendrométrica em detalhe com escala e mola	81
Figura 8 - (A) corte das amostras em dupla serra circular paralela; (B) amostra casca-casca obtida; (C) densitômetro de raios X; (D) suporte metálico utilizado para encaixe das amostras dentro do equipamento	83
Figura 9 - (A) vista geral do equipamento de raios X digital; (B) câmara de irradiação com destaque para as prateleiras e o local de saída dos feixes de raios X; (C) amostras dispostas para análise na câmara de irradiação; (D) perfil radial digital em escala de cinza gerado pelo equipamento.....	84
Figura 10 - (A) discos de todos as alturas imersos em água para saturação; (B) discos com aprox. três cm de espessura em seis porcentagens da altura total do tronco (base, DAP, 25, 50, 75 e 100%); (C) seleção das cunhas opostas para determinação da densidade básica ponderada..	85
Figura 11 - (A) espectrômetro modelo MPA da <i>Bruker</i> utilizado no trabalho e (B) aquisição espectral com fibras ópticas de um disco de <i>Eucalyptus grandis</i>	86
Figura 12 - Avaliação da espessura e diâmetro do lume das fibras do lenho através do software <i>Image Pro Plus</i>	88

Figura 13 - Avaliação do diâmetro e da área ocupada pelos vasos no lenho através do software <i>Image Pro Plus</i>	89
Figura 14 - (A, B) ensaio de compressão paralela às fibras; (C) aspecto geral do corpo de prova após o ensaio	90
Figura 15 - (A, B) ensaio de flexão estática; (C) aspecto geral do corpo de prova após o ensaio	90
Figura 16 - Amostra colada em suporte de polipropileno com as posições radiais (0, 25, 50, 75 e 100%) delimitadas para determinação da intensidade das linhas de emissão dos elementos por LIBS. Em destaque, têm-se a amostra já ensaiada, demonstrando a precisão da ablação pelo laser	94
Figura 17 - (A) arranjo geral dos equipamentos que compõem o sistema LIBS, com destaque para o Nd:YAG Laser Brilliant (1), medidor de energia (2) e espectrômetro Echelle (3); (B) vista superior do sistema óptico, com destaque para a lente plano-convexa (4), telescópio (5), fluxo de gás argônio (6) e porta amostra (7).....	95
Figura 18 - (A) incremento corrente e (B) acumulado do tronco no DAP das árvores de eucalipto a cada 14 dias nos tratamentos controle, com potássio e sódio, no período de 79 meses.....	99
Figura 19 - (A) incremento corrente e (B) acumulado do tronco no DAP das árvores de eucalipto a cada 14 dias por classe de área basal, no período de 79 meses.....	103
Figura 20 - Precipitação e temperatura média na área experimental, no período de 79 meses	106
Figura 21 - Média do crescimento em diâmetro (cm) das árvores de todos os tratamentos e a precipitação durante os 79 meses de mensuração dos dendrômetros	108
Figura 22 - Variação radial da densidade aparente (g/cm ³) do lenho das árvores de eucalipto da classe de área basal média dos tratamentos (A) controle, (B) potássio e (C) sódio. A imagem 1 representa o perfil radial escaneado e a imagem 2 o perfil radial obtido pelo equipamento de raios X digital, onde na escala de cinza, quanto mais próximo do branco, maior a densidade	114

- Figura 23 - Variação longitudinal da densidade básica ponderada (g/cm^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, aos 101 meses, segundo os tratamentos de fertilização; * significativo ($p < 0,05$) 119
- Figura 24 - Espectros obtidos de todas as amostras de *Eucalyptus grandis* para determinação da densidade básica (g/cm^3) e delimitação das regiões que apresentam harmônicos das vibrações moleculares presentes nos constituintes químicos da madeira 121
- Figura 25 - Relação entre valores de densidade básica ponderada ($\text{db} - \text{g/cm}^3$) predita pelo NIR e valores referência para cada tratamento. A linha preta mostra a tendência dos dados e a linha vermelha representa a relação ideal entre os dados (*target line*)..... 123
- Figura 26 - Variação longitudinal e radial da densidade básica ponderada (g/cm^3) do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* estimada pelo NIR, segundo os tratamentos avaliados 126
- Figura 27 - (A) variação radial do comprimento, (B) largura, (C) espessura da parede (D) e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, nos três tratamentos de fertilização; *significativo ($p < 0,05$) 132
- Figura 28 - (A) variação radial do diâmetro tangencial (μm), (B) % de área ocupada e (C) frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, nos três tratamentos de fertilização; *significativo ($p < 0,05$) 137
- Figura 29 - Variação radial do diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses. Classe de área basal média/tratamento de fertilização com potássio (A e C) e sódio (B e D) na posição 50% do raio. As imagens C e D são ampliações (10X) das imagens A e B; escala igual a 500 μm 138
- Figura 30 - Perfil radial da densidade aparente e respectiva seção transversal do lenho do tronco de eucalipto e da imagem obtida pelo equipamento de raios X digital, da classe de área basal média do tratamento controle, com destaque para (A,B) a região mais interna e (C,D) a região mais externa; escala igual a 500 μm 142

- Figura 31 - Perfil radial da densidade aparente e respectiva seção transversal do lenho do tronco de eucalipto e da imagem obtida pelo equipamento de raios X digital, da classe de área basal média do tratamento potássio, com destaque para (A,B) a região mais interna e (C,D) a região mais externa; escala igual a 500 μm 143
- Figura 32 - Perfil radial da densidade aparente e respectiva seção transversal do lenho do tronco de eucalipto e da imagem obtida pelo equipamento de raios X digital, da classe de área basal média do tratamento sódio, com destaque para (A,B) a região mais interna e (C,D) a região mais externa; escala igual a 500 μm 144
- Figura 33 - Intensidade de emissão de Ca, K, Mg, Na e P nas posições radiais 0, 25, 50, 75 e 100% do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*, respectivamente; Colunas C, K e Na indicam os tratamentos controle, potássio e sódio, nesta ordem 152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência das coníferas e folhosas (valores na condição-padrão de referência U=12%)	55
Tabela 2 - Técnicas para análise da variação radial de nutrientes no lenho mais comumente utilizadas relatadas na literatura	62
Tabela 3 - Região do infravermelho, respectivo comprimento de onda (nm) e característica medida	65
Tabela 4 - Região espectral e respectiva natureza da transição vibracional.....	67
Tabela 5 - Atributos químicos do solo da área experimental.....	78
Tabela 6 - Elementos e principal linha de emissão, em nanômetros (nm), selecionada para análise pelo LIBS.....	95
Tabela 7 - Diâmetro (cm) e volume (m ³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto na etapa inicial (fev./2006; 22º mês) e final (set./2012; 101º mês) com os respectivos incrementos, no período de 79 meses e nos períodos de máximo e mínimo crescimento, nos três tratamentos de fertilização	101
Tabela 8 - Diâmetro (cm) e volume (m ³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto na etapa inicial (fev./2006; 22º mês) e final (set./2012; 101º mês) com os respectivos incrementos, no período de 79 meses e nos períodos de máximo e mínimo crescimento, nas cinco classes de área basal	105
Tabela 9 - Densidade aparente média, mínima e máxima (g/cm ³) do lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por tratamento de fertilização	110
Tabela 10 - Densidade aparente média, mínima e máxima (g/cm ³) do lenho das árvores de eucalipto, aos 101 meses, por classe de área basal	111
Tabela 11 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm ³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, no 24º, 48º e 72º e 101º mês de idade	115
Tabela 12 - Análise de regressão múltipla entre a densidade aparente média (variável dependente) e suas componentes densidade aparente máxima e mínima (variáveis independentes), com base nos valores médios por posição radial	116
Tabela 13 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm ³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, nos três tratamentos de fertilização	117

Tabela 14 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto com 101 meses de idade, por classe de área basal.....	118
Tabela 15 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, no 24º, 36º, 48º e 101º mês de idade	120
Tabela 16 - Calibração e validação cruzada correspondente obtida pelo NIR para estimativa da densidade básica ponderada de todos os tratamentos	122
Tabela 17 - Resumo dos valores preditos e observados de densidade básica ponderada (g/cm^3)	123
Tabela 18 - Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por tratamento de fertilização	127
Tabela 19 - Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por classe de área basal	130
Tabela 20 - Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, nas idades de 24, 48, 72 e 101 meses.....	133
Tabela 21 - Valores médios do diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por tratamento de fertilização.....	134
Tabela 22 - Valores médios do diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por classe de área basal.....	135
Tabela 23 - Valores médios do diâmetro tangencial (μm), % de área e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos do lenho das árvores de eucalipto, nas idades de 24, 48, 72 e 101 meses	139
Tabela 24 - Análise de regressão múltipla entre a densidade aparente média ($D_{\text{méd}}$: variável dependente) e as características anatômicas (variáveis independentes) do lenho das árvores de eucalipto com base nos valores médios das cinco posições radiais	140
Tabela 25 - Valores médios da resistência (f_{c0}) à compressão paralela às fibras e resistência (f_M) e rigidez (E_M) à flexão estática e valor característico da	

resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, nos três tratamentos de fertilização	146
Tabela 26 - Valores médios dos extrativos totais, lignina Klason residual, lignina Klason solúvel, lignina Klason total, holocelulose e teor de cinzas do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, nos três tratamentos de fertilização	149
Tabela 27 - Intensidade das linhas de emissão dos analitos de acordo com os tratamentos	151
Tabela 28 - Variação radial da intensidade das linhas de emissão média dos elementos de acordo com os tratamentos	155
Tabela 29 - Matriz de correlação entre as variáveis densidade aparente média, elementos químicos e características anatômicas das fibras do lenho das árvores de <i>Eucalyptus grandis</i> nos três tratamentos	157

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas podem ameaçar diretamente as plantações florestais nas regiões tropicais (ALLEN et al., 2009; CABRAL et al., 2011; REAY et al., 2012; URZEDO et al., 2013). Períodos longos de seca ou mudanças na frequência e intensidade das chuvas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2012) são exemplos de fenômenos decorrentes desse desequilíbrio global. Estas situações, resultantes das atividades humanas tais como a agricultura e uso de combustíveis fósseis (GROENIGEN; OSENBURG; HUNGATE, 2011; NOL; VERBURG; MOORS, 2011) tendem a se agravar futuramente, afetando diretamente todos os segmentos da cadeia produtiva de base florestal no Brasil que, no ano 2012, totalizou 5,10 milhões de hectares de área com plantações de *Eucalyptus*, com crescimento de 4,5% em relação ao ano anterior (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

Um agravante desse quadro é o fato de que a maioria dos povoamentos florestais implantados no país é, em geral, estabelecida em regiões de baixa fertilidade, pobres em potássio (K) e submetidas a longos períodos de déficit hídrico (GAVA, 1997; GONÇALVES et al., 2004b). A sustentabilidade do empreendimento fica comprometida ao passo que as plantas sujeitas ao déficit hídrico tendem a sofrer diversos distúrbios fisiológicos como a diminuição da turgescência, do conteúdo de água da célula (PEREIRA et al., 1986) do crescimento em extensão e limitação da formação de proteínas e carboidratos (LAWLOR; CORNIC, 2002), que comprometem o metabolismo e o pleno desenvolvimento do vegetal.

Entretanto, sabe-se que as árvores detêm vários mecanismos que reduzem a perda de água em situações de déficit hídrico como controle da abertura dos estômatos (ARNDT, 2008) ou ainda através da alteração das dimensões das células, adaptações na flexibilidade das paredes celulares ou por ajustes osmóticos (MORGAN, 1984). Um dos mecanismos é o uso de solutos (e.g. íons inorgânicos, especialmente o K^+) para minimizar os efeitos da escassez de água (TAIZ; ZEIGUER, 2004), conforme sugerido por Laclau (2001), Romero (2008), Almeida (2009), Laclau et al. (2009) e Almeida et al. (2010).

O potássio e o sódio (Na) são estruturalmente e quimicamente cátions monovalentes similares (MARSCHNER, 1995). Apesar da similaridade, há uma escassez de conhecimento sobre a influência destes minerais em espécies

florestais. Segundo Subbarao e Johansen (2002), muitas plantas superiores apresentam uma alta seletividade para a absorção de K^+ na presença de alta quantidade de Na^+ . Outros estudos, como o de Bernarz e Oosterhuis (1998, 1999), demonstram que o Na^+ e o K^+ compartilham algumas funções fisiológicas. Laclau et al. (2003) e Gonçalves et al. (2004b) observaram respostas ao Na^+ em ambientes pobres em potássio. Sette Junior (2010) obteve resultados satisfatórios para árvores que receberam aplicação de sódio, contudo o autor ressaltou a necessidade de novas pesquisas quanto à substituição total ou parcial do potássio pelo sódio.

Pesquisas direcionadas ao estudo do déficit hídrico e à resposta fisiológica das árvores de eucalipto são fundamentais para determinar o potencial produtivo da floresta, entender melhor as interações entre a disponibilidade de K^+ e Na^+ , o aumento da eficiência do uso da água e a resistência da floresta à seca (GONÇALVES; BENEDETTI, 2000; ALMEIDA, 2009) e para idealizar novos métodos de manejo silvicultural, como seleção de genótipos adaptados às mudanças climáticas globais, necessários para expansão das plantações florestais no país.

Além disso, a possibilidade de substituição parcial do potássio por sódio na fertilização de plantações florestais é de grande interesse científico e prático, pois as principais fontes de K apresentam Na em sua constituição (MARSCHNER, 1995). Diante disto, a aplicação de formas menos puras deste mineral representaria uma economia de energia no processo de purificação, refletindo nos preços dos fertilizantes potássicos.

No caso do Brasil, que é o terceiro consumidor mundial de K, em 2011 foram importadas 7,6 milhões de toneladas e produzidas apenas 400 mil, quantidade que abastece somente 9% do consumo nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2012). Por isso, segundo Marschner (1995), a substituição parcial do K pelo Na apresenta interesse prático e científico, com redução dos custos de implantação das florestas de eucalipto (e consequentemente da madeira), considerando que os fertilizantes são importados em sua maioria. Desta forma, é fundamental a determinação dos efeitos da aplicação do potássio e sódio no crescimento e na qualidade da madeira produzida pelas árvores de eucalipto em plantações florestais.

Além disso, é essencial avaliar a resposta das árvores à aplicação de fertilizantes minerais e às variáveis climáticas. Os dendrômetros permanentes para a medição do crescimento em diâmetro do tronco das árvores têm-se mostrado

eficientes, pelo baixo custo, alta precisão e avaliação do crescimento do tronco em intervalos de tempo reduzidos (MARIAUX, 1970; DREW; DOWNES, 2009; SETTE JUNIOR et al., 2010). Keeland e Sharitz (1993) acrescentam que a metodologia é segura e eficaz, garantindo a precisão nos valores obtidos ($< 0,25$ mm). Entretanto, as pesquisas se tornam escassas quanto ao uso de dendrômetros em eucalipto por um período de monitoramento maior que quatro anos.

A fertilização mineral induz maior crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*, segundo Mello (1968) e Donald e Schutz (1977), sem afetar a qualidade da madeira. Stape (1992), da mesma forma, constatou aumento de 118 e 81% em volume de madeira em árvores de *E. grandis* pela aplicação de NPK mais micronutrientes em comparação com as árvores controle e as fertilizadas de forma tradicional, respectivamente, em região de déficit hídrico e de baixa fertilidade. Entretanto, a literatura é escassa quanto à aplicação de sódio em solos e seu efeito nas árvores. Almeida (2009) e Sette Junior (2010) verificaram que a adubação com sódio em *Eucalyptus grandis* de três e quatro anos, respectivamente, apresentou efeito significativo, com árvores mais altas, com maiores diâmetros e produtividades em relação às árvores controle (sem fertilização).

Além disso, pesquisas que tratam da variação radial de nutrientes no lenho de árvores também são escassas (LACLAU et al., 2001; WAGNER et al., 2012). Colin-Belgrand et al. (1993) mostram que em várias espécies há uma sutil diminuição na concentração de nutrientes dos tecidos fisiologicamente ativos para os pouco ativos. Em eucalipto, as diferenças entre concentrações de nutrientes entre cerne e alburno indicam intensa translocação de elementos durante a formação do cerne, com destaque para o potássio e fósforo (BAMBER, 1976; TURNER; LAMBERT, 1983). Da mesma forma, Hingston, Turton e Dimmock (1979) e Laclau et al. (2001) observaram maiores concentrações de potássio no alburno do lenho de árvores do gênero *Eucalyptus*. Sette Junior et al. (2013) ressaltam a importância de estudos que tratam do efeito da fertilização mineral sobre a qualidade e as propriedades da madeira de eucaliptos, principalmente quanto à análise isolada de nutrientes.

Além das características químicas, Silveira (2000) resalta a importância das pesquisas referentes ao efeito da fertilização mineral nas propriedades anatômicas, físicas e mecânicas de árvores de eucalipto de elevada taxa de crescimento.

Diante disto, a caracterização do lenho de árvores constitui um trabalho difícil e que exige estudos e ferramentas específicas visto que a madeira é um material

orgânico, heterogêneo, anisotrópico e com composição complexa. Devido a isto, empresas florestais, centros de pesquisa e órgãos competentes vêm realizando esforços para constituir procedimentos e atividades padronizadas para estabelecer com segurança um controle sobre a qualidade da madeira. Nesta tentativa de padronização cita-se a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI), a qual auxilia o Programa Nacional de Qualidade da Madeira (PNQM) (REMADE, 2003).

O desenvolvimento de técnicas que viabilizem esta padronização contribuirá enormemente para a conquista de mercados estrangeiros e manutenção do mercado já atingido. O uso de métodos rápidos, precisos e que possam analisar um número grande de amostras é o que se deseja para caracterizar a madeira (NISGOSKI, 2005). Os avanços tecnológicos em estudos estruturais da madeira levaram ao desenvolvimento de técnicas para análises anatômicas e ao uso de tecnologias específicas para a área. Neste estudo, propõem-se utilizar algumas destas tecnologias para melhor caracterização da qualidade do lenho como densitometria de raios X, microscopia óptica e eletrônica, espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) e espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), sendo estas duas últimas ainda incipientes no Brasil, mas bem consolidadas no exterior. Atualmente, o uso do LIBS e do NIR representa a inovação na área de estudo da qualidade do lenho com inúmeras vantagens, visto que constituem análises rápidas, não exigem pré-tratamento das amostras e apresentam caráter não destrutivo. Aliados ao uso destas tecnologias serão utilizados os dados de leitura de dendrômetros instalados há seis anos na área experimental, sendo possível inferir sobre o incremento em diâmetro do tronco e a qualidade da madeira com oito anos após aplicação de potássio e sódio.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como *objetivo geral* avaliar o efeito da substituição do potássio pelo sódio no crescimento em diâmetro e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, visando orientar a fertilização mineral com potássio e sódio em plantações florestais sujeitas ao déficit hídrico.

Como *objetivos específicos* citam-se (i) a continuidade das avaliações da sazonalidade do incremento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto, realizadas desde 2006 na área experimental, através do uso de faixas dendrométricas; (ii) determinar a densidade do lenho pelos método gravimétrico, de densitometria de raios X e da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR); (iii) avaliar as características anatômicas, propriedades mecânicas e químicas no lenho pelos métodos convencionais e a variação radial dos nutrientes por meio da espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS); (iv) avaliar a influência das variáveis climáticas no incremento em diâmetro do tronco, densidade e características anatômicas do lenho das árvores; (v) determinar o efeito da idade das árvores nas características anatômicas e de densidade do lenho e (vi) discutir os resultados obtidos quanto à disponibilidade potássica e sódica decorrentes da fertilização como estudo base para futura expansão das plantações florestais para regiões do Brasil sujeitas ao déficit hídrico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resposta do eucalipto à adubação potássica

A capacidade de adaptação à diferentes condições edafoclimáticas e a versatilidade de utilização da madeira do *Eucalyptus*, contribuiu para que, em 2012 no Brasil, a área plantada com o gênero atingisse 5,1 milhões de hectares, representando um crescimento de 4,5% em relação ao ano anterior (ABRAF, 2013).

Para manter este crescimento e atender às demandas atuais, as plantações apresentam, cada vez mais, uma necessidade de expansão a novas áreas. Neste sentido, Silveira et al. (1995), Gava (1997) e Gonçalves et al. (2004a) ressaltam que as plantações de eucalipto no Brasil estabelecem-se, normalmente, em regiões de baixa fertilidade, pobres em nutrientes devido ao processo de intemperismo e submetidas a longos períodos de déficit hídrico.

Na intenção de reverter esta situação comum em regiões tropicais, a aplicação de fertilizantes minerais é uma prática indispensável para manter o balanço de nutrientes no sistema solo-planta e garantir a sustentabilidade da produtividade da floresta (MELLO, 1968; MELLO et al., 1970; BARROS et al., 1981; SILVA; POGGIANI; COELHO, 1983; BARROS; NOVAIS; NEVES, 1990; BARROS; NOVAIS 1996; SCATOLINI et al., 1996; VALERI et al., 1996; ROCHA, 2000; LACLAU et al., 2003; SANTANA et al., 2008; EPRON et al., 2012).

A literatura é vasta quanto ao efeito da fertilização com NPK nos processos fisiológicos em plantações de eucalipto. Contudo, estudos conduzidos no intuito de conhecer melhor o efeito de um único nutriente em espécies arbóreas, como o K, são escassos (RÖMHELD; KIRKBY, 2010). Apesar dos efeitos exatos não serem bem conhecidos, a importância do potássio para as plantas é clara; o íon K^+ é relatado na literatura como o único cátion monovalente essencial para as espécies arbóreas (SUBBARAO; CHAUHAN; JOHANSEN, 2000), onde apresenta alta mobilidade, não faz parte de nenhum composto orgânico e constitui um dos elementos mais absorvidos, tendo um nível de importância tão alto quanto o nitrogênio (MALAVOLTA, 1980). Cerca de 90% do íon K^+ está localizado no citoplasma das células, controlando os processos osmóticos (SUBBARAO; CHAUHAN; JOHANSEN, 2000) e, conseqüentemente, desempenhando um papel fundamental na manutenção da turgescência das células guarda e motoras

(CAKMAK, 2005). Além disso, segundo Wakeel et al. (2011) o íon K^+ está envolvido em vários processos, como ativação de enzimas, síntese de proteínas, fotossíntese e transporte de solutos pelo floema.

A resposta significativa do eucalipto à disponibilidade de potássio é relatada por alguns autores como Silveira et al. (1995), Herbert (1996), Gava et al. (1997), Faria et al. (2002), Gonçalves et al. (2008), Laclau et al. (2009), Almeida et al. (2010) e Wright et al. (2011). Por resposta significativa não se considera só o efeito do potássio sobre o crescimento e a produtividade, mas também seus efeitos gerais sobre, principalmente, a fertilidade do solo e a nutrição da planta (GAVA et al., 1997).

Valeri, Corradini e Aguiar (1991) e Stape e Benedetti (1997) discorrem sobre a resposta do *Eucalyptus* à aplicação de potássio e afirma que o gênero apresenta respostas positivas à fertilização e concluíram que há maior necessidade do elemento com o avanço do crescimento e da idade da plantação. Silveira e Malavolta (2000) em seus estudos obtiveram conclusões semelhantes quanto à eficiência no uso deste elemento pelas árvores e ressaltam a função do íon K^+ no controle do movimento dos estômatos, na eficiência do uso da água, na regulação osmótica e na ativação de diversas enzimas envolvidas na fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Ainda demonstrando a importância do potássio em plantações de eucalipto, Silveira et al. (1995, 1998) explicam que o potássio foi um dos nutrientes com deficiência mais frequente em florestas brasileiras, ressaltando ainda que a quantidade de K trocável é baixa geralmente em solos de regiões tropicais.

Gava (1997) em estudo sobre o efeito da adubação potássica em plantios de *Eucalyptus grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável, concluiu que o K^+ demonstrou ser um dos cátions de maior limitação à produtividade em condições de solo com concentração de K^+ igual a 14 ppm, sendo de extrema importância sua aplicação nas rotações sucessivas. Silveira (2000) discorre sobre as exigências nutricionais do *Eucalyptus* em relação ao potássio e mostra que 40% do elemento foi encontrado no lenho, seguido pelas folhas com 25%.

A adubação potássica em experimento conduzido com *Eucalyptus grandis* demonstrado por Faria et al. (2002) resultou em um aumento de 54% no volume e na matéria seca dos troncos das árvores em relação às árvores controle. Em

pesquisa sobre a dinâmica nutricional em *Eucalyptus* no Congo, Laclau et al. (2003) constataram que o potássio constitui um elemento móvel de extrema importância para o crescimento em diâmetro da floresta. Além disso, Laclau et al. (2009) verificaram uma estreita relação entre a taxa de crescimento e a taxa de acúmulo de deste nutriente na biomassa.

Neste sentido, Almeida et al. (2010) mostraram que a aplicação de KCl em plantações de *Eucalyptus grandis* aumentou em 130% a biomassa aérea das árvores, em relação às árvores que não receberam a fertilização. Atualmente, ressaltando a importância do estudo da fertilização potássica em plantações florestais de eucalipto, Battie-Laclau (2013) mostrou os efeitos consideráveis do potássio na fisiologia das árvores, no aumento da área foliar e no crescimento do *Eucalyptus grandis*.

3.2 Fertilização sódica em espécies arbóreas e a substituição do potássio pelo sódio

A função do sódio tem sido estudada, principalmente, devido ao aumento da salinidade causada por fatores antrópicos e pelas mudanças climáticas (RENGASAMY, 2010). Além disso, devido a grande extensão da área costeira do Brasil, a presença de gleissolos sálcos é uma realidade no país. Solos salinos contém uma ampla variedade de sais, porém o NaCl é o mais abundante (ZHANG; OLIVER; BUSSE, 2006). Laclau et al. (2003) estimam que no Brasil a área total de solos salinos ricos em NaCl ultrapasse quatro milhões de hectares, já que ocorre não só em áreas costeiras, mas também em regiões semi-áridas, áridas e sub-úmidas. A viabilização da expansão das áreas florestais para solos nestas condições exige estudos prévios quanto à tolerância e a capacidade de desenvolvimento adequado da espécie em um solo rico em sódio. Marschner (1995) discorre sobre quais características são determinantes para afirmar se a espécie tolera ou não esta condição, visto que as altas concentrações de sais no solo podem ser tóxicas para as plantas e dificultar a retirada de água do solo pelas raízes (MUNNS; TESTER, 2008).

Segundo Zhang, Oliver e Busse (2006), os efeitos prejudiciais da salinidade do solo, como a diminuição do crescimento das plantas, estão intimamente relacionados com as altas concentrações de Na^+ e a deficiência em K^+ . As altas

concentrações de sais no solo causam um estresse osmótico e iônico exercido pelas altas quantidades de Na^+ nas plantas, enquanto que o Cl^- também pode ser tóxico para algumas espécies arbóreas (KRONZUCKER; BRITTO, 2011).

Entretanto, as plantas desenvolveram vários mecanismos de adaptação ao estresse salino, como controle da captação de Na^+ pelas raízes, do transporte de Na^+ pelo xilema e capacidade de extrusão de Na^+ pelas raízes (ZHANG; OLIVER; BUSSE, 2006).

Apesar das pesquisas terem avançado, Kronzucker e Britto (2011) em uma revisão do assunto, afirmam que muitos aspectos sobre o papel do sódio em plantas ainda devem ser esclarecidos. Os autores ressaltam que até agora, pouco se conhece sobre o transporte de Na^+ , como as estratégias de sobrevivência à salinidade se desenvolvem e quais as funções exatas do íon nas plantas. Poucos autores estudaram o efeito isolado do Na^+ em plantas, destacando-se Leigh e Tomos (1983), Johnston, Grof e Brownell (1988), Blom-Zandstra, Vogelzang e Veen (1998), White (1999), Gorham (2006) e Nabil e Coudret (2008).

Munns e Tester (2008) destacam que a adaptação à salinidade pelas plantas pode, basicamente, seguir três caminhos como (i) tolerantes ao estresse osmótico, (ii) podem excluir o Na^+ ou o Cl^- ou (iii) tolerar o acúmulo de Na^+ ou Cl^- nos tecidos. Kronzucker e Britto (2011) explicam que, em situação onde as plantas foram fertilizadas com sódio, a função de regulação estomática por parte do sódio é clara, principalmente quando as concentrações de potássio são baixas. Além disso, os autores observaram que, em áreas com estresse hídrico e com solo que apresentavam baixos teores de N, P e K, a presença do sódio foi benéfica para o crescimento das árvores.

Pesquisas no intuito de conhecer melhor a tolerância do gênero *Eucalyptus* têm sido feitas. Marcar (1993, 2002) conduziu este tipo de estudo na Austrália e comprovou a tolerância do *Eucalyptus camaldulensis* à salinidade. No Brasil, estudos recentes de Almeida et al. (2010) e Sette Junior (2010) avaliando a fertilização sódica em *Eucalyptus grandis* ao longo de quatro anos, concluíram que a fertilização com sódio foi satisfatória, com valores de incremento em diâmetro do tronco e biomassa superiores às árvores controle e menores, porém com valores próximos, às árvores que receberam fertilização potássica. Este resultado sugere que o *Eucalyptus grandis* foi tolerante aos níveis de sódio o qual foi sujeito, sendo

eficiente na utilização do nutriente na produção de biomassa, se desenvolvendo normalmente.

Subbarao, Chauhan e Johansen (2000) afirmam que o equilíbrio osmótico não é uma função específica do potássio, o qual pode ser substituído por outros cátions como o íon Na^+ . Marschner (1995), em estudo sobre os efeitos do sódio, distinguiu quatro comportamentos distintos em plantas de acordo com a resposta da aplicação de sódio no crescimento. Taiz e Zeiger (2009) explicam quais as funções metabólicas que necessitam da presença do sódio (como expansão celular) para ocorrem normalmente.

Almeida (2009) aponta que o sódio assume funções semelhantes ao potássio no metabolismo vegetal, sendo ambos elementos alcalinos. Porém, o autor também ressalta que o efeito da fertilização sódica em espécies arbóreas é muito pouco conhecido. Neste sentido, Marschner (1995), Sette Junior (2010) e Gattward et al. (2012) citam a possibilidade de, em termos fisiológicos, o sódio substituir o potássio total ou parcialmente, visto que o sódio constitui um soluto osmoticamente ativo nos vegetais. Na tentativa de conhecer melhor as respostas quanto à possibilidade de substituição, Almeida et al. (2010), em estudo pioneiro no Brasil, explicam que as árvores de *Eucalyptus grandis* que receberam o tratamento “potássio+sódio” apresentaram resultados satisfatórios quanto ao crescimento em diâmetro do tronco.

A substituição total ou parcial seria de grande interesse no caso do Brasil, uma vez que o país é o terceiro consumidor mundial do nutriente. Em 2011 foram importados 7,6 milhões de toneladas (o que representa um aumento de 27% em relação ao ano passado) e produzidos apenas 400 mil toneladas, quantidade que abastece apenas 9% do consumo nacional (IBRAM, 2012). Isso representa para o país um gasto de US\$ 3,4 bilhões sendo que, a diminuição da dependência de fertilizantes importados reduziria os custos de implantação das florestas de eucalipto e, consequentemente, os custos finais da madeira.

3.3 Efeito da aplicação de fertilizantes minerais e da taxa de crescimento nas propriedades do lenho de eucalipto

O efeito da aplicação de fertilizantes minerais e da taxa de crescimento e nas propriedades do lenho é um assunto controverso e difuso; muitos autores afirmam terem verificado correlações significativas entre a densidade do lenho e a taxa de

crescimento das árvores, entretanto, outros autores disseram não terem observado correlação.

A maioria da literatura nesta área tem por objetivo mostrar o efeito de vários fertilizantes, como o NPK, na qualidade da madeira, sendo escassos os trabalhos que investigaram a ação de um único elemento sobre as propriedades físicas, anatômicas e mecânicas.

Quanto ao efeito da aplicação de fertilizantes minerais e seus efeitos sobre a química da madeira, a literatura é muito reduzida, podendo-se citar Siddiqui (1972) que estudou a influência da fertilização na ultraestrutura da parede celular e na composição química da madeira. Da mesma forma, Jian Ju et al. (1998), Silva et al. (2005) e Arantes et al. (2011) investigaram os efeitos da fertilização nas propriedades químicas do lenho no gênero *Eucalyptus*.

A importância de existir estudos neste assunto é descrito por Barrichelo e Shimoyama (1994) para árvores do gênero *Eucalyptus*. Os autores explicam que a atividade do câmbio, a qual é responsável pela formação da madeira, é controlada pela produção de hormônios nas gemas apicais e pela presença dos carboidratos produzidos nas folhas. Com isso, deficiências nutricionais, como a de potássio, que reduzem a biomassa aérea, acarretam na diminuição da produtividade fotossintética, o que acaba por comprometer a geração de suprimentos necessários para atividade cambial acontecer.

Larson (1967), Jacob e Balloni (1978) e Andrade et al. (1994) afirmam que a quantidade, o período do ano e o tipo de fertilizante podem causar alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus* a ser obtida. Kikuti e Namikawa (1990) e Raymond e Muneri (2000) afirmam que, em estudo com *Eucalyptus saligna*, não houve mudanças nas propriedades da madeira causadas pela fertilização. Bamber e Curtin (1974) também não observaram relação entre a taxa de crescimento e os parâmetros anatômicos do lenho em árvores de *Eucalyptus pilularis*.

Tais mudanças não são caracterizadas como prejuízos da qualidade, porém pode tornar o uso de determinada madeira mais adequada para um determinado fim, em detrimento de outro. Da mesma forma, Lima (2005) afirma que os aumentos significativos do incremento das árvores que receberam fertilizantes, não implicam necessariamente em mudanças das propriedades da madeira. É claro que o estudo do efeito da fertilização sobre a qualidade da madeira deve sempre levar em consideração outros fatores como clima e fertilidade do solo.

Larson (1969) observou que a fertilização em árvores jovens pode atrasar a transição da madeira juvenil para adulta, tendo como consequência a diminuição da densidade básica. Entretanto, Garcia (1998) verificou que os maiores valores de densidade básica eram obtidos de árvores que apresentaram maior produtividade devido à fertilização. Neste sentido, Vital (1990) cita muitos trabalhos que tiveram resultados conflitantes quanto à relação densidade básica e fertilização, mencionando autores que observaram o aumento, a redução ou nenhuma alteração da densidade ocasionada pela adubação. Ainda em relação à densidade básica, Hills (1968) e Wilkes (1988) demonstraram que esta propriedade do lenho não foi influenciada pela taxa de crescimento. Migliorini et al. (1988) em estudo conduzido em florestas de *Eucalyptus grandis* de sete anos, constataram que a densidade básica do lenho foi inversamente proporcional ao ritmo de crescimento das árvores.

Quanto a características anatômicas da madeira, Wilkes e Abbott (1983) afirmam que a frequência dos vasos foi maior em árvores de menor crescimento e a porcentagem de área ocupada e o diâmetro dos vasos foi maior no lenho das árvores de maior crescimento. De acordo com Mello (1968), a densidade básica, a espessura e o comprimento das fibras em árvores de *Eucalyptus saligna* não sofreram efeito da aplicação de NPK. Porém, o uso de calcário ocasionou a redução significativa do comprimento das fibras, conforme observado também por Andrade et al. (1994). Jian Ju, Wenbin e Xiuzhen (1995) relatam que a fertilização não mostrou influenciar o comprimento das fibras de *Eucalyptus urophylla* de nove anos, porém a fertilização influenciou a largura das fibras. As dimensões de fibras e vasos de *Eucalyptus grandis* de 24 e 48 meses foram significativamente afetadas pela fertilização potássica e sódica, conforme demonstrado por Sette Junior et al. (2009, 2010). Neste sentido, Zobel (1992) explica que a fertilização pode provocar alterações na constituição química da parede celular, o que acaba por influenciar as outras propriedades da madeira.

Quanto às propriedades mecânicas, Harris (1981), Berger (2000), Haselein et al. (2002), Sette Junior (2010) e Lima e Garcia (2011) afirmam que a fertilização reflete na resistência da madeira, a qual pode apresentar maiores valores de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE). Entretanto, em relação às propriedades mecânicas, a literatura é, mais uma vez, controversa, havendo trabalhos que relatam aumento significativo desta propriedade devido à fertilização e outros que não observaram efeito estatisticamente significativo da fertilização

(VITAL, 1990; WILKINS; KITAHARA, 1991; ANDRADE et al., 1994; SETTE JUNIOR, 2007, 2010; GAVA; GONÇALVES, 2008; LIMA; GARCIA, 2011). Gonçalves et al. (2004b) explicam que muitas vezes, fatores climáticos ou externos podem acarretar maiores efeitos nas características mecânicas da madeira do que os tratamentos silviculturais.

Pesquisas que avaliaram o efeito do potássio e do sódio na qualidade da madeira tiveram, de maneira geral, resultados satisfatórios; Dunisch, Bauch e Muller (1998) concluíram que o potássio foi fundamental para alongação e diferenciação dos traqueídeos de *Picea abies*. Em resultado semelhante, Silveira (2000) verificou que a fertilização com K acarretou um aumento significativo no comprimento e na largura das fibras de quatro progênies de *Eucalyptus grandis*. Sette Junior (2007) em estudo para avaliar o efeito da aplicação de K, K+Na e Na em árvores de *Eucalyptus grandis* com 24 meses de idade, observou alterações significativas na anatomia do lenho; houve aumento da largura, diâmetro do lume e comprimento das fibras e aumento do diâmetro tangencial e da área ocupada e redução da frequência dos vasos.

Ainda neste experimento, após dois anos, Sette Junior (2010) observou resultados semelhantes quanto à anatomia do lenho, onde a fertilização sódica e potássica proporcionaram diferenças significativas na dimensão e frequência dos vasos de *Eucalyptus grandis*. Neste sentido, Fromm (2010) verificou que a baixa concentração de K ocasionou a diminuição dos elementos de vaso. Tomazello Filho (2006) concluiu que a fertilização induziu o aumento do comprimento das fibras, porém não foi observada diferenças significativas nas dimensões dos vasos do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* submetidas a tratamentos de fertilização e irrigação.

3.4 Conceito de estresse hídrico e seu efeito sobre as plantas

O principal recurso que determina o padrão de distribuição das plantas no planeta é a água. A água tem um papel determinante no metabolismo e na constituição dos solutos envolvidos nas reações de síntese de compostos. Mais de 70% de cada célula das plantas é constituído por água, o que exerce pressão nas paredes, conferindo-lhe volume devido à turgescência. Além disso, a água funciona como meio de difusão e translocação de minerais e gases nas plantas (KRAMER;

BOYER, 1995; SANTOS; CARLESSO, 1998). A literatura descreve quais grandezas traduzem, fisiologicamente, o estado hídrico da planta, o qual depende basicamente das condições climáticas e da disponibilidade de água no solo. Da mesma forma, estudos na área de fisiologia de plantas trazem a relação entre a eficiência de uso da água, biomassa produzida e a água utilizada, para o cálculo da tolerância à seca (HUBBARD et al., 2010). A eficiência de uso da água também serve para medir a capacidade que um dado genótipo ou espécie tem em lidar com o estresse hídrico.

Neste sentido, há dificuldade em conceituar o termo estresse hídrico, por se tratar de um tipo de estresse multidimensional que pode acontecer devido a muitos fatores como seca, choque térmico ou osmótico, excesso de luminosidade ou de salinidade (BLUM, 1996). Normalmente, observa-se em trabalhos que envolvam o estudo do déficit hídrico, a criação de gradientes ou níveis hídricos definidos quantitativamente. Tardieu (2005), na tentativa de conceituar déficit hídrico para plantações florestais, define o termo como condição determinada pelo clima onde há desequilíbrio entre o potencial hídrico do solo e demanda pela água.

Conforme descrito e, visto que o termo déficit hídrico pode ser causado por diversos fatores levando, conseqüentemente, a diversos tipos de respostas pela planta, Hopkins e Hüner (2009) na tentativa de melhor conceituar o termo, definem que um déficit hídrico é chamado de estresse hídrico quando algum tipo de alteração observada não é reversível. Entretanto, muitos autores não adotam essa diferença entre déficit e estresse hídrico, encarando estes termos como sinônimos, justificando que o grau de recuperação à seca é de difícil determinação em muitos casos e dependente da resistência específica de cada planta à seca.

Em curto prazo, as plantas afetadas pelo déficit hídrico apresentam mudanças na condutância estomática, por ser um processo muito sensível à diminuição de água. Lima, Jarvis e Rhizopoulou (2003) descrevem como acontece o declínio da condutância estomática em *Eucalyptus* devido à diminuição da quantidade de água disponível no solo. Já em médio prazo, há alterações nos ajustamentos osmóticos operados por meio da acumulação de solutos, como o potássio, pelas células (TAIZ; ZEIGER, 2009). As folhas são capazes de ajustamentos osmóticos para manter a turgidez em eventuais potenciais hídricos mais baixos, o que permite a planta a continuar o crescimento e sustentar a abertura estomática por mais tempo. Neste sentido, Battie-Laclau (2013) demonstra a efetiva capacidade do *Eucalyptus grandis*

em controlar a perda de água ao meio-dia, fechando os estômatos no exato período onde a demanda por evaporação é maior.

Por fim, a longo prazo, as plantas afetadas pelo déficit hídrico reduzem a taxa de crescimento e a área foliar, aumentam a biomassa das raízes e alteram a estrutura do xilema a fim de evitar a cavitação (CARTER; WHITE, 2009; BATTIE-LACLAU, 2013). Essa redução da taxa de crescimento (ou da atividade do câmbio) é consequência da queda da produtividade fotossintética, que é a principal fonte de energia para a produção de xilema secundário (madeira).

3.4.1 Interação entre os efeitos do potássio e o estresse hídrico

Estudos que investigaram as interações entre os efeitos do potássio e o estresse hídrico sobre as funções fisiológicas no nível de povoamentos florestais são escassos. Almeida et al. (2010) relatam que as funções do potássio estão diretamente relacionadas ao balanço hídrico nas árvores, o qual pode aumentar a eficiência no uso da água em situação de estresse hídrico. Neste sentido, esta afirmação permite inferir que a presença do potássio aumenta a resistência das árvores à seca. White, Turner e Galbraith (2000) e Battie-Laclau (2013) descrevem que o potássio, pela redução do potencial osmótico e aumento do potencial hídrico da turgescência, permite manter o potencial hídrico na planta. Além disso, Sen Gupta e Berkowitz (1987) explicam que o potássio permite que a espessura das paredes celulares e dos vasos seja mantida, evitando problemas como cavitação. Contudo, por se tratar de um assunto pouco estudado e ainda controverso, autores como Basile et al. (2003) e Benlloch-González et al. (2008) relatam que as plantas fertilizadas com potássio não apresentaram efeitos satisfatórios diante do estresse hídrico.

Em situação de estresse hídrico, o aumento na eficiência do uso da água obtido pelo funcionamento adequado dos estômatos é controlado pelo potássio, onde a abertura e o fechamento estomático é otimizado para suportar a situação adversa. Associado a isto, alguns autores como Coker, Oosterhuis e Brown (2002) afirmam que uma das funções mais importantes do potássio é aperfeiçoar as relações fonte-dreno nas árvores submetidas ao déficit hídrico através do transporte dos compostos resultantes da fotossíntese. Segundo Wu e Cosgrove (2000), quando as plantas são submetidas a um baixo potencial hídrico, o crescimento das folhas e

tronco diminuem, porém as raízes podem continuar o crescimento na intenção de buscar água a partir do solo, constituindo uma estratégia adaptativa para lidar com a seca. Neste sentido, Almeida (2009), Sette Junior (2010) e Battie-Laclau (2013) observaram que a fertilização com potássio, aumentou a produção de biomassa, como folhas, ramos e raízes de árvores submetidas ao déficit hídrico. Diante do exposto, pode-se inferir que o potássio está envolvido nas estratégias desenvolvidas pelas plantas para o controle do déficit hídrico, o que por sua vez, reafirma a importância deste tipo de estudo.

3.4.2 Mudanças climáticas e efeitos do estresse hídrico nas florestas

O último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas divulgado em 2012 confirma que as mudanças climáticas são resultado, principalmente, da emissão de gases do efeito estufa (GHG), como o gás carbônico (CO₂), gerado por atividades humanas como agricultura e uso de combustíveis fósseis (GROENIGEN; OSENBURG; HUNGATE, 2011; NOL; VERBURG; MOORS, 2011; URZEDO et al., 2013). Períodos longos de seca, mudanças na frequência e intensidade das chuvas e elevação das temperaturas médias são fenômenos descritos como decorrentes desse desequilíbrio global. Estas mudanças tendem a ameaçar diretamente as plantações florestais, principalmente nas regiões tropicais onde as mudanças podem ocorrer de maneira acentuada (IPCC, 2007, 2012; ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2011; REAY et al., 2012).

O relatório descreve que a temperatura global aumentou, em média, 0,85 °C entre 1880 e 2012. Associado a isto, a temperatura da água dos mares aumentou e as áreas com gelo e neve diminuíram. Os oceanos têm acumulado grande parte deste aquecimento e têm se tornado mais ácidos pela contínua absorção de gás carbônico, o que prejudica, de maneira geral, toda a fauna marinha. As mudanças estão afetando, também, os padrões dos ventos, o que reflete no regime de chuvas e nas correntes marinhas, aumentando a probabilidade de ocorrer enchentes ou secas. Entretanto, as manifestações e os efeitos das mudanças climáticas não são uniformes sobre o mundo. O relatório diz ainda que, mesmo se as emissões de GHG cessassem imediatamente, os efeitos das mudanças perdurariam por muito tempo ainda devido à lentidão de algumas reações e aos efeitos cumulativos. O relatório

conclui que a forma com que o problema vai evoluir ao longo do século XXI depende muito dos hábitos da sociedade nos próximos anos.

Estudos no intuito de quantificar tais mudanças climáticas são cada vez mais frequentes e necessários. Urzedo et al. (2013) mostram que o uso de práticas silviculturais adequadas são essenciais para minimizar a emissão de gases como óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) gerados pelo uso de fertilizantes minerais ou orgânicos. Apesar destes gases serem emitidos em menores quantidades que o gás carbônico, estes são 298 e 25 vezes mais potentes em causar o efeito estufa, respectivamente.

No Brasil, um agravante desse quadro é o fato de que, os povoamentos florestais implantados são, em geral, estabelecidos em regiões de baixa fertilidade e submetidos a longos períodos de déficit hídrico (GAVA, 1997; GONÇALVES et al., 2004a). Neste sentido, o desafio atual das pesquisas é mostrar como estas variações climáticas afetam a fisiologia das árvores e como controlar ou compensar essas variações. Por isso, caracterizar as mudanças observadas em florestas sujeitas ao estresse hídrico pode ser o primeiro passo para a seleção de genótipos, orientar novas práticas silviculturais e propor estratégias que tornem a produção de madeira economicamente viável em áreas sujeitas a esta condição.

Seguindo os trabalhos propostos por Weltzin, Loik e Schwinning (2003), e mais recentemente por Battie-Laclau (2013), estratégias como observação em longo prazo, caracterização do clima e testes de novas práticas silviculturais são formas de manipular a floresta e obter produções satisfatórias, mesmo em situação de reduzidas precipitações. Um exemplo claro é dado por Battie-Laclau (2013) em cuidadoso estudo conduzido com *E. grandis* em uma área com exclusão artificial de chuva, a qual permite isolar o efeito do estresse hídrico sobre o funcionamento das árvores.

Sob condições de estresse hídrico, diminuição da taxa de crescimento e do acúmulo de biomassa e até mortalidade das árvores são os resultados mais relatados na literatura (ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2010). Contudo, além da tolerância ao estresse hídrico já observada para árvores do gênero *Eucalyptus*, as plantas são capazes de desenvolver mecanismos de adaptação à seca como crescimento do sistema radicular, aumento da área foliar e rápido controle de abertura e fechamento dos estômatos (LACLAU et al., 2005; ALMEIDA, 2009; ALMEIDA et al., 2010; SETTE JUNIOR, 2010; BATTIE-LACLAU, 2013). Stape, Ryan

e Binkley (2004) explicam que todas estas adaptações visam a melhor eficiência do uso da água, a fim de minimizar os efeitos da falta de água no metabolismo da planta.

Diante de todo exposto, e considerando o papel do potássio e do sódio no controle da condutância estomática, estudos de fertilização visando à expansão de plantações em áreas sujeitas ao estresse hídrico são essenciais para adequada continuação da cadeia produtiva de base florestal.

3.4.3 Estratégias desenvolvidas pelas plantas durante o déficit hídrico

Várias estratégias foram desenvolvidas pelas plantas para sobreviver ao déficit hídrico, o qual pode variar em frequência, periodicidade, intensidade e duração. A literatura lista duas principais estratégias, existindo (i) plantas capazes de escapar ao déficit hídrico, chamadas de *drought escapers* e (ii) plantas capazes de suportar a condição de déficit hídrico, através de mecanismos de resistência, evitação ou tolerância (*drought resistant*s, *drought tolerant*s e *drought avoiders*) (TARDIEU, 2005).

As plantas capazes de escapar ao déficit hídrico são aquelas que regulam a fenologia das folhas através de um ciclo mais curto ou dormência para que o tempo de crescimento (sensível à seca) e o período de déficit hídrico coincidam o mínimo possível (SPERRY et al., 2002; TARDIEU, 2005).

As plantas resistentes à seca são aquelas que vivem em condições climáticas extremas, como as xerófitas. As plantas tolerantes suportam os períodos de seca mantendo a turgescência das células através da acumulação de solutos ou por redução do tamanho das células. Além disso, são capazes de manter o funcionamento do metabolismo e os estômatos abertos, através da melhor eficiência do uso da água, permitindo a planta a suportar longos períodos de estresse hídrico, sem que haja comprometimento da integridade física da planta (SPERRY et al., 2002).

As plantas capazes de evitar os períodos de seca são aquelas capazes de manter elevado o potencial de hidratação dos tecidos através do aumento da biomassa radicular, diminuição da área foliar, senescência precoce, fechamento estomático, cutícula reforçada, aumento da resistência à cavitação e diminuição da taxa de crescimento em diâmetro do tronco. Contudo, essa capacidade de evitar é

curta, já que o fechamento dos estômatos limita a fotossíntese e a transpiração (SPERRY et al., 2002; TARDIEU, 2005; BATTIE-LACLAU, 2013).

As plantas capazes de tolerar os períodos de seca, ao contrário, suportam a condição climática com um nível baixo de hidratação dos tecidos, através do aumento da tolerância à desidratação mantendo a turgescência celular. Além disso, são capazes de manter os estômatos abertos, com melhor eficiência no uso da água, onde o balanço de carbono permanece positivo, o que por sua vez diminui as chances de esgotar os fotoassimilados e a ocorrência de cavitação (SPERRY et al., 2002; TARDIEU, 2005; BATTIE-LACLAU, 2013).

Após o período de déficit hídrico, as plantas demonstram uma recuperação lenta a moderada do crescimento, logo após um período inicial de inibição. Por isso, plantas que vivem em constante situação de estresse apresentam baixo crescimento, tamanho e senescência foliar diferenciada, além de reduzir a produção de órgãos de vida curta, como flores e frutos, para economizar energia e manter ativas as funções vitais e, claro, suportar o estresse. Blake e Tschaplinski (1992) e Battie-Laclau (2013) demonstram que o *Eucalyptus grandis* tem especial capacidade de minimizar o efeito do déficit por falta de água. Os autores observaram que a espécie prontamente responde à falta de água, reduzindo a condutância estomática, a área foliar e a transpiração e aumentando a eficiência de uso da água, mantendo (mesmo que de forma reduzida) o crescimento em períodos de déficit hídrico.

3.4.4 Qualidade do lenho de eucalipto submetido ao estresse hídrico

O câmbio é definido como o meristema lateral que forma o xilema e o floema secundário. Aliado ao felogênio, o câmbio promove o crescimento em espessura do tronco. O meristema lateral é formado por uma simples camada de células iniciais, divididas em fusiformes e células iniciais radiais, as quais sofrem divisões periclinais e anticlinais (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2010). O principal constituinte destas células é a água, sendo que nas células que compõem o lenho das árvores a mesma encontra-se nas paredes celulares, no conteúdo protoplasmático das células e como água livre nas cavidades e espaços intercelulares. O fato da água estar presente em tantos elementos da anatomia da madeira faz com que as árvores apresentem diferentes respostas quando o lenho é submetido ao déficit hídrico. Drew et al. (2008, 2009) explicam que mudanças nas condições climáticas, como

períodos de seca ou inundação, podem alterar o desempenho fisiológico das árvores, refletindo em alterações irreversíveis na estrutura do lenho. Fatores abióticos como clima, altitude, latitude, constituição do solo, estágio sucessional da vegetação e até mesmo poluição (CHAGAS, 2013), podem alterar de forma significativa a anatomia da madeira.

O comprimento e a espessura das fibras e a área, diâmetro e frequência dos vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) são os elementos mais citados na literatura como suscetíveis às mudanças na disponibilidade hídrica (BAAS, 1973; BAAS; WERKER; FAHN, 1983; BARAJAS-MORALES, 1985; CARLQUIST; HOEKMAN, 1985; BASS; SCHWEINGRUBER, 1987; LINDORF, 1994; TREVIZOR, 2011).

Trevizor (2011) e Santini Junior (2013) estudando a estrutura anatômica de espécies amazônicas explicam que os elementos de vaso têm por função conduzir a água e nutrientes por toda a água, sendo que a diminuição da água disponível no solo afeta diretamente este sistema de condução. Ainda segundo Schuldt et al. (2011), a baixa pluviosidade pode comprometer a condutividade hídrica no alburno, acarretando uma menor produtividade final.

Sette Junior (2010) observou que árvores de *Eucalyptus grandis* sujeitas a períodos de déficit hídrico e fertilizadas com K apresentaram vasos em menor quantidade e maiores e paredes de fibras mais espessas em relação às árvores controle, sugerindo que estas mudanças na anatomia constituem estratégias para melhorar a eficiência no uso da água. Panshin e De Zeeuw (1970) explicam que o espessamento da parede celular ocorre devido à deposição de carboidratos, principalmente quando há diminuição do crescimento da árvore.

Da mesma forma, observa-se que árvores que crescem em áreas em situação contrária, ou seja, com alta pluviosidade, apresentam as paredes das fibras mais finas e vasos em maior número e menor diâmetro (SANTINI JUNIOR, 2013).

Oliveira et al. (2010) estudaram o comportamento de um híbrido de *Eucalyptus grandis* com cinco anos de idade, submetido à dois regimes de precipitação no estado do Espírito Santo, Brasil. Nas árvores provenientes da região com baixa precipitação, a densidade básica (g/cm^3) assumiu valores médios 7% maior em relação às árvores da área com maior pluviosidade. Drew et al. (2009) e Wimmer, Downes e Evans (2002) também observaram que a densidade e a espessura das paredes das fibras aumentaram em árvores sujeitas à limitação de água.

Gonçalez et al. (2009) em estudo conduzido para verificar a influência do clima e do sítio nas propriedades da madeira, observaram que a densidade, a retratibilidade e as propriedades mecânicas apresentaram maiores valores nas madeiras provenientes da região sujeita ao estresse hídrico em relação ao sítio com alto índice de pluviosidade. Schweingruber (1988) explica que, basicamente, as árvores formam anéis de crescimento segundo as variações do clima, o que tem por consequência variações intra-anuais de densidade; nos períodos favoráveis às plantas, onde os recursos hídricos não são limitados, a temperatura é maior e o fotoperíodo é longo, o lenho formado apresenta coloração mais clara, vasos maiores e menor densidade. Nos períodos definidos como desfavoráveis, onde os recursos são escassos, o lenho formado apresenta coloração mais escura, vasos menores e lenho mais denso (TROVATI; FERRAZ, 1984; TOMAZELLO FILHO, 1985b; TOMAZELLO FILHO et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2012; CALLADO et al., 2013).

3.5 Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto medido por dendrômetro e relação do crescimento com variáveis climáticas

Os dendrômetros permanentes para a medição do crescimento em diâmetro do tronco das árvores têm-se mostrado eficientes, pelo baixo custo, alta precisão e avaliação do crescimento do tronco em intervalos de tempo reduzidos (SETTE JUNIOR et al., 2010). Keeland e Sharitz (1993) acrescentam que a metodologia é segura e eficaz, garantindo a precisão nos valores obtidos ($< 0,25$ mm). Drew et al. (2009) publicaram uma revisão sobre o uso de faixas dendrométricas, confirmando sua precisão. Neste sentido, citam-se Dobbs (1969), LaPoint e Van Cleve (1971) e Pook e Hall (1976) como autores que descrevem terem alcançado uma precisão de até 0,005 mm nas mensurações com dendrômetros.

Muitos trabalhos envolvendo o uso de dendrômetros para determinação do ritmo e da taxa de crescimento das árvores em diferentes regiões já foram feitos conforme mostrado por Mariaux (1969, 1970), Dtienne et al. (1988), Dtienne (1989), Keeland e Sharitz (1993), Clark, Wynne e Schmoldt (2000), Botosso e Tomazello Filho (2001), Deslauriers et al. (2003), Laclau et al. (2003), Felker e Leon (2005), Deslauriers et al. (2007), Drew e Downes (2009), Sette Junior et al. (2010), Carvalho e Felfili (2011) e Zweifel et al. (2014).

Entretanto, estudos que avaliaram o uso de faixas dendrométricas em plantações do gênero *Eucalyptus* são escassos. Destaca-se o trabalho desenvolvido por Valenziano e Scaramuzzi (1967), os quais durante um ano e sete meses acompanharam o crescimento do tronco de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus viminalis* de nove anos em região temperada. Os mesmos constataram que durante o outono/inverno as baixas temperaturas ocasionaram a parada da atividade cambial e durante a primavera/verão a atividade do câmbio foi retomada. Apesar dos períodos distintos de crescimento observado, os autores não verificaram relação entre a precipitação e a periodicidade do crescimento em diâmetro do tronco. Green (1969), Marien e Thibout (1980) e Poole (1986) acompanharam por seis meses, dois e três anos, respectivamente, o crescimento de árvores de eucalipto. Ambos os autores verificaram que o déficit hídrico provocado por um período sem chuvas ocasionou a queda da taxa de crescimento em diâmetro do tronco, visto que a reduzida absorção de água pelas raízes limitou a atividade cambial.

Pereira et al. (1989) monitoraram por dois anos o crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus globulus* de um ano de idade através de dendrômetros. Os tratamentos estudados foram controle, fertilização mineral, irrigação e irrigação+fertilização mineral, sendo as maiores taxas de crescimento em diâmetro do tronco observadas nas árvores que receberam irrigação+fertilização mineral. Além disso, os autores constataram que o estresse hídrico inibiu o crescimento em diâmetro.

O uso de dendrômetros pontuais para acompanhar o crescimento de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* irrigados foram estudados por Downes et al. (1999). Os autores explicam que a interação variáveis climáticas e crescimento cambial é complexa e age durante todo o ano e ressaltam a necessidade de entender esta interação ao nível da fisiologia de toda a árvore. Neste sentido, Wimmer, Downes e Evans (2002) acompanharam e descreveram de maneira detalhada o ciclo diário de incremento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus nitens*, durante três dias.

Laclau et al. (2005) e Sette Junior (2010) se destacam em estudo com dendrômetros em árvores de eucalipto por um período de monitoramento maior que três anos. Mais uma vez, os períodos de máximo crescimento ocorrem nas estações mais chuvosas e os períodos de mínimo crescimento nas estações mais secas.

Na tentativa de explicar com maior precisão as variações temporais dos incrementos, Zweifel et al. (2014) em estudo pioneiro relatam sobre as variações radiais do tronco de *Eucalyptus globulus* e sua relação com a disponibilidade hídrica para as árvores. Os resultados mostraram que a elasticidade elevada específica do tecido do xilema agiu como a principal origem das mudanças radiais do tronco das árvores estudadas, sugerindo que a casca pode funcionar como uma camada passiva às flutuações do xilema.

3.6 Propriedades do lenho de eucalipto

3.6.1 Densidade básica e aparente

A densidade é, sem dúvida, uma das mais importantes propriedades do lenho, pois resulta da integração das propriedades físico-químicas e das características anatômicas do lenho. Além disso, Gérard et al. (1995) afirmam que a densidade está relacionada com a trabalhabilidade, retratibilidade, secagem, impregnabilidade e com as características mecânicas da madeira. Neste sentido, é possível inferir que a densidade é capaz de fornecer informações sobre outras características do lenho (JORGE; PEREIRA, 1998), sendo muitas vezes utilizada como parâmetro de qualidade, uma vez que é necessária sua determinação para correta utilização de qualquer madeira.

Sabe-se que o crescimento das árvores é influenciado pelos meios biótico e abiótico e, por isso, a densidade do lenho pode variar entre gêneros, espécies do mesmo gênero, entre árvores de uma mesma espécie e até mesmo dentro de diferentes partes de uma mesma árvore, na direção base-topo e medula-casca (BODIG; JAYNE, 1982; SILVA et al., 2004; SETTE JUNIOR et al., 2012). Os principais fatores que influenciam a densidade do lenho, segundo Kollmann e Cotê (1968) e Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005) são o genótipo, índice de sítio, condições climáticas, localização geográfica, tratamentos silviculturais e, principalmente, a idade das árvores.

Na tentativa de explicar esta variação da densidade básica dentro de uma mesma árvore, Panshin e De Zeeuw (1980) apresentam uma síntese dos padrões observados na variação longitudinal, sendo (i) a densidade decresce uniformemente na direção base-topo, (ii) a densidade decresce até o meio do tronco e, então, passa

a crescer até o topo da árvore e, por fim, (iii) a densidade decresce da base para o topo, não apresentando uniformidade na variação. Normalmente, para árvores do gênero *Eucalyptus*, observa-se o segundo padrão descrito, ou seja, a densidade decresce até o diâmetro à altura do peito (DAP) e torna-se crescente a partir daí, podendo ou não decrescer na região próxima ao topo (BARRICHELO; BRITO; MIGLIORINI, 1983).

Este padrão de variação do eucalipto também foi verificado por Alzate (2004), Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Tomazello Filho (2006), Sette Junior (2007, 2010), Sette Junior et al. (2012) e Trevisan et al. (2012), onde os valores para densidade básica média estão entre 0,40 e 0,46g/cm³. Essa variação longitudinal, característica das árvores do gênero *Eucalyptus*, permite que as árvores tenham finalidades variadas; contudo, árvores que apresentam alta homogeneidade na direção medula-casca tendem a demonstrar excelentes propriedades tecnológicas, como ausência de defeitos de secagem, baixa variação dimensional e alto rendimento no desdobro.

Quanto à variação radial, há uma tendência clara de aumento na direção medula-casca, conforme descrito por Tomazello Filho, (1985a), Tomazello Filho (1985b), Carmo (1996), Lima, Breese e Cahalan (2000) e Sette Junior (2010). Brasil, Veiga e Mello (1979) descrevem que os valores de densidade básica de *E. grandis*, observados na direção transversal do tronco, foram de 0,42 g/cm³ para a região próxima à medula e intermediária e 0,46 g/cm³ para a região mais próxima à casca.

Para análise da variação radial da densidade aparente do lenho com precisão de 0,04 mm, o uso do equipamento de densitometria de raios X é fundamental, consistindo em uma análise não destrutiva e direta da qualidade do lenho. Oliveira et al. (2012) descrevem uma sequência de variação da densidade aparente para o lenho de *Eucalyptus grandis* de seis anos, onde (i) a densidade aumenta na direção medula-casca, em seguida, na posição correspondente a 50% do raio, (ii) tem-se madeira juvenil (interna, mais próxima da medula) e madeira adulta (externa, próxima à casca) e por fim, (iii) presença de variações intra e inter anuais de densidade. A variação do item (iii) pode ocorrer devido à presença de zonas fibrosas de coloração escura, onde as fibras têm parede celular espessa e os vasos são em menor diâmetro, área e frequência (vasos/mm²), intercaladas pelas zonas fibrosas de coloração mais clara, com fibras de parede mais delgada, maior porcentagem de parênquima e vasos de maior diâmetro e frequência.

Silva et al. (2004) estudando a variabilidade da densidade aparente de *Eucalyptus grandis* em diferentes idades e posições radiais por densitometria de raios X, verificaram uma tendência de aumento da densidade aparente em função da idade e da variação radial. A densidade mínima encontrada foi de 0,46 g/cm³ e a máxima foi de 0,63 g/cm³. Em estudo conduzido com árvores de *Eucalyptus grandis* para determinação da densidade aparente média, Alzate (2004), Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Tomazello Filho (2006) e Oliveira et al. (2012) encontraram valores iguais a 0,46, 0,65, 0,46 e 0,58 g/cm³, respectivamente, sendo que em todos os trabalhos foi verificado aumento da densidade na direção medula-casca.

3.6.2 Características anatômicas

A estrutura da anatomia da madeira é caracterizada pelo arranjo e quantidade proporcional de diferentes tipos de células dos elementos fibras, vasos, traqueídeos, raios e parênquima axial (MARCATI, 1992). O conhecimento do arranjo destes elementos, em conjunto, permite não só a identificação das espécies, mas também a possibilidade de definir, com maior precisão, qual a utilização mais adequada para determinada madeira.

Assim como na densidade, numerosos fatores internos e externos à árvore podem acarretar variações no tipo, tamanho, forma, estrutura física e composição química destes elementos. A madeira do gênero *Eucalyptus* apresenta uma estrutura heterogênea, resultante das variações de seus elementos anatômicos (TOMAZELLO FILHO, 2006). Por isso, a determinação dos padrões de variação da anatomia do lenho é essencial para compreender como tais fatores podem agir na madeira.

Segundo Zobel (1980) o comprimento das fibras constitui a principal variável para definir o limite entre lenho juvenil e adulto, onde as fibras mais próximas da medula apresentam menor comprimento, menor diâmetro e paredes celulares mais finas e aumentam gradativamente em comprimento, diâmetro e espessura da parede conforme se aproxima da casca. Zobel (1980) afirma ainda que, o comprimento das fibras em folhosas dobra na madeira adulta, quando comparada com a madeira juvenil. Por isso, na determinação das propriedades anatômicas, é imprescindível a amostragem detalhada na direção medula-casca para que as variações sejam determinadas com o maior nível de precisão.

Barrichelo e Brito (1976), Tomazello Filho (1985a), Shimoyama (1990) e Cruz (2000) em estudo conduzido com *Eucalyptus grandis*, observaram que a média de comprimento da fibra foi de 1000 μm . Brasil e Ferreira (1972) em estudo com *Eucalyptus grandis* de 16 anos, verificaram que o comprimento médio das fibras foi de 1300 μm . Já a espessura da parede das fibras e o diâmetro do lume foram iguais a 5,0 e 7,7 μm . Barrichelo e Brito (1976) em trabalho com objetivo de verificar a variação das fibras na direção radial de árvores do gênero *Eucalyptus* com quatro anos, observaram que o comprimento das fibras variou de 750 a 1300 μm e o diâmetro do lume e a espessura da parede variaram de 6,0 a 10 μm e 2,5 a 6,0 μm , respectivamente. Tomazello Filho (1985a) observou valores maiores em relação à Barrichelo e Brito (1976) em estudo com a mesma finalidade, porém em árvores de *E. grandis* com dez anos de idade. Alzate (2004) acrescenta que é possível delimitar as camadas anuais de crescimento, através da espessura da parede celular das fibras.

O diâmetro tangencial, a frequência e a área dos vasos também apresentam um modelo de variação radial onde, assim como o comprimento e largura, diâmetro do lume e espessura da parede da fibra, demonstra uma tendência de aumento dos valores observados na direção medula-casca. A variação radial do diâmetro, frequência e área dos vasos do lenho de *Eucalyptus* foi descrita por inúmeros autores como Bamber e Humphreys (1963), Brasil e Ferreira (1979), Foelkel et al. (1983), Tomazello Filho (1987, 2006), Nisgoski, Muñiz e Klock (1998), Leal et al. (2004), Veenin et al. (2005), Lopes (2007), Silva et al. (2007) e Sette Junior (2010).

Sette Junior et al. (2009) e Sette Junior (2010) descrevem que, no lenho de eucalipto, o comportamento mais comumente observado é o diâmetro tangencial dos vasos aumentar, a frequência diminuir e a área dos vasos aumentar na direção radial. Esta característica do lenho de eucalipto está relacionada ao alburno e ao processo ascendente de fluxo da seiva bruta (VEENIN et al., 2005).

Sette Junior et al. (2009) em estudo sobre o efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* de 24 meses de idade, constataram que a frequência dos vasos diminui em todos os tratamentos (controle, potássio e sódio) na direção medula-casca. Os valores de frequência variaram entre 31 e 34 vasos/ mm^2 próximos à medula e entre 10 e 13 vasos/ mm^2 próximos à casca. Já o diâmetro tangencial dos vasos também aumentou na direção radial nos três tratamentos, variando de 46-51 a 89-104 μm para a região próxima da

medula e da casca, respectivamente. Quanto à área ocupada pelos vasos, os autores observaram uma tendência de aumento na direção radial para as árvores fertilizadas com sódio e, nos demais tratamentos, os valores são maiores próximos à medula (11,8–12,6%), decrescendo até o primeiro-segundo cm (10,6%) e, por fim, aumentando (19%) em direção à casca.

3.6.3 Propriedades mecânicas

A madeira é um material ortotrópico, ou seja, apresenta propriedades mecânicas únicas e diferenciadas nos eixos longitudinal, radial e tangencial. O conhecimento das propriedades mecânicas do lenho é essencial para decidir a melhor forma de aproveitamento da madeira (SILVA et al., 2005).

As propriedades mecânicas determinam a capacidade da madeira em suportar solicitações mecânicas. Geralmente, consideram-se a resistência (capacidade em suportar solicitações mecânicas propriamente ditas) e a rigidez (quantificada pelo módulo de elasticidade) como parâmetros mecânicos principais, que condicionam o uso da madeira e aplicações futuras (BENJAMIN, 2006).

Kollmann e Côté (1968) explicam que as propriedades mecânicas estão estritamente relacionadas com o teor de umidade, características anatômicas, químicas, densidade da madeira, porcentagem de madeira juvenil/adulta, presença de defeitos e, ainda, com o crescimento e a idade das árvores. Evans, Senft e Green (2000) acrescentam que o ângulo das microfibrilas e a inclinação da grã também são fatores que afetam as propriedades mecânicas. Tais fatores fazem com que as propriedades mecânicas variem nas direções longitudinal (base-topo da árvore) e radial (medula-casca), sendo que esta última ocorre de maneira mais pronunciada (PANSIN; DE ZEEUW, 1980; DOWNES et al., 1997; SERPA et al., 2003; LEITE, 2013).

Kretschmann (2010) deixa claro que, a madeira utilizada na determinação das propriedades mecânicas deve estar livre de defeitos, como nós e com grã bem orientada. Por isso, é importante seguir metodologias padronizadas que obedecem a critérios pré-estabelecidos, como a norma NBR 7190/97 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997). Contudo, a madeira sendo um material heterogêneo, que sofre a ação de uma série de fatores como clima,

material genético e tratos silviculturais, exige extensa e rigorosa amostragem para que os resultados sejam bem representativos das condições da floresta ou do lote.

Relativamente ao efeito da umidade, Wiedenhoeft (2010) explica que, abaixo do ponto de saturação das fibras, é o momento que a madeira inicia sua contração e as propriedades mecânicas começam a serem alteradas. Diversos autores afirmam que praticamente toda madeira tem as propriedades mecânicas aumentadas após o processo de secagem. Este processo acontece, pois quando a umidade é retirada, as unidades estruturais se aproximam, aumentando a quantidade de ligações de hidrogênio. Sendo as propriedades mecânicas diretamente influenciadas pela espessura de parede das fibras, a densidade também exerce grande influência nas propriedades mecânicas: para madeiras de maior densidade é esperada uma maior resistência e rigidez.

Latorraca e Albuquerque (2000) descrevem que o lenho juvenil possui densidade menor, fibras mais curtas e de parede mais delgada o que acaba por refletir nas propriedades mecânicas, as quais se apresentam menores em relação ao lenho tardio, de condição inversa. Neste sentido, árvores com maiores idades apresentam maior quantidade de lenho tardio, o que caracteriza os maiores valores obtidos nas propriedades mecânicas.

O ensaio de compressão paralela às fibras é, ao nível nacional, o mais importante na caracterização mecânica de madeiras; ela mensura a tensão máxima sustentada por uma dada amostra de madeira comprimida. A madeira submetida a essa solicitação apresenta duas fases de comportamento distintas: a primeira fase revela uma relação linear entre a tensão e a deformação – fase elástica; a segunda fase – plástica – revela comportamento não linear entre tensão e deformação (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

O ensaio de flexão estática também é muito usado na caracterização mecânica de madeiras, sobretudo em países estrangeiros. Avalia o módulo de elasticidade (MOE) e a resistência convencional à ruptura (MOR). O MOE quantifica a relação linear entre a tensão e a deformação (flecha) na fase inicial de ensaio, na qual há proporcionalidade entre elas. O MOR avalia a resistência à solicitação propriamente dita, e é calculado a partir da carga máxima suportada pela amostra, no momento em que há ruptura parcial ou total da amostra de madeira (WANGAARD, 1950).

Ashley e Ozarska (2000) encontraram para o MOE à flexão estática, valores iguais a 12300 e 13500 MPa para árvores de eucalipto com 22 e 28 anos, respectivamente. Panshin e De Zeeuw (1980) acrescentam que as propriedades de resistência à flexão estática estão correlacionadas com a densidade e que, a presença de extrativos aumenta, principalmente, a resistência à compressão na direção longitudinal do lenho.

Bartholomeu e Gonçalves (2007) determinaram o MOE à flexão estática de vigas de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*, obtendo valores maiores na última espécie. Lobão et al. (2004) avaliaram o MOE da compressão paralela às fibras e da flexão estática da madeira de *Eucalyptus* com diferentes densidades (0,57 e 0,88 g/cm³) e encontraram valores médios de rigidez iguais a 18947 e 15598 MPa, respectivamente. Para resistência, os resultados foram de 78 e 55,5 MPa para madeira a 12% de umidade, respectivamente. Oliveira (1997) em estudo conduzido com *Eucalyptus grandis*, encontrou como MOE 8656 MPa e MOR igual a 61,2 MPa. Sette Junior (2010) em determinação da resistência à compressão paralela às fibras e resistência e rigidez na flexão estática em *Eucalyptus grandis* sujeito a fertilização com K e Na, concluiu que as árvores fertilizadas com potássio apresentaram maior resistência e rigidez em relação às árvores controle e fertilizadas com sódio.

As madeiras podem ser classificadas estruturalmente a partir do enquadramento em classes de resistência, como a apresentada na Tabela 1, extraída da norma NBR 7190/97 (ABNT, 1997), que é a usada no caso brasileiro para essa finalidade. Essa classificação facilita a especificação do uso estrutural da madeira, proporcionando maior segurança na escolha de determinada madeira (SALES; CALIL JUNIOR, 2005).

Para classificar madeiras segundo as classes de resistência, é necessário calcular o valor característico das propriedades mecânicas.

Tabela 1 – Classes de resistência das coníferas e folhosas (valores na condição-padrão de referência U=12%)

Divisão	Classes	f_{c0k}	f_{vk}	$E_{c0,m}$	$\rho_{bas,m}$	ρ_{ap12}
		MPa	MPa	MPa	kg/m ³	kg/m ³
Coníferas	C20	20	4	3500	400	500
	C25	25	5	8500	450	550
	C30	30	6	14500	500	600
Folhosas	C20	20	4	9500	500	650
	C30	30	5	14500	650	800
	C40	40	6	19500	750	950
	C60	60	8	24500	800	1000

F_{c0k} : valor característico da resistência à compressão paralela às fibras; F_{vk} : valor característico da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; $E_{c0,m}$: valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras; $\rho_{bas,m}$: densidade básica média; ρ_{ap12} : densidade aparente média à umidade de referência de 12%

Fonte: ABNT (1997)

O valor característico (inferior), menor que o valor médio de um lote, é o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido no lote. É dependente do valor médio e da distribuição e variabilidade dos resultados no lote.

Lobão et al. (2004) verificaram que o valor característico para *Eucalyptus* variou de 46,5 MPa a 61,9 MPa em diferentes lotes de madeiras, o que as classificam como C40 e C60, respectivamente.

3.6.4 Propriedades químicas

O tecido lenhoso é constituído de muitos componentes químicos, os quais estão distribuídos de diferentes formas, segundo a estrutura anatômica. Por isso, a composição química da madeira é complexa, sendo que cada componente possui características bem definidas e está presente na madeira em quantidades específicas, variando conforme a condição a qual a árvore está submetida (ROWELL, 2005).

Basicamente, a madeira de folhosas são constituídas por 70% de carboidratos, 25 a 30% de lignina e 3 a 4% de extrativos (GOMES, 2007). A maior porção de carboidratos da madeira é formada por polímeros de celulose e hemicelulose, sendo que outros açúcares estão presentes em menor quantidade. O termo holocelulose corresponde aos teores de celulose e hemicelulose juntos.

A celulose é um polissacarídeo de alto grau de polimerização, sendo o principal constituinte da parede celular. As hemiceluloses também são

polissacarídeos, porém com menor grau de polimerização e constituem elemento importante para produção de polpa celulósica (ROWELL, 2005). Bertolucci e Penchel (1993), em estudo conduzido com nove clones de *Eucalyptus*, verificaram significativa variação entre os teores de hemiceluloses na madeira.

A lignina é um heteropolímero aromático, encontrada em maior concentração na lamela média. É um composto amorfo e de composição química complexa e cadeia ramificada. A lignina é altamente hidrofóbica e confere dureza e rigidez à parede celular. Em geral, é um composto indesejável na produção da polpa de celulose, visto que altas concentrações de lignina exigem maior quantidade de reagentes para que ocorra a deslignificação (ROWELL, 2005).

Os extrativos são substâncias de baixa ou média massa molecular, podendo ser polifenóis, óleos, gorduras, gomas, resinas, ceras ou amido e constituem os elementos que não fazem parte da estrutura essencial da madeira e, por isso, são chamados de componentes acidentais. Podem ser encontrados nos canais resiníferos, ductos gomíferos das células parenquimáticas, cerne e na parede celular e, assim como a lignina, não são desejáveis para a produção de papel, pois diminuem o rendimento e a qualidade da polpa (BOOTLE, 1983).

A quantidade de componentes minerais na madeira é geralmente baixa, sendo constituída principalmente por óxidos minerais como, óxidos de cálcio, magnésio, fósforo, silício e potássio (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996). Segundo Tsoumis (1991), o conteúdo de cinzas varia entre 0,2 e 1% do peso seco da madeira. Para o gênero *Eucalyptus*, o teor de cinzas dificilmente pode chegar a 1% do peso seco (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996). Brito e Barrichelo (1977) determinaram o teor de cinzas para dez espécies de *Eucalyptus* e encontraram uma variação de 0,2 a 1%, sendo que a lignina apresentou uma relação direta e inversa com o teor de cinzas. Pereira et al. (2000) descrevem que, para o lenho de *Eucalyptus grandis*, foi encontrado um teor de cinzas igual a $0,8\% \pm 0,05$ do peso seco.

Hills e Brown (1984) descrevem que, para madeiras do gênero *Eucalyptus*, a celulose varia de 40 a 62%, a hemicelulose em 12 a 22% e a lignina em 15 a 25%. De maneira semelhante, Philipp e D'Almeida (1988) afirmam que, em média, a madeira de eucalipto é composta por 40 a 55% de celulose, 20 a 40% de hemiceluloses e 15 a 22% de lignina. Entretanto, os autores ressaltam que a quantidade de cada um destes componentes varia muito entre as madeiras de

folhosas e coníferas, entre espécies e dentro de uma mesma árvore. Timell (1969) explica que até mesmo o relevo influencia na composição química da madeira, mostrando que árvores de regiões montanhosas possuem uma camada gelatinosa na parede celular, característica da madeira de tração formada, rica em celulose.

Trugilho, Lima e Mori (2003) encontraram para *Eucalyptus grandis* valores médios iguais a 6,71, 31,77 e 61,52% para extrativos totais, lignina e holocelulose, respectivamente. Colodette et al. (2004) estudaram a composição química de dez espécies do gênero *Eucalyptus* e verificaram que os teores de carboidratos, lignina e extrativos em etanol/tolueno variaram entre 70,0-74,5, 24,1-28,0 e 1,3-2,7%, respectivamente.

Larson (1968) destaca que o uso de fertilizantes pode acarretar alterações nas condições de crescimento, implicando em alterações nas características químicas da madeira. Entretanto, a literatura é escassa neste assunto; Gonçalves et al. (2004b) discorrem sobre os efeitos das práticas silviculturais sobre as propriedades da polpa celulósica. Barreiros et al. (2007) em estudo sobre as modificações químicas em *Eucalyptus grandis* com cinco anos fertilizados com lodo de esgoto, concluíram que os teores de celulose, lignina e extrativos do lenho não sofreram modificações significativas, contudo os teores de hemiceluloses e de cinzas aumentaram em função da aplicação do lodo.

Silveira e Malavolta (2003) descrevem que a fertilização com K em árvores jovens de *Eucalyptus grandis* acarretou o aumento da concentração de holocelulose em três das quatro progênies estudadas. Siddiqui (1972) em estudo conduzido com árvores de *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus resinosa* verificou que a fertilização reduziu o teor de extrativos e aumentou a produção de celulose kraft. Segundo Jian Ju et al. (1998), o efeito de diferentes tratamentos de adubação (N, P, NP e NPK + micronutrientes) sobre os componentes químicos da madeira de *Eucalyptus urophylla* com nove anos de idade não alterou as concentrações de celulose e lignina do lenho das árvores, contudo, houve aumento da concentração de extrativos quando comparada com as árvores controle. Downes e Turvey (1986) afirmam que a aplicação de altas doses de N e P acarreta na redução do conteúdo de lignina da parede celular dos traqueídeos de *Pinus radiata*. Ogbonnaya (1994) verificou que aplicações individuais de N e K aumentam as concentrações de extrativos na madeira.

Andrade et al. (1994) verificaram que a aplicação de calcário calcítico aumenta o teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis* e aponta que a aplicação de gesso e fosfato, ao contrário, reduz a quantidade de extrativos no lenho. Eklund e Eliasson (1990) constataram que maiores concentrações de Ca no citoplasma de *Picea abies* proporcionava maior deposição de lignina e polissacarídeos não celulósicos na parede e menor deposição de celulose. Sgarbi et al. (1999) acrescentam que baixas concentrações de Ca em *E. grandis* x *E. urophylla* resultaram em lenho com menor concentração de lignina quando comparado com árvores sem deficiência nutricional.

3.7 Variação radial de elementos químicos no lenho das árvores

Sabe-se que, na dinâmica do ecossistema florestal, a quantidade total de nutrientes do sistema é determinada pela soma de cada componente de uma árvore (folhas, ramos, casca, lenho etc), vegetação do sub-bosque, serrapilheira e solo. Segundo Schumacher e Poggiani (1993) este somatório pode ser complexo, uma vez que cada parte da árvore apresenta concentrações de nutrientes variadas no tecido que a compõe, sendo que se observa, em geral, um gradiente de concentração de nutrientes maior nas folhas, seguido pela casca, ramos e lenho. Além do compartimento considerado, a distribuição interna de nutrientes na fitomassa florestal varia com o estágio fisiológico, idade das árvores, dinâmica do ecossistema e da possível interação entre os elementos químicos, com influência direta na absorção, acúmulo e liberação de nutrientes (BELLÓTE et al., 2001).

Pritchett (1979) e Waring e Schlesinger (1985) afirmam que a absorção dos nutrientes pelas florestas é influenciada pela espécie, cobertura vegetal e as condições de solo e clima. A eficiência de uso de nutrientes nas árvores, normalmente, é intensificada pela ciclagem bioquímica e biogeoquímica com o aumento da idade das árvores. Neste sentido, Tandon, Pande e Singh (1988) demonstraram em seu estudo a relação entre a quantidade de biomassa produzida e a distribuição de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* em cinco idades diferentes (três, cinco, sete, nove e onze anos).

Schönau (1981) mostra que há mudanças nos níveis de concentração de nutrientes em função da sazonalidade climática, principalmente na estação de crescimento. Neste sentido, Posada e Schuur (2011) explicam que períodos de

ausência de chuvas e baixa umidade no solo impedem que as raízes captem os elementos, já que o gradiente de concentração está comprometido nestas situações.

Clement e Janin (1976) explicam que, em geral, as distribuições dos nutrientes no lenho das árvores apresentam uma tendência de diminuição dos tecidos fisiologicamente ativos para os pouco ativos. Zen, Poggiani e Couto (1981) acrescentam que devido ao fato dos processos fisiológicos estarem em alta atividade nas regiões de maior crescimento da árvore e, pela forma como acontece a dinâmica dos nutrientes de alta mobilidade como N, P, K e Mg dentro da árvore, os teores encontrados são crescentes da base para o topo.

A concentração de nutrientes em folhas de plantas lenhosas constitui um assunto amplamente estudado (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979; BELLOTE, 1990; NAMBIAR; FIFE, 1991; SCHUMACHER; POGGIANI, 1993; SILVEIRA et al., 1995b; ZHANG; ALLEN, 1996; CAMARGO, 1997; WADT et al., 1998; AERTS; CHAPIN, 2000; SILVEIRA, 2000; ALMEIDA, 2009). Entretanto, estudos que avaliaram a variação radial de nutrientes no lenho são escassos.

No gênero *Eucalyptus*, Bamber (1976) e Turner e Lambert (1983) afirmam que as diferenças de concentrações de nutrientes ao longo da posição radial mostram que há intensa translocação de nutrientes como P e K durante a formação do cerne. Laclau et al. (2001) abordaram a mobilidade radial dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg no lenho de *Eucalyptus*, conforme variava a idade das árvores. Contudo, os autores deixam claro que muitas variáveis podem influenciar os resultados como o clima e a fertilidade do solo.

Schumacher e Poggiani (1993) em estudo para avaliar a produção de biomassa e remoção de nutrientes em plantações de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. grandis* e *E. torelliana*, no interior de SP, concluíram que o *E. grandis* foi a espécie que apresentou maior produção de biomassa e maiores concentrações dos nutrientes analisados, tendo acumulado em média 73% dos nutrientes e devolvido apenas 27% para o solo via folheto. Esse comportamento demonstra a importância do ciclo bioquímico para a espécie, podendo refletir, em médio prazo, na fertilidade da camada superficial do solo. Além disso, as concentrações de nutrientes nos distintos compartimentos da árvore apresentaram a seguinte ordem crescente: lenho, casca, ramos e folhas. Nas folhas foram observadas as maiores concentrações de N, P e K e na casca maiores concentrações de Ca e Mg. Quanto à análise de eficiência do uso dos nutrientes, os autores ressaltam que o *Eucalyptus*

grandis apresentou ótimo desempenho frente às outras espécies estudadas, demonstrando capacidade de adaptação a solos com baixa fertilidade.

Lim e Cousens (1986), na tentativa de explicar melhor a mobilidade dos nutrientes nas plantas, definiram o teor de translocação de nutrientes como “a quantidade total de elementos transferidos dos tecidos em senescência para tecidos novos e em crescimento”, o que pode constituir um importante mecanismo para possibilitar as árvores reutilizarem os elementos e manter o crescimento em solos pobres. Quando ocorre de maneira adequada, a translocação de nutrientes permite a adequada produção de biomassa e reduz a dependência da planta das reservas de nutrientes do solo (SETTE JUNIOR et al., 2013). Laclau et al. (2003) ressaltam que as aplicações de fertilizantes no primeiro ano da plantação satisfazem as necessidades por nutrientes pelas árvores, porém após o fechamento do dossel, a translocação dos nutrientes nos seus diferentes componentes é essencial para manter as exigências nutricionais.

Almeida (2009) estudou a concentração e translocação de N, P, K, Na, Ca, Mg e Na em árvores de *Eucalyptus grandis* as quais foram fertilizadas com potássio e sódio e verificou que houve influência dos tratamentos K, Na e “K+Na”; as concentrações de K aumentaram na ordem folha > casca > galho vivo > lenho > galho morto, sendo que no primeiro ano (12 meses) cerca de 50% do K absorvido concentrou-se nas folhas e aos 24 meses quase 70% acumulou-se no lenho e casca. Já a concentração de Na aumentou na ordem: casca > galho vivo > folha > lenho aos 12 meses, sendo que aos 36 meses, a concentração foi maior no lenho (75%). É interessante observar o comportamento diferenciado dos dois nutrientes, onde o potássio dá maior preferência de acúmulo nas folhas, refletindo nas maiores quantidades de K depositado sobre o solo como folheto. O autor constatou que as concentrações médias de N, P, Ca e Mg nos compartimentos da parte aérea não variaram significativamente nos tratamentos sódio e potássio e segundo a idade. As maiores concentrações de Ca foram encontradas na casca e de N, P e Mg nas folhas. O autor ainda afirma que, inicialmente, o lenho sempre apresentou as concentrações mais baixas de todos os elementos. Quanto às taxas médias de retranslocação, a ordem encontrada foi: K > P > N > Na ≥ Mg. Neste sentido, Laclau et al. (2001) concluíram que, em termos absolutos, a translocação no lenho demonstrou a seguinte ordem: N > K > P > Mg > Ca em estudo conduzido com árvores do gênero *Eucalyptus* no Congo.

Estudo semelhante conduzido por Sette Junior et al. (2013) mostrou um aumento na concentração dos nutrientes da região mais interna para a parte mais externa do lenho do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*, mostrando que o potássio e o sódio estão em maiores concentrações nos tecidos fisiologicamente ativos. As árvores fertilizadas com potássio e sódio apresentaram as maiores concentrações dos respectivos nutrientes. Além disso, a retranslocação foi maior nos anos finais da análise (36 e 48 meses), demonstrando uma possível estratégia de uso destes elementos para formação de novos tecidos. Por fim, os autores destacam a resposta positiva das árvores fertilizadas com sódio em solos com elevada deficiência de potássio, demonstrando a possibilidade de substituição sem comprometer o crescimento das árvores.

Rennenberg et al. (2009) explicam que as florestas temperadas são altamente dependentes do N para manter o crescimento, porém, em florestas tropicais, Vitousek et al. (2010) e Santiago et al. (2012) afirmam que o solos são limitados em P e K. Por isso, a possibilidade de expansão das áreas florestais para regiões de baixa fertilidade necessita da realização de estudos mais detalhados quanto à concentração e o conteúdo de nutrientes na biomassa arbórea a ser explorada, a fim de evitar problemas futuros quanto à nutrição das árvores.

3.7.1 Princípios e usos do LIBS

As técnicas de detecção da variação radial de elementos químicos no lenho são muitas e a escolha do método acontece, em geral, em função dos níveis de detecção, gama de elementos que podem ser analisados, rapidez com que é feita e o risco de contaminação na preparação das amostras. Na Tabela 2, têm-se os métodos mais empregados para análise da variação radial de nutrientes no lenho citados pela literatura.

Tabela 2 – Técnicas para análise da variação radial de nutrientes no lenho mais comumente utilizadas relatadas na literatura

Técnica	Autor(es)	Ano
ativação neutrônica (NAA)	Gilboy et al.	1979
	Guyette et al.	1989
emissão de raios X induzida por partículas (PIXE)	Hall e Naumann	1984a
	Hall e Naumann	1984b
	Legge et al.	1984
cromatografia iônica	Ferretti et al.	1992
Fluorescência de raios X (XRF)	Injuk et al.	1987
	Cherubini et al.	2013
voltametria de redissolução anódica (VRA)	Queirolo e Valenta	1987
espectrometria de massa de íons secundários (SIMS)	Martin et al.	1997
espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS)	Hall	1990
	Padilha e Anderson	2002
amostragem por ablação a laser em conjunto com a espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (LA-ICP-MS)	Hoffmann et al.	1994
	Watmough et al.	1997
	Bukata e Kyser	2008
espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS)	Chagas	2013

Fonte: adaptado de Chagas (2013)

Watmough et al. (1997) acrescentam que a escolha da técnica analítica a ser utilizada depende, ainda, da disponibilidade de equipamentos caros, do custo de operação e claro, do propósito do estudo. Além disso, existe a possibilidade de utilização de mais de uma técnica para uma mesma amostra (WATMOUGH et al., 1997).

Kaiser et al. (2012) e Chagas (2013) salientam que o uso da metodologia LIBS é recente, principalmente quanto ao uso em material biológicos. Contudo, a versatilidade e precisão fazem com que a técnica tenha cada vez mais destaque entre os métodos de análise de elementos químicos.

Carvalho (2011), em estudo para avaliar o efeito das propriedades intrínsecas do LIBS sobre a amostra de tecidos vegetais, destaca que a técnica é direta e muito rápida (<1-10 s), pode ser feitas em amostras *in situ*, *in vivo* e em movimento, as massas amostras podem variar de 0,1 a 250 µg (dependendo do laser e da amostra) e possibilita a análise de materiais com considerável dificuldade de dissolução.

Por definição, trata-se de uma técnica espectroanalítica que aplica a microamostragem da amostra por ablação com laser e subsequente excitação dos átomos presentes no microplasma induzido pela ablação (CORTEZ, 2007).

A técnica LIBS é baseada pelo uso de vários equipamentos interligados, para compor o sistema: (i) laser pulsado com energia capaz de causar a formação do plasma, (ii) sistema óptico para dar foco à energia do laser na superfície a ser amostrada, (iii) telescópio para coletar a radiação emitida pelo plasma e focalizá-la na abertura de entrada do espectrômetro, (iv) sistema para fixação da amostra, capaz de deslocar na direção X-Y, (v) detector para controlar, simultaneamente, as radiações emitidas nas regiões UV e visível do espectro eletromagnético e (vi) computador para controle dos parâmetros do laser e do espectrômetro e para adquirir e processar os espectros de emissão.

Como resultado, pode-se dizer que a excitação da amostra é realizada por um laser pulsado (focalizado através da lente convergente), em uma pequena área da amostra. A energia aplicada aquece a amostra, vaporiza uma pequena quantidade de material e ioniza a matéria próxima do ponto de incidência, produzindo um plasma com elevada temperatura. Com isso, parte da luz emitida pelo plasma é captada pelo telescópio e transferido para o espectrômetro que dispersa as radiações emitidas pelos átomos e íons excitados, característicos da amostra em estudo. Por fim, o detector registra os sinais de emissão, os quais são computados, onde a resposta obtida é a intensidade das linhas de emissão dos elementos químicos presentes na amostra (CHAGAS, 2013).

A proposta de utilização da técnica LIBS para análise direta de amostras data do ano de 1964. Entretanto, os trabalhos só ganharam reconhecimento a partir do início da década de 90, quando houve o surgimento de equipamentos comerciais com sistemas ópticos dispersivos com alta resolução, além do desenvolvimento de detectores mais sensíveis (RADZIEMSKI, 2002).

O uso de LIBS para estudo de tecidos de plantas de interesse agrônomo, de microorganismos e de tecidos animais é algo consolidado. No entanto, a literatura referente à sua aplicação para avaliação da variação radial de elementos no lenho de árvores é escasso (KAISER et al., 2012; CHAGAS, 2013). Pode-se citar Moskal e Hahn (2002) e Martin et al. (2005) que utilizaram o LIBS para constatar a presença de metais em peças de madeiras tratadas com preservantes e Wagner et al. (2012) para avaliar o crescimento e o estado nutricional de árvores de *Quercus*, com 13

anos de idade, submetidos a três regimes manipulados de precipitação (úmido, seco e controle). Os autores constataram variação na intensidade das linhas de emissão de Ca, K, Mg, Na, N e P entre o lenho das árvores em condição úmida e seca, justificando esse resultado baseado nas modificações anatômicas e, consequentemente, químicas do material devido ao estresse hídrico provocado.

3.8 Princípios da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

Schrieve, Melish e Ullman (1991) explicam que a região do infravermelho, o qual compõe o espectro eletromagnético, pode ser dividida em três, sendo o infravermelho distante, o infravermelho médio e o infravermelho próximo (Figura 1). A espectroscopia no infravermelho próximo ou, em inglês, *near infrared spectroscopy* (NIRS) consiste em uma técnica onde há medição da intensidade de absorção da luz infravermelha próxima e da vibração das ligações moleculares em cada comprimento de onda, na faixa de 800-2500nm (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011).

Figura 1 - Espectro eletromagnético

Fonte: Taiz e Zeiger (2009)

No infravermelho distante estudam-se os espectros de vibração e rotação das ligações das moléculas e no infravermelho médio os espectros da vibração molecular. Já no infravermelho próximo, analisam-se os harmônicos das vibrações moleculares.

No NIR, as vibrações moleculares resultantes das transições harmônicas são responsáveis pela absorção nesta região (BURNS; CIURCZAK, 2008). A Tabela 3

mostra, em resumo, a região do infravermelho, respectivo comprimento de onda e característica medida.

Tabela 3 - Região do infravermelho, respectivo comprimento de onda (nm) e característica medida

Região	Comprimento de onda (nm)	Característica medida
Infravermelho Próximo (NIR)	780 a 2500	overtones e combinações de bandas de vibrações moleculares fundamentais, especialmente de estiramento e deformações angulares.
Infravermelho Médio (MIR)	2500 a 25000	vibrações moleculares fundamentais: estiramentos, deformações angulares, abano, tesoura.
Infravermelho Distante (FIR)	$2,5 \times 10^4$ a 10^6	rotações moleculares.

Fonte: Definição internacional ASTM, adaptação de Milagres (2009)

A radiação no infravermelho apresenta maior comprimento de onda, e conseqüentemente, menor energia. Por isso, esse tipo de radiação quando interage com moléculas orgânicas é capaz de causar apenas alterações nos modos vibracionais e rotacionais das moléculas (WORKMAN JR.; WEYER, 2008).

A natureza dos átomos e das ligações entre eles que formam a molécula é relacionada com o conceito físico de absorção de luz. Sabe-se que estas ligações não são estáticas, mas vibram constantemente, provocando compressão e estiramento das moléculas, o que por sua vez resulta em um movimento de onda dos átomos, com frequência específica segundo os elementos envolvidos (PASQUINI, 2003). Desta forma, quando uma luz monocromática atinge uma amostra, ela poderá ser refletida, absorvida ou transmitida (Figura 2). Contudo, a molécula só poderá absorver radiação quando as vibrações de suas ligações moleculares acontecerem na mesma frequência de onda da radiação (KEMPEN; JACKSON, 1996).

Figura 2 - Interações entre a radiação e a amostra
Fonte: Viana (2008)

Normalmente, as ocorrências espectrais na região NIR decorrem de ligações de moléculas em que há participação do hidrogênio, tornando a técnica útil para a determinação de compostos orgânicos que apresentem ligações como C-H, N-H, O-H, C=O ou S-H (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). Isso acontece devido ao fato dos átomos de hidrogênio vibrarem com maior amplitude, já que estes apresentam baixa massa atômica. Desta forma, as bandas de absorção obtidas na região do infravermelho próximo são oriundas dos sobretons das vibrações de estiramento que envolve os grupos funcionais com átomos de hidrogênio ou das combinações de módulos vibracionais de estiramento e deformação angular (WORKMAN JR.; WEYER, 2008).

O NIR fundamenta-se no fato de que as ligações covalentes das substâncias orgânicas absorvem a energia das vibrações, usando essa absorção para avaliação do tipo e número de ligações moleculares nas amostras estudadas (BARBOSA, 2007).

Desta forma, a absorção de luz com comprimento de onda específico e conhecido da região do infravermelho próximo é medida pela diferença entre a quantidade de luz emitida pelo NIR e a quantidade de luz refletida pela amostra. Por isso, como a amostra estudada apresenta constituições químicas características e comprimento de onda específico (Tabela 4), cada material apresentará diferente absorção da luz e conseqüentemente diferente resposta (SIESLER, 2008).

Tabela 4 - Região espectral e respectiva natureza da transição vibracional

Região espectral (nm)	Natureza da transição vibracional
2200 -2450	estiramento da combinação C-H
2000-2200	estiramento da combinação N-H, O-H
1650-1800	primeiro sobretons do estiramento C-H
1400-1500	primeiro sobretons do estiramento N-H, O-H
1100-1225	segundo sobretons do estiramento C-H
950-1100	segundo sobretons do estiramento N-H, O-H
850-950	terceiro sobretons do estiramento C-H
775-850	terceiro sobretons do estiramento N-H, O-H

Fonte: Costa Filho (2003)

Workman Jr. e Weyer (2008) exemplificam como a região espectral e respectiva natureza da transição vibracional funciona, através do estudo da molécula da água. A banda de combinação da água acontece em 1940 nm e é dada pela soma dos módulos vibracionais, onde a interação entre os módulos vibracionais de um estiramento assimétrico a 3500 cm^{-1} mais a deformação do ângulo a 1645 cm^{-1} da ligação O-H da molécula da água resulta em 5145 cm^{-1} , demonstrando que, de modo equivalente, a banda de combinação da água deve surgir a 1943 nm.

3.8.1 Método de análise dos resultados obtidos pelo NIR

A aplicação da técnica NIR envolve o uso de métodos específicos para interpretação dos resultados obtidos. Massart et al. (1986) explicam que o desenvolvimento adequado do uso da espectroscopia só foi possível devido às técnicas quimiométricas, as quais funcionam como ferramenta de análise em estudos qualitativos e quantitativos na química analítica. Dentro da quimiometria, a calibração multivariada teve destaque no tratamento de dados espectrais. Neste sentido, Pasquini (2003) descreve que o NIR tem uma relação direta com a análise multivariada dos dados. Dentre os métodos estatísticos multivariados mais usados, cita-se a análise de componentes principais (PCA) em análises qualitativas utilizando a técnica NIR, principalmente pelo fato desta análise possibilitar o controle da homogeneidade das amostras. Neste contexto de análise de dados, pode-se dizer

que a regressão das componentes principais (PCR) e a regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) também são amplamente utilizadas na análise dos resultados obtidos pelo NIR, visto que estes permitem uma relação linear entre os espectros observados e o valor real da propriedade avaliada (FERREIRA, 2008).

A análise PCA tem como objetivo principal a obtenção de combinações interpretáveis, através do fornecimento de ferramentas adequadas para identificar tais variáveis e então, gerar um conjunto de dados mais adequado estatisticamente (FERREIRA, 2008).

A interpretação geométrica da análise PCA pode ser descrita como a realização de uma rotação rígida no sistema de eixos coordenados, onde os novos eixos resultantes são posicionados na direção de maior variabilidade das amostras em estudo. Neste sentido, a expressão do comportamento do conjunto de amostras através dos vetores permite detectar os erros de forma muito eficiente. Por isso, quanto maior a relação entre as variáveis estudadas, melhor os resultados obtidos. A análise PCA permite ainda, a construção de gráficos bidimensionais que contêm a maior parte das informações estatísticas das variáveis disponíveis, onde é possível delimitar grupos entre as amostras de acordo com suas similaridades (FERREIRA, 2008; SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). O conjunto de dados obtido (espectro+dados do laboratório) é utilizado na regressão PLS, sendo que a escolha correta das variáveis reflete na qualidade do modelo adquirido, onde um baixo número de fatores PLS pode resultar em um modelo mais estável (TSUCHIKAWA, 2007).

Depois de concluída a seleção do conjunto de dados, é necessário realizar a calibração, a qual tem por objetivo mostrar o melhor modelo que represente a relação entre os dados obtidos pela técnica NIR (os espectros) e os dados obtidos pela análise tradicional (PASQUINI, 2003). Por isso, é importante que a amostra represente adequadamente a variabilidade existente na população.

Após a calibração do modelo para uma determinada propriedade, a acurácia de calibração deve ser testada através da validação, ou seja, a validação avalia a eficiência do modelo matemático aplicado para um dado conjunto de amostras (Figura 3). Para isso, existe a validação externa ou independente e a validação cruzada (WORKMAN JR.; WEYER, 2008). A validação externa acontece quando um segundo lote de amostras é analisado, ou seja, quando se tem dois conjuntos de amostras. Contudo, para validar um modelo a partir de um lote externo, as amostras

precisam ter características iguais às usadas na calibração. É aconselhável utilizá-la quanto se tem maiores quantidades de amostras (WORKMAN JR.; WEYER, 2008).

A validação cruzada é definida por Simas (2005) como sendo a avaliação da grandeza dos erros de previsão através da comparação dos valores das variáveis dependentes das amostras do grupo de calibração com as respectivas previsões, quando estas não fazem parte da construção do modelo de regressão (Figura 3). Para isso, na validação cruzada, uma ou mais amostras são retiradas do conjunto de amostras usadas para fazer o modelo de calibração para, então, serem usadas como um conjunto de predição. As amostras da predição voltam ao conjunto de calibração e novas amostras são retiradas como amostras de predição. Este processo é repetido até que todas as amostras do conjunto de calibração passem pelo conjunto de predição (GELADI; KOWALSKI, 1986).

A forma com que a validação se ajustou aos dados é representada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pela raiz quadrada do erro médio quadrático de previsão (RMSECV), onde o R^2 mostra o grau de relação entre os valores obtidos nas análises convencionais de laboratório e os valores preditos nos modelos gerados com as mesmas amostras e o RMSECV é o erro da predição gerado na validação cruzada, retirando-se uma amostra de cada vez ou um grupo de amostras. Já o RMSEP é definido como o erro da predição gerada na validação independente.

A partir daí, gera-se um modelo com o restante dos dados e pode-se prever uma relação com as amostras retiradas (Figura 3). O erro padrão da calibração (RMSEC) é calculado com as amostras usadas no modelo e consiste na média dos desvios dos resultados obtidos no laboratório e no NIR (SIESLER et al., 2002). Como valores ideais, tem-se que os R^2 devem ser próximos de 1 e o RMSEP, RMSEC e RMSECV próximos do erro padrão das análises feitas em laboratório. Diante disso, obtém-se a relação de desempenho do desvio (RPD), que é uma maneira de avaliar a precisão da calibração realizada e de comparar modelo entre si, sendo descrita como a razão entre o desvio padrão dos valores de referência e o RMSEP ou RMSECV (WILLIAMS; SOBERING, 1993).

Figura 3 - Esquema de calibração, validação e predição pelo NIR realizado para a densidade básica a partir dos discos de madeira

O pré-tratamento espectral, ou seja, o uso de técnicas para reduzir ou padronizar o impacto de fatores indesejáveis nos espectros é possível sem que haja alteração das informações obtidas pelo NIR. Como exemplo de pré-tratamento, pode-se citar o *Standard Normal Variate* (SNV), a primeira e a segunda derivada de *Savitsky-Golay*. O efeito dos pré-tratamentos é, normalmente, suavizar bandas sobrepostas e acentuar os sinais espectrais (SIESLER et al., 2002), permitindo que os dados fiquem mais simetricamente distribuídos e, consequentemente, os modelos se ajustem melhor para fornecerem uma precisão uniforme (PASQUINI, 2003).

Além dos pré-tratamentos dos espectros, é necessário identificar e eliminar os *outliers*, ou seja, os dados diferentes do resto do conjunto de dados. Para isso, o grau de afastamento da amostra em relação à média dos dados (grau de *leverage*) oferece condições para identificação destes possíveis *outliers* (NAES; ISAKSSON, 1994).

Há ainda a possibilidade de uso do método de seleção de variáveis que pode ser adotado dependendo do objetivo do estudo. Neste método, identificam-se e selecionam-se apenas as faixas espectrais que explicam as variáveis de interesse, gerando modelos mais estáveis, robustos e simples para interpretação (WORKMAN

JR.; WEYER, 2008). Em estudos com madeira, onde algumas faixas de comprimento de onda são mais informativas que outras para determinação, por exemplo, de componentes químicos, esta é uma estratégia que pode ser adotada (TSUCHIKAWA, 2007).

A partir do momento que o modelo de calibração é validado, uma quantidade grande de material pode ter suas características preditas, diante da informação obtida na espectroscopia NIR sem precisar de medições padronizadas em laboratório (HEIN et al., 2009b).

3.8.2 Emprego do NIR no Brasil e vantagens da técnica

O emprego do NIR no Brasil ainda é recente. Pasquini (2003) realizou uma revisão bibliográfica sobre o assunto onde ele trata de fundamentos, aspectos práticos e aplicações analíticas da técnica. Neste estudo, o autor aponta que no Brasil o uso do NIR ainda é pequeno quando comparado à quantidade de publicações internacionais na área e explica que o uso da técnica ainda se restringe em aplicações na agricultura, com destaque para a grande quantidade de trabalhos que usam o NIR para análise da polpa de *Eucalyptus*. O autor ressalta a importância da aplicação desta técnica em outras áreas, como na tecnologia da madeira, devido ao seu potencial de utilização.

O uso da espectroscopia NIR apresenta vantagens em relação às formas de análises tradicionais, já que é não destrutiva, não invasiva, permite a análise de um grande número de amostras em pouco tempo, não há necessidade de grande habilidade por parte do operador, funciona como um identificador de padrões de qualidade, exige um preparo mínimo da amostra e os parâmetros do modelo não se alteram de forma significativa quando novas amostras são inseridas ou retiradas do grupo de calibração (PASQUINI, 2003).

O potencial de uso da técnica para padronizar a qualidade final do produto, principalmente na indústria de celulose e papel, é promissor visto que permite otimizar o tempo, minimizar os custos de amostragem e controlar a qualidade através de um sistema *on-line* (SAMISTRARO, 2008).

Contudo, Antti (1999) e Caldeiras et al. (2007) descrevem que uma possível desvantagem da técnica é a necessidade de um profundo conhecimento de estatística multivariada para análise e interpretação dos dados. Além disso, Hein

(2008) explica que, apesar dos ótimos resultados obtidos pela técnica NIR, muitas questões precisam ser esclarecidas para aumentar a eficiência da análise, principalmente o controle das perturbações que o ambiente está sujeito como variações de temperatura, umidade, tamanho e heterogeneidade das amostras, sendo este problema a principal limitação para as modelagens pelo NIR. Por isso, os avanços no uso da técnica se fazem necessários para que as vantagens da avaliação pelo NIR possa se consolidar no Brasil, além da possibilidade de poder suprir a demanda por novos métodos de avaliação de madeiras.

3.8.3 Uso do NIR para determinação da qualidade do lenho

A espectroscopia no infravermelho próximo apareceu como uma técnica alternativa de avaliação para materiais de origem orgânica. Inicialmente, foi usada para controle e monitoramento da qualidade de diversos produtos farmacêuticos, alimentícios, poliméricos, químicos, petrolíferos e agrícolas (BAILLÈRES; DAVRIEUX; HAM-PICHAVANT, 2002; SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011).

Os primeiros trabalhos envolvendo o uso do NIR como ferramenta de controle de processos na indústria iniciaram-se na década de 70 pelo professor Karl Norris, responsável por um grupo de pesquisa do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (PASQUINI, 2003).

A maioria dos trabalhos com uso do NIR aplicado à madeira foi realizada com o objetivo de estudar a composição química do lenho, como estimar os teores de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, ou ainda calcular o número kappa, rendimento de polpação e teor de fibras curtas em papéis conforme visto nos trabalhos de Birkett e Gambino (1988), Easty et al. (1990), Schultz e Burs (1990), Wright, Birkett e Gambino (1990), Wallbacks et al. (1991), Garbutt, Donkin e Meyer (1992), Thygesen (1994), Hoffmeyer e Pedersen (1995), Michell (1995), Schimleck et al. (1997, 1999), Schimleck e Michell (1998), Raymond et al. (2001), Thumm e Meder (2001), Brinkmann, Blaschke e Poole (2002), Alves et al. (2006), Tsuchikawa (2007) e Andrade et al. (2010).

O lenho das árvores apresenta variações nas propriedades devido a idade, transição cerne-alburno, lenho juvenil-adulto, lenho inicial-tardio, além do efeito dos tratamentos silviculturais, como a fertilização, o que implica na ocorrência de variabilidade

na resposta espectral da superfície da madeira. Tais variações nas propriedades são resultado de mudanças químicas que ocorrem no lenho e por isso, os espectros podem demonstrar como acontecem essas variações na composição e estrutura da madeira.

Hein (2008) explica que o avanço da técnica ao longo do tempo e com os progressos das pesquisas, permitiu-se propor o uso do NIR na determinação de propriedades não químicas da madeira. O autor afirma que a possibilidade de previsão de propriedades como densidade, módulo de elasticidade e ângulo microfibrilar, decorre do fato destas propriedades sofrerem modificações na constituição química. Diante disso, pode-se afirmar que o NIR apresenta importante potencial para gerar bons modelos de calibração para qualquer propriedade da madeira.

Easty et al. (1990) relatam que em estudo de determinação de lignina pelo processo Klason e por NIR, os valores apresentaram entre eles uma diferença de apenas 0,2%. Garbutt, Donkin e Meyer (1992) verificaram que os valores estimados pelo NIR demonstraram R^2 de 0,991 para a lignina e 0,953 para a celulose com os resultados obtidos de forma convencional.

Neste sentido, Schimleck et al. (2000) em estudo para determinar o efeito do local de plantio na variabilidade das propriedades do lenho dentro de uma mesma árvore do gênero *Eucalyptus*, concluíram que os resultados foram satisfatórios, onde o uso do NIR foi adequado para este fim. Outras propriedades da madeira foram estudadas como teor de umidade por Hoffmeyer e Pedersen (1995); ângulo da grã por Gindl e Teischinger (2002); ângulo microfibrilar por Schimleck, Evans e Ilic (2001), Schimleck e Evans (2002), Kelley et al. (2004) e Via (2004); alterações no lenho devido à degradação química e biológica por Hoffmeyer e Pedersen (1995), Kelley, Jellison e Goodell (2002) e Via (2004); presença de preservantes inorgânicos por Feldhoff, Huth-Fehre e Cammann (1998); características morfológicas das fibras por Hauksson et al. (2001), Schimleck e Evans (2002) e Via (2004) e características do produto final como módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e colagem de painéis MDF por Rials, Kelley e So (2002).

As propriedades mecânicas de produtos madeireiros acabados, como MOE e MOR, puderam ser caracterizadas através do NIR com obtenção de resultados satisfatórios, conforme observado por Hoffmeyer e Pedersen (1995), Kelley et al.

(2004), Via (2004), Fujimoto et al. (2008), Hein et al. (2009a, 2010), Kothiyal e Raturi (2011) e Wentzel-Vietheer et al. (2013).

O avanço do uso da técnica permitiu, até mesmo, a separação de grupos de madeiras com propriedades distintas, conforme demonstrado por Schimleck, Michell e Vinden (1996), Tsuchikawa et al. (2003) e Ribeiro (2009).

A densidade básica é descrita, por muitos autores, como a propriedade mais importante da madeira, já que tem relação direta com as propriedades físicas e mecânicas. A determinação desta propriedade, normalmente, é feita através da balança hidrostática, a qual é precisa, porém trabalhosa. Por isso, a possibilidade de determinação através do NIR é de grande interesse prático.

A literatura cita que o primeiro trabalho neste sentido, foi publicado por Thygesen (1994), seguido por Pedersen e Hoffmeyer (1995), os quais determinaram, com sucesso, a densidade básica da espécie *Picea abies*.

Hein (2008) e Viana (2008) utilizaram a técnica NIR para predição da densidade básica de *Eucalyptus urophylla* de 14 anos e clones de *Eucalyptus*, respectivamente. Ambos os autores constataram que a técnica apresentou alta eficiência e boa correlação com os métodos convencionais.

Hein, Lima e Chaix (2009) em estudo para determinação da densidade básica de *E. urophylla*, avaliaram a variação destas propriedades nos três planos da madeira e obtiveram resultados satisfatórios, onde o número de *outliers* foi abaixo de cinco e o maior R^2 obtido foi igual a 0,89 na validação cruzada, onde a quantidade de amostras era igual a 105. Hein et al. (2009b) em estudo para determinação da densidade básica de *E. urophylla* e *E. grandis* com seis anos e meio de idade descrevem que o R^2 dos modelos de predição variou entre 0,74 e 0,86 e a RPD variou entre 1,9 e 2,7. O uso de pré-tratamento espectral, a retirada de *outliers* e a seleção do comprimento de onda de interesse melhoraram os ajustes das calibrações, diminuindo o RMSEC e RMSECV e aumentando a RPD e o R^2 .

Segundo Antony et al. (2009) o uso da técnica NIR foi adequada para determinar as diferenças provocadas pela fertilização de meados de rotação no módulo de elasticidade (MOE), ângulo microfibrilar, densidade básica e dimensões dos traqueídeos de árvores de *Pinus taeda* plantados na Carolina do Norte, Estados Unidos. Os autores explicam ainda que, a técnica foi útil para determinar as diferenças entre as árvores fertilizadas e as controle, porém não foi muito eficiente na determinação das diferenças entre as árvores que receberam diferentes

proporções de fertilizantes, ressaltando a necessidade de aumentar o número de árvores amostradas.

Viana et al. (2010) descrevem que as calibrações para estimar a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* apresentaram R^2_{cv} variando entre 0,56 e 0,97 e RPD variando entre 1,1 e 4,7, mostrando que o NIR foi eficiente na determinação desta propriedade física. Gouvêa et al. (2011) investigaram a precisão de determinação da densidade básica pelo resistógrafo, NIR e Pilodyn e constataram eficácia nos métodos, sendo o NIR o segundo melhor em precisão. O R^2 foi igual a 0,84 e o RMSEP e RMSEC foram de 0,017 e 0,013, respectivamente.

Alves et al. (2010) verificaram que o uso da PLS-R é adequado para prever valores de densidade básica de *Pinus pinaster* e *Larix x eurolepis*. Raymond e Muneri (2001) e Inagaki et al. (2010) encontraram resultado semelhante para determinação de densidade básica em *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus camaldulensis*, respectivamente.

Fujimoto et al. (2012) estudaram a determinação da densidade básica de *Larix kaempferi* com diferentes concentrações de umidade com o uso do NIR. Os autores relatam que os espectros obtidos pelo NIR variaram conforme as condições de umidade, com bandas bem marcadas na região de 7320, 7160 e 7000 cm^{-1} (comprimento de onda característicos da celulose e da água) e, portanto, tem capacidade de prever a densidade básica da madeira independentemente da umidade presente na amostra.

Olale et al. (2013) mostraram que o NIR foi eficiente em estudo pioneiro de determinação da densidade básica de 17 espécies tropicais do Quênia porém, os autores salientam a importância da criação de um banco de dados espectrais para obtenção de um modelo mais adequado.

Tsuchikawa (2013) conclui que o uso do NIR na determinação de propriedades da madeira é de grande interesse, pois a obtenção de informações precisas quanto à composição de um produto madeireiro é algo muito relevante para garantir a qualidade do produto final. Além disso, quanto mais rápido é determinado a ocorrência de uma mudança neste produto, mais rápida será a correção, evitando perdas e desperdícios. Por isso e diante do exposto, pode-se dizer que as pesquisas de qualidade da madeira utilizando a espectroscopia NIR são pertinentes, de grande valia e de ampla aplicação na caracterização deste material.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

A área experimental está instalada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, localizada a 23° 10' S e 48° 40' W, a 857 m de altitude. O clima, segundo Koeppen, é mesotérmico úmido (Cwa), com precipitação média anual de 1360 mm, sendo que entre os meses de maio e setembro há baixa pluviosidade, com julho e agosto descrito como períodos críticos, indicando a ocorrência de déficit hídrico (Figura 4). A temperatura média é de 16,2 °C nos meses mais frios e 28,6 °C nos meses mais quentes.

Figura 4 – Balanço hídrico observado na área experimental, durante os três anos iniciais da plantação (capacidade de armazenamento do solo igual a 200 mm)

Fonte: Almeida (2009)

O relevo é suavemente ondulado, sendo o solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média (200 g kg^{-1} de argila), sendo a litologia composta por arenito, do grupo Bauru, formação Marília (EMBRAPA, 1999). Antes da instalação do experimento, Maquère (2008) caracterizou de forma detalhada os atributos químicos do solo até seis metros de profundidade, conforme pode ser observado na Tabela 5. Os resultados mostraram que o teor médio de K e Na trocável no solo é de $0,02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ até cinco centímetros de profundidade e,

inferior a $0,01 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ entre cinco e seiscentos centímetros de profundidade, demonstrando deficiências severas dos nutrientes em todo o perfil do solo.

Tabela 5 – Atributos químicos do solo da área experimental

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

Fonte: Maquère (2008)

4.2 Delineamento experimental

O experimento compõe o Projeto de Pesquisa “Resposta do *Eucalyptus grandis* à adubação potássica e à substituição do potássio por sódio”, sendo as sementes de procedência de Coff’s Harbor/Suzano. O experimento foi instalado em abril de 2004, em delineamento experimental em blocos casualizados com três tratamentos e quatro blocos (Figura 5). O plantio foi realizado no espaçamento 3 x 2 m e cada parcela possui 81 árvores (nove linhas com nove plantas por linha), com duas linhas de bordadura evitando a influência dos tratamentos de fertilização das parcelas adjacentes. Com isso, cada unidade experimental apresentavam 25 árvores.

Na área do experimento foram distribuídos 2000 kg ha^{-1} de calcário dolomítico, a lanço e sem incorporação. Os tratamentos foram definidos por três doses de fertilizantes, sendo (i) controle, sem aplicação de K e Na; (ii) aplicação de $3,0 \text{ kmol ha}^{-1}$ de K (116 kg ha^{-1} de K na forma de K_2O) usada em solos semelhantes por empresa florestadora da região, constituindo-se em importante referência e (iii) aplicação de $3,0 \text{ kmol ha}^{-1}$ de Na ($68,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de Na na forma de NaCl), aplicados em três diferentes momentos ao longo do primeiro ano (1/3 no plantio, 1/3 aos seis meses e 1/3 aos 12 meses). Os tratamentos receberam, também, $80 \text{ kg de P}_2\text{O}_5$, 45

kg de N ($\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$) e 45 kg de FTE (BR-12) ha^{-1} (3,82% de Fe; 9,20% de Zn; 2,17% de B; 0,80% de Cu; 3,4% de Mn e 0,13% de Mo) como fonte de micronutrientes.

Figura 5 - Aspecto da parcela experimental com árvores de *Eucalyptus grandis* com 101 meses, na Estação Experimental de Itatinga do Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP

4.3 Seleção, corte e coleta das amostras do lenho das árvores de eucalipto

Com base no inventário florestal realizado na área experimental, foram definidas cinco classes de área basal por tratamento. Para cada classe (cinco classes) e tratamento (três tratamentos) foram selecionadas quatro árvores, totalizando 60 árvores amostradas.

As árvores foram cortadas (setembro de 2012 – 101º mês ou oito anos e cinco meses), desramadas e seccionados dois discos do lenho por posição longitudinal (seis posições ao longo do tronco: base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total) e o torete basal (base-DAP) e transportado para o Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP (Figura 6). Dos discos e toretes do lenho foram confeccionados os corpos de prova para a determinação das características anatômicas, químicas, físico-mecânicas e de variação radial de nutrientes no lenho.

Figura 6 – Esquema da amostragem do lenho das árvores de eucalipto para a realização das análises anatômicas, físico-mecânicas e químicas

4.4 Incremento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto

Para a avaliação do incremento em diâmetro do tronco no DAP das árvores, foram implantados dendrômetros de aço, no ano de 2006, no tronco de 20 árvores/tratamento, totalizando 60 árvores (Figura 7A). As faixas dendrométricas foram confeccionadas de acordo com Botosso e Tomazello Filho (2001), com fitas de aço inoxidável (12,7 x 0,15 mm, largura e espessura) e escala (mm e nônio) com precisão de leitura de 0,2 mm, mantidas sob tração por mola de aço inoxidável (100 x 8 mm; comprimento e diâmetro) no tronco das árvores (Figura 7B).

A circunferência do tronco das árvores foi mensurada, somando-se 17 cm, referente à sobreposição da escala e do nônio, obtendo-se o comprimento total das faixas dendrométricas (Figura 7D). A graduação da escala e nônio foi demarcada na fita com uso de gabarito com duas placas de metal (a primeira na borda inferior com escala de leitura de graduação de 80 mm; a segunda na borda superior com escala de dez divisões do nônio) (Figura 7C). O deslocamento das escalas das faixas dendrométricas foi medido a cada 14 dias, no período da manhã (8:00h-11:00h) e no

mesmo percurso, avaliando o incremento em diâmetro do tronco das árvores. Os dados foram transferidos para planilhas Excel para geração de gráficos e posterior análise e interpretação dos dados obtidos segundo os tratamentos, classes de área basal e variáveis climáticas.

Além disso, com base nos dados de diâmetro do tronco das árvores obtidos pelos dendrômetros, também foi calculado o volume do lenho (fator de forma = 0,48) das árvores de eucalipto, no período inicial (22º mês) e final (101º mês) da avaliação para posterior relação com os tratamentos e classes de área basal.

Figura 7 - Confecção e instalação da faixa dendrométrica no tronco da árvore; (A) faixa dendrométrica devidamente instalada no tronco da árvore; (B) sobreposição da escala e do nônio; (C) gabarito para gravação da escala e do nônio; (D) faixa dendrométrica em detalhe com escala e mola

Fonte: Sette Junior (2010)

4.5 Variáveis climáticas

A precipitação acumulada (mm), temperatura média, mínima e máxima (°C) e a umidade relativa do ar (%) foram obtidas da estação meteorológica da Estação Experimental de Itatinga/SP (instalada à 800 m do local do experimento) e agrupadas por períodos de 14 dias, coincidentes com as leituras das faixas dendrométricas, para posterior correlação com os valores de incremento em diâmetro do tronco das árvores.

4.6 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto: densidade aparente e básica

4.6.1 Densidade aparente do lenho das árvores de eucalipto

Na seção transversal dos discos do lenho do DAP do tronco das árvores amostradas foram demarcadas e cortadas amostras diametraais (20x10 mm, largura e altura), coladas em suporte de madeira e seccionadas na direção transversal (2 mm, espessura) em equipamento de dupla serra circular paralela (Figura 8A). As seções transversais do lenho foram acondicionadas em câmara de climatização (20 °C, 60% UR) até atingir 12% de umidade (Figura 8B) (AMARAL; TOMAZELLO FILHO, 1998).

A densidade aparente média, mínima e máxima do lenho foi determinada com uso do equipamento QTRS-01X, da *Quintek Measurement Systems*, EUA (Figura 8C). As amostras foram encaixadas em suporte metálico (Figura 8D) e colocadas no compartimento interno blindado do equipamento. A varredura da amostra foi feita na direção medula-casca a cada 0,04 mm.

Os valores de densidade gerados pelo equipamento, em tempo real, são baseados na relação entre a atenuação de raios X e a densidade, expressa pela eq. 1:

$$I/I_0 = e^{-\mu_l t} \quad (1)$$

Onde:

I = intensidade do feixe de radiação após atravessar a amostra; I_0 = intensidade do feixe de radiação sem que tenha atravessado a amostra; μ_l = coeficiente de atenuação linear da amostra (cm^{-1}); t = espessura da amostra (cm); e = base logarítmica natural

As intensidades I e I_0 são medidas para cada ponto ao longo do perfil radial, enquanto μ_l é calculado. O coeficiente linear de atenuação (μ_l) está relacionado com a densidade segundo a eq. 2:

$$\mu_l = \mu_m \cdot \rho \quad (2)$$

Onde:

μ_m = coeficiente de atenuação de massa da amostra (cm^2/g); ρ = densidade (g/cm^3)

O coeficiente de atenuação de massa (μ_m) varia em função da energia da radiação incidente e da composição do material, relação importante quando se trata de madeira, visto que a composição química é muito diversificada (e.g. celulose, hemicelulose, lignina, extrativos, cinzas e água). A necessidade de conhecer a umidade da amostra é essencial, pois a água presente em cada um destes componentes químicos é considerada elemento fundamental na acurácia da determinação da densidade (QUINTEK MEASUREMENT SYSTEMS - QMS, 1999).

Assim, quando μ_m é conhecido, a densidade (ρ) pode ser calculada para cada ponto ao longo do perfil radial da amostra, onde μ_l foi determinado. Por isso, a calibração do sistema pode ser feita através da determinação do coeficiente de atenuação da massa do material o qual está sendo estudado (CHAGAS, 2013).

Figura 8 - (A) corte das amostras em dupla serra circular paralela; (B) amostra casca-casca obtida; (C) densitômetro de raios X; (D) suporte metálico utilizado para encaixe das amostras dentro do equipamento

As amostras que originaram o perfil radial do lenho das árvores de eucalipto foram analisadas qualitativamente através do equipamento de raios X digital para obtenção de maiores detalhes dos perfis. Os perfis radiais foram dispostos na câmara de irradiação do equipamento Faxitron X-ray, modelo LX 60, em tempo de exposição igual a 19 segundos, 30 kV e a 83 cm da fonte, sendo estes parâmetros ajustados de acordo com análise prévia (Figura 9A). A capacidade de foco do tubo de raios X inferior a 0,02mm, o alto contraste disponível pelo baixo kV e a cabine com prateleiras de distâncias precisas em relação a cobertura do feixe (Figura 9BC),

permitem a obtenção de imagens com rapidez e alta precisão para determinação de propriedades físicas do lenho como densidade aparente (FAXITRON, 2009).

A imagem é gerada em escala de cinza, onde quanto mais próximo da cor branca, maior o valor de densidade observado. As análises das imagens permitiram uma interpretação precisa da variação radial da densidade e sua relação com a estrutura anatômica da madeira (Figura 9D). As imagens digitais do lenho foram obtidas no Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeira da ESALQ/USP.

Figura 9 - (A) vista geral do equipamento de raios X digital; (B) câmara de irradiação com destaque para as prateleiras e o local de saída dos feixes de raios X; (C) amostras dispostas para análise na câmara de irradiação; (D) perfil radial digital em escala de cinza gerado pelo equipamento

4.6.2 Densidade básica do lenho das árvores de eucalipto

Para determinação da densidade básica pelo método da balança hidrostática (VITAL, 1984), foram retirados discos com aproximadamente três centímetros de espessura em seis porcentagens da altura total do tronco (base, DAP, 25, 50, 75 e 100%) (Figura 10B).

Os discos foram imersos em água até atingirem a completa saturação (Figura 10A). Em seguida, os mesmos foram seccionados simetricamente em quatro partes na forma de cunhas, onde as cunhas opostas livres de imperfeições visíveis a olho nu foram utilizadas, constituindo duas repetições/disco (Figura 10C).

Em seguida, foi obtido, nesta ordem, o peso úmido, imerso e seco em estufa (103 ± 2 °C) das amostras. Após a determinação do volume verde e da massa seca de cada cunha, foi calculada a densidade básica ponderada do lenho (g/cm^3), conforme descrito por Trugilho (2009).

A densidade dos discos do DAP do lenho também foi determinada para posterior verificação do coeficiente de determinação (R^2) entre a densidade ponderada e o valor obtido na posição do DAP.

Figura 10 - (A) discos de todas as alturas imersos em água para saturação; (B) discos com aprox. três cm de espessura em seis porcentagens da altura total do tronco (base, DAP, 25, 50, 75 e 100%); (C) seleção das cunhas opostas para determinação da densidade básica ponderada

4.6.3 Densidade básica do lenho por espectroscopia NIR

A densidade básica do lenho das árvores coletadas também foi determinada através da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Os espectros da madeira sólida foram obtidos dos discos localizados logo abaixo daqueles utilizados para densidade básica do lenho ao longo do tronco (base, 25, 50, 75, 100% da altura total), em três pontos por região (interna, mediana, externa) (Figura 11A) de dez árvores por tratamento, totalizando 1350 (30 amostras x 5 posições longitudinais x 9 pontos amostrados dentro do disco) espectros obtidos. O espectro utilizado para a

geração dos modelos de calibração foi proveniente da média dos nove espectros obtidos para cada disco, a fim de obter um conjunto de dados representativo da variabilidade radial dos discos das diferentes alturas.

Os discos de madeira de *Eucalyptus grandis* foram mantidos em sala climatizada (20 °C, 60% UR) até atingir a umidade de equilíbrio e, em seguida, analisados através do NIR em condições de laboratório. A aquisição espectral com fibras ópticas (Figura 11B) foi realizada no modo de reflexão difusa do NIR na região de 800-2500 nm com uma resolução espectral de 8 cm⁻¹, utilizando o espectrômetro modelo MPA, *Bruker*, associado ao programa OPUS versão 7 (Figura 11A).

Figura 11 - (A) espectrômetro modelo MPA da *Bruker* utilizado no trabalho e (B) aquisição espectral com fibras ópticas de um disco de *Eucalyptus grandis*

Os resultados dos espectros NIR foram explorados (de 1100 até 2500 nm) pela PCA, como um método descritivo de análise. Inicialmente, foram aplicados diferentes pré-tratamentos nos dados espectrais obtidos, como controle, SNV, primeira e segunda derivada e suas combinações. Os dados espectrais do NIR e os dados de densidade básica obtidos em laboratório foram utilizados para desenvolver o modelo de classificação, utilizando o método de análise de regressão PLS-R, com o auxílio do Software *Unscrambler* 9.7 (Camo, AS, Norway). Os critérios para selecionar o modelo de predição foram os valores obtidos para o R² entre os valores observados e preditos da calibração e da validação cruzada, número de fatores PLS, SEC, SECV e o RPD. A análise conjunta de todos estes parâmetros estatísticos permitiu concluir se o modelo gerado foi satisfatório. A análise permitiu, também,

avaliar o desempenho do equipamento na determinação desta propriedade física da madeira.

Após a obtenção do modelo NIR para densidade básica ponderada das árvores estudadas, construiu-se o modelo 2D de variação longitudinal e radial da densidade básica predita a partir dos espectros de todos os discos, através da interpolação dos dados obtidos pelo NIR com auxílio do Software *Scilab* (versão 5.3.1), sendo o script de criação semelhante ao proposto por Hein (2011).

4.7 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto

A caracterização anatômica do lenho das árvores de eucalipto foi feita através da amostragem radial (0, 25, 50, 75 e 100%) dos discos do DAP de cinco árvores/tratamento. De cada posição radial pré-definida foram retirados corpos de prova de 20x20x20 mm.

4.7.1 Dimensões das fibras

A determinação das dimensões das fibras de cada posição radial foi realizada através da confecção do macerado pelo método de Franklin (JOHANSEN, 1940). Os segmentos do lenho foram colocados em tubo de ensaio (ácido acético e peróxido de hidrogênio 120 vol.; 1:1) fechados e mantidos em estufa (60 °C, 48 h). Em seguida, as fibras do lenho foram lavadas em água, coradas em safranina, montadas com glicerina em lâminas de vidro e examinadas sob microscopia de luz, mensurando-se comprimento de fibra no aumento de 10X e largura, espessura de parede e diâmetro de lume no aumento de 40X (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY - IAWA COMMITTEE, 1989) com auxílio do programa de análise de imagem *Image Pro Plus* (Figura 12).

Figura 12 - Avaliação da espessura e diâmetro do lume das fibras do lenho através do software *Image Pro Plus*

4.7.2 Confecção das lâminas histológicas e dimensões dos vasos

Para a confecção das lâminas histológicas, as amostras radiais cortadas foram imersas em água, amolecidos em água à ebulição, fixada em micrótomo de deslize e cortadas em seções transversais (15-20 μm de espessura). Os cortes do lenho foram clarificados (água e hipoclorito de sódio, 1:1), lavados (água destilada, ácido acético 1%), desidratados (série alcoólica, 30-100%), lavados (xilol), corados (safranina) e montados em lâmina de vidro sob lamínula (JOHANSEN, 1940; SASS, 1951). Foram coletadas cinco imagens digitais da seção transversal do lenho/posição radial, com microscópio de luz (aumento de 10x) para posterior caracterização do diâmetro tangencial, área ocupada e frequência dos vasos com auxílio do programa de análise de imagens *Image Pro Plus* (Figura 13) através das eq. 3 e 4:

$$\text{frequência dos vasos} = (\text{n}^\circ \text{ de vasos} / \text{área do xilema}) * 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ de área de vasos} = (\text{área total de vasos} / \text{área do xilema}) * 100 \quad (4)$$

Figura 13 - Avaliação do diâmetro e da área ocupada pelos vasos no lenho através do software *Image Pro Plus*

4.8 Propriedades mecânicas do lenho das árvores de eucalipto

Os ensaios mecânicos compreenderam a avaliação da compressão paralela às fibras (resistência) (Figura 14) e da flexão estática (resistência e rigidez) (Figura 15) do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*.

Figura 14 – (A, B) ensaio de compressão paralela às fibras; (C) aspecto geral do corpo de prova após o ensaio

Figura 15 – (A, B) ensaio de flexão estática; (C) aspecto geral do corpo de prova após o ensaio

Os corpos de prova do lenho foram confeccionados a partir do torete basal (base-DAP), pelo corte da prancha central (dez cm de espessura aprox.), de onde foram cortados os corpos de prova (totalizando 12 corpos de prova/tratamento) para os ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras. Foi utilizada a norma

de avaliação e procedimento de ensaios mecânicos, NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997).

Devido ao comprimento limitado dos toretes, o dimensionamento dos corpos de provas foi reduzido, respeitaram-se as proporções descritas na NBR 7190/97 (ABNT, 1997) para os ensaios de flexão estática (1:1:23) e compressão paralela às fibras (1:1:3).

Os corpos de prova foram cortados, aplainados e dimensionados e, em seguida, levados para câmara climatizada (20 °C, 60% UR) até atingirem o equilíbrio higroscópico (12% umidade, eq. 5).

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão ($F_{c0máx}$) que pode agir em um corpo de prova de área (A) conhecida (eq. 6). A resistência à flexão (f_M) é dada pela máxima tensão ($M_{máx}$) que pode agir no corpo de prova no ensaio de flexão simples, calculado sob a hipótese da madeira ser um material elástico (eq. 7). A rigidez foi obtida pelo Módulo de Elasticidade (E_M) da madeira, determinada pela inclinação da reta secante a curva “carga-deslocamento” gerada no meio do vão (L) e definida pelos pontos ($F_{10\%}$; $V_{10\%}$) e ($F_{50\%}$; $V_{50\%}$) correspondendo a 10 e 50% da carga máxima de ensaio, respectivamente (eq. 8).

Os valores de resistência e rigidez obtidos para as amostras foram corrigidos para o valor de 12% de umidade, conforme recomendação da norma NBR 7190/97. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais, do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA/UNESP.

$$U(\%) = (m_i - m_s / m_s) * 100 \quad (5)$$

$$f_{c0} = F_{c0máx} / A \quad (6)$$

$$f_M = M_{máx} / (b * h^2 / 6) \quad (7)$$

$$E_M = (F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) * L^3 / (V_{50\%} - V_{10\%}) * 4 * b * h^3 \quad (8)$$

Onde:

U= umidade; m_i = massa inicial; m_s = massa seca; b e h = base e altura do corpo de prova, respectivamente; L = comprimento do vão

4.9 Propriedades químicas do lenho das árvores de eucalipto

A composição química do lenho foi realizada através da determinação simultânea dos teores de extrativos totais, de lignina e de cinzas das amostras provenientes do disco do DAP de dez árvores/tratamento. Os discos foram moídos em moinho tipo Willey (*Retsch*, modelo SM100), sendo a serragem obtida classificada através de um conjunto de peneira de 40 e 60 mesh (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1974). Após a classificação, a serragem foi armazenada em frascos hermeticamente fechados devidamente identificados. A determinação do teor absolutamente seco foi realizada de acordo com a norma TAPPI T264 cm-97 (TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 2007), sendo que todas as análises foram realizadas em triplicata.

A determinação do teor de extrativos totais foi realizada através de três extrações consecutivas utilizando como solvente uma mistura de álcool tolueno e álcool etílico (2:1), álcool etílico e água quente, nesta ordem, conforme descrito pela norma TAPPI T204 cm-97 (TAPPI, 2007).

A determinação do teor de lignina Klason (solúvel e insolúvel) foi realizada através de hidrólise ácida com ácido sulfúrico em duas etapas: a primeira em baixa temperatura e alta concentração ácida e a segunda em alta temperatura e baixa concentração ácida. O teor de lignina insolúvel foi verificado pela massa resultante, como descrito na norma TAPPI T222 om-02 (TAPPI, 2007) e o teor de lignina solúvel foi determinado através de espectrofotômetro. Por conseguinte, o teor de holocelulose foi calculado por diferença (eq. 9), conforme descrito na norma T19 m-54 (TAPPI, 2007).

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{Extrativos \%} + \text{Lignina total \%}) \quad (9)$$

O teor de cinzas foi obtido através de forno mufla (*Quimis*) a 600 °C, conforme determinação da TAPPI T211 om-02 (TAPPI, 2007). As análises foram realizadas em parceria com o Laboratório de Química, Celulose e Energia, da ESALQ/USP.

4.10 Determinação de elementos químicos no lenho das árvores de eucalipto

A determinação dos nutrientes no lenho das árvores de eucalipto foi realizada através da obtenção da intensidade das linhas de emissão dos elementos cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), sódio (Na) e fósforo (P) pela espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS).

A otimização das condições de operação do equipamento visando definição de um protocolo de análise da variação radial (medula-casca) de nutrientes no lenho de árvores, foi realizado por meio de ensaios pilotos com as amostras do lenho.

O critério de seleção das amostras mais representativas baseou-se nos resultados obtidos nas análises de densitometria de raios X e avaliação quantitativa dos parâmetros anatômicos do lenho. Foram escolhidas cinco amostras radiais de discos do DAP de diferentes árvores de cada um dos três tratamentos, totalizando 15 amostras.

As amostras foram cortadas em dupla serra circular paralela, conforme metodologia de obtenção de amostras para a densitometria de raios X (vide item 4.6.1), porém com alteração na espessura adotada (nove mm) para garantir que a ablação não ultrapassasse os limites da amostra (Figura 16). Após o corte, as amostras foram coladas com fita dupla face em suporte de polipropileno e levadas para câmara de climatização (20 °C, 60% UR) até entrarem em equilíbrio com o ambiente.

As delimitações das posições radiais foram idênticas à usada na anatomia do lenho, sendo as marcações feitas no próprio suporte da amostra, conforme detalhado na Figura 16. As análises por LIBS foram conduzidas em parceria com o grupo de pesquisa em espectrometria atômica, do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da USP.

As amostras radiais do lenho das árvores de eucalipto foram fixadas em um porta amostra, junto à unidade de ablação, capaz de realizar a translação manual nos eixos X e Y.

Figura 16 - Amostra colada em suporte de polipropileno com as posições radiais (0, 25, 50, 75 e 100%) delimitadas para determinação da intensidade das linhas de emissão dos elementos por LIBS. Em destaque, têm-se a amostra já ensaiada, demonstrando a precisão da ablação pelo laser

Para as análises, foi utilizado um laser Q-Switched Nd:YAG (Brilliant, *QuanteI*) operando no comprimento de onda fundamental (1064 nm), com taxa de repetição de 10 Hz e espectrômetro modelo ESA3000 (LLA *Instruments*) (Figura 17A), sistema óptico com montagem Echelle e detector ICCD (Figura 17B). Este espectrômetro é capaz de adquirir sinais do espectro de emissão na região entre 200 e 780 nm, com capacidade de resolução entre 10000 e 20000. Um telescópio composto de lentes de sílica fundida de 50 e 80 mm foi utilizado para focalização da emissão do plasma na entrada da fibra óptica (1,5 m e 600 μ m) do espectrômetro (Figura 17).

As condições de operação foram ajustadas para 100 pulsos por ponto de amostragem, 100 mJ de energia por pulso, 17,5 cm de distância entre a lente de focalização do laser e a amostra, 2500 de amplificação, 2 μ s de atraso e 5 μ s de integração, em atmosfera de argônio e com sistema óptico de coleta da radiação emitida pelo plasma posicionado a 25° em relação ao eixo de focalização do laser. Um detector de energia equipado com sensor piroelétrico (modelo Fieldmax II-P Coherent) foi utilizado para monitorar a energia dos pulsos (Figura 17).

Para caracterizar a variação dos nutrientes ao longo do lenho, foram amostradas cinco posições radiais (0, 25, 50, 75 e 100% do raio) na direção medula-casca, sendo que para cada posição, foram amostrados três pontos ao longo da largura da amostra, totalizando 15 pontos por amostra. Por fim, foi utilizada a média dos três pontos/posição para análise dos resultados obtidos.

Sabendo-se que a intensidade das linhas de emissão e a presença do elemento tem uma relação direta (SONG; LEE; SNEDDON, 1997; TOGNONI et al., 2002), as tendências observadas foram comparadas com a literatura, permitindo avaliar o comportamento da variação dos elementos ao longo do perfil radial amostrado.

Figura 17 - (A) arranjo geral dos equipamentos que compõem o sistema LIBS, com destaque para o Nd:YAG Laser Brilliant (1), medidor de energia (2) e espectrômetro Echelle (3); (B) vista superior do sistema óptico, com destaque para a lente plano-convexa (4), telescópio (5), fluxo de gás argônio (6) e porta amostra (7)

Os sinais de maior intensidade foram identificados através do software *Esawin* (LLA Instruments GmbH) e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Elementos e principal linha de emissão, em nanômetros (nm), selecionada para análise pelo LIBS

Ca	K	Mg	Na	P
393,366	404,414	279,533	588,995	213,618

Conforme metodologia utilizada por Nunes (2010), Carvalho (2011) e Chagas (2013), os valores da intensidade das linhas de emissão e área de pico obtidos foram corrigidos através da retirada dos sinais médios de emissão das regiões espectrais independentes (BG) encontradas próximas (posição anterior e posterior) às linhas de emissão dos analitos, utilizando-se o software Matlab 7 (versão 7.0.1).

4.11 Análises estatísticas

Foi utilizado o programa JMP para a análise estatística dos dados (SAS INSTITUTE, 1997), sendo medidos os *outliers* e a heterogeneidade de variância. Para análise do incremento em diâmetro do tronco (fevereiro de 2006 a setembro de 2012) e das características do lenho das árvores de eucalipto utilizou-se o delineamento inteiramente aleatorizado. Nos resultados, foi utilizado a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey (a 95% de probabilidade) para avaliar o efeito da fertilização, classe de área basal, posições radiais e longitudinais do tronco e interações. Foram também realizadas as análises de regressões múltiplas (stepwise) para selecionar as variáveis que melhor explicam a densidade aparente média e as características anatômicas.

No caso dos dados obtidos pelo NIR, os resultados foram analisados por meio da análise de componentes principais (PCA). Em relação aos dados obtidos por LIBS, utilizou-se os programas Matlab 7 (versão 7.0.1) para observação inicial dos resultados e a análise de correlação de Pearson (1 e 5% de significância) para verificar o grau de relacionamento entre a intensidade das linhas de emissão dos cinco elementos, densidade aparente e dimensões das fibras, considerando os tratamentos estudados.

Os resultados obtidos neste estudo, com árvores de eucalipto de oito anos, foram comparados com os já obtidos por Sette Junior (2010) para árvores do mesmo experimento, porém com idades inferiores (dois, quatro e seis anos). Esta comparação possibilitou a construção de uma série temporal importante para a determinação da evolução e alterações das características e propriedades do lenho das árvores submetidas à fertilização com K e Na, permitindo-se então discutir os resultados obtidos quanto à disponibilidade potássica e sódica decorrentes da fertilização como estudo base para futura expansão das plantações florestais para regiões do Brasil sujeitas ao déficit hídrico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Diâmetro e volume do tronco das árvores de eucalipto

Os valores de incremento corrente e acumulado do tronco no DAP das árvores de eucalipto nos tratamentos controle, com potássio e com sódio, obtidos pela mensuração dos dendrômetros a cada 14 dias, durante 79 meses, podem ser visualizados na Figura 18A.

Observando-se a Figura 18A, é possível verificar oscilações temporais dos incrementos mínimos e máximos do tronco das árvores de eucalipto. O presente trabalho é uma continuidade dos trabalhos realizados por Sette Junior (2010), o qual realizou as mensurações até fevereiro de 2010, sendo que, a partir deste período as medições foram controladas pela Estação Experimental. É importante ressaltar que, devido à questões estratégicas da Estação Experimental, as mensurações correspondentes ao ano de 2011 ocorreram apenas nos meses de janeiro a maio, agosto e dezembro. Tais dados foram considerados apenas na construção da Figura 18B, já que se trata do incremento acumulado, o que não prejudicou os cálculos.

O *mínimo incremento corrente* do tronco no DAP das árvores correspondeu a períodos onde os valores variam de 0,00-0,09 cm, do 22° mês ao 101° mês de crescimento (Figura 18A). Os períodos que apresentaram esta variação foram: 2006 (meados de agosto e final de outubro, novembro), 2007 (janeiro, final de fevereiro, setembro e outubro), 2008 (julho, início de setembro, novembro e dezembro), 2009 (fevereiro, março, final de abril, início de outubro e de novembro e meados de dezembro), 2010 (início de fevereiro, final de abril, início de julho, agosto, início de setembro, novembro e início de dezembro) e 2012 (julho a início de setembro).

O *máximo incremento corrente* do tronco no DAP das árvores corresponderam a períodos onde os valores variam de 0,04-0,18 cm, do 22° mês ao 101° mês de crescimento (Figura 18A). Os períodos que apresentaram esta variação foram: 2006 (de fevereiro a maio, início dos meses de julho, setembro, outubro e dezembro), 2007 (início dos meses de abril, maio e final dos meses de julho, agosto, novembro), 2008 (início dos meses de fevereiro, final dos meses de março, abril, maio, agosto, outubro e dezembro), 2009 (início dos meses de maio, junho, meados de julho, final de dezembro), 2010 (final do mês de fevereiro e março, início de abril,

maio, final de julho, outubro e final de dezembro) e 2012 (janeiro, final de fevereiro, maio e início de junho).

Os resultados mostram, para todos os tratamentos, maior diferença no crescimento nos períodos de maiores taxas de incremento corrente do tronco, reduzindo significativamente nos períodos de menores taxas de incremento (Figura 18A).

A Figura 18A permite ainda inferir que, de forma geral, as taxas de incremento corrente do tronco das árvores fertilizadas com potássio e sódio são superiores em relação às árvores controle durante os 79 meses de avaliação das faixas dendrométricas. Porém, em alguns períodos, é possível observar que as árvores fertilizadas com sódio mostraram maiores valores de incremento corrente do tronco em relação aos outros tratamentos. Estes períodos aconteceram na sequência de uma queda acentuada no incremento, mostrando uma tendência de rápida recuperação do ritmo de incremento do tronco das árvores com sódio, conforme já descrito para o período de 48 meses por Sette Junior (2010). Além disso, na Figura 18B é possível observar, a partir do início de 2012, uma tendência de aproximação do incremento acumulado do tronco das árvores tratadas com sódio em relação ao potássio.

Além da possibilidade de existir um tempo de resposta diferenciado para as árvores fertilizadas com sódio, outras hipóteses foram levantadas para explicar esta tendência; Battie-Laclau (2013), em estudo conduzido com *Eucalyptus grandis* em área com exclusão artificial de chuva na mesma fazenda experimental, mostra que o conteúdo hídrico no solo no início de 2012 era alto, principalmente nas profundidades entre 150 e 600 cm, o que pode ter favorecido o crescimento neste período. Esta tendência também foi observada por Sette Junior (2010), porém de maneira menos pronunciada.

O incremento inicial do DAP do tronco das árvores de eucalipto indicou, em fevereiro de 2006, valores iniciais de 6,6, 8,3 e 7,5 cm para os tratamentos controle, potássio e sódio, respectivamente, o que mostra que as árvores que receberam fertilizantes, desde o início da experimentação, já apresentavam valores superiores de diâmetro. Esta diferença se mantém até o último mês de mensuração, após 101 meses do plantio, onde o incremento para as árvores controle e fertilizadas com potássio e com sódio assumem, respectivamente, os valores de 13,6, 15,9 e 15 cm.

Figura 18 – (A) incremento corrente e (B) acumulado do tronco no DAP das árvores de eucalipto a cada 14 dias nos tratamentos controle, com potássio e sódio, no período de 79 meses

Os parâmetros diâmetro (cm) e volume (m^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto na etapa inicial (fev. de 2006/ 22º mês após plantio) e final (set. de 2012/ 101º mês após plantio) para os tratamentos controle, potássio e sódio, além dos valores de incrementos acumulados no período total de monitoramento (79

meses) e no período de máximo e mínimo crescimento são apresentados na Tabela 7.

Da mesma forma que os valores do diâmetro do tronco das árvores apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos logo no início do monitoramento, os valores de volume do lenho do tronco também mostraram diferenças; na etapa inicial o volume médio foi de 0,015, 0,030 e 0,025 m³ nos tratamentos controle, potássio e sódio, respectivamente, sendo que o valor final observado foi de 0,175, 0,251 e 0,215 m³ na mesma ordem. Além disso, as árvores fertilizadas com potássio e sódio apresentaram valores de diâmetro e volume estatisticamente superiores em relação às árvores controle logo no início do monitoramento.

Os valores de incremento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto foram de 7,0, 7,6 e 7,5 cm para as árvores controle e fertilizadas com potássio e sódio, respectivamente. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, contudo é importante ressaltar a proximidade entre os valores de incremento do potássio e sódio, o que demonstra uma possível resposta similar entre os fertilizantes (Tabela 7). Esse resultado reflete nos valores observados no incremento em volume, onde os valores observados para as árvores controle e fertilizadas com potássio e sódio foram, respectivamente, 0,160, 0,220 e 0,190 m³, indicando que as árvores fertilizadas foram induzidas à maior formação de lenho.

O incremento acumulado do tronco observado no período de máximo crescimento (IA_{máx}) nas árvores foram de 3,17, 3,66 e 3,64 cm para os tratamentos controle, potássio e sódio, respectivamente, o que representa 50 a 51% do incremento total (Tabela 7). Neste período, destacaram-se os meses de março, abril, maio e setembro de 2006; agosto e novembro de 2007; início de fevereiro e final de dezembro de 2008; final de janeiro e final de dezembro de 2009; março a maio de 2010 e janeiro, fevereiro e maio de 2012, com valores que representam 1,1 a 5,7% do incremento em diâmetro do tronco das árvores no período total monitorado.

O incremento acumulado do tronco durante o período de mínimo crescimento (IA_{mín}) das árvores controle e fertilizadas com potássio e sódio foram, respectivamente, 0,79, 0,83 e 0,85 cm, o que representa 12% do incremento total (Tabela 7). Neste período, destacaram-se os meses de setembro e outubro de 2007, julho, setembro, novembro e dezembro de 2008, fevereiro de 2010 e julho de 2012, com incremento em diâmetro igual a zero. Estes valores de incremento máximo e

mínimo mostram, mais uma vez, uma maior diferença no crescimento nos períodos de maiores taxas de incremento para os três tratamentos, sendo que essa diferença se reduz nos períodos onde as taxas de incremento são menores.

Tabela 7 - Diâmetro (cm) e volume (m³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto na etapa inicial (fev./2006; 22º mês) e final (set./2012; 101º mês) com os respectivos incrementos, no período de 79 meses e nos períodos de máximo e mínimo crescimento, nos três tratamentos de fertilização

Parâmetro	Período	Tratamento		
		Controle	Potássio	Sódio
Diâmetro (cm)	inicial	6,6 a (0,3)	8,3 b (0,8)	7,5 b (0,5)
	final	13,6 a (4,1)	15,9 a (4,1)	15,0 a (4,2)
	incremento	7,0 a (2,2)	7,6 a (3,1)	7,5 a (3,1)
Volume (m ³)	inicial	0,015 a (0,002)	0,030 b (0,005)	0,025 b (0,002)
	final	0,175 a (0,113)	0,251 a (0,150)	0,215 a (0,125)
	incremento	0,160 a (0,129)	0,220 a (0,135)	0,190 a (0,123)
IA _{máx} ¹		3,17 a (0,01)	3,66 b (0,01)	3,64 b (0,01)
IA _{mín} ²		0,79 a (0,01)	0,83 a (0,02)	0,85 a (0,01)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância. ¹incremento acumulado do tronco no DAP no período de máximo incremento; ²incremento acumulado do tronco no DAP no período de mínimo incremento

Os resultados obtidos mostraram que a aplicação de potássio aumentou significativamente o crescimento das árvores em diâmetro, principalmente nos quatro primeiros anos da plantação. Este resultado é semelhante ao encontrado por Laclau et al. (2008), Almeida et al. (2010), Epron et al. (2012) e Battie-Laclau (2013), onde a fertilização potássica aumentou significativamente a produção de biomassa lenhosa.

Segundo Battie-Laclau (2013), o papel desempenhado pelo potássio em inúmeros processos fisiológicos das árvores, como controlar a abertura e fechamento dos estômatos e a ativação de enzimas específicas, resulta no aumento da taxa de crescimento das árvores em relação às árvores controle. Neste sentido, Almeida (2009) discorre que o maior crescimento em diâmetro e volume de madeira observado em *Eucalyptus grandis* foi decorrente do aumento do índice de área foliar ocasionados pela fertilização potássica. O potássio pode ter evitado a senescência precoce das folhas, principalmente nos períodos de déficit hídrico, o que contribuiu para manter a taxa de crescimento mesmo nos períodos de seca.

Com relação à fertilização com sódio em espécies arbóreas a literatura é escassa. Neste sentido, este trabalho assume um papel importante de acrescentar dados quanto a este assunto. Sabe-se que o sódio está envolvido em algumas

reações enzimáticas e que pode estar relacionado ao controle osmótico (NABIL; COUDRET, 2008; TAIZ; ZEIGER, 2009), o que possibilitaria uma possível substituição parcial do potássio pelo sódio, sem que as funções fisiológicas fossem alteradas drasticamente. Destacam-se os trabalhos realizados por Almeida (2009) e Sette Junior (2010) os quais verificaram as respostas satisfatórias da fertilização com Na em *Eucalyptus grandis* com 36 e 38 meses, respectivamente. Em ambos os trabalhos, foram verificados um aumento de mais de 50% na produtividade de madeira em relação às árvores controle. No presente estudo, observou-se que a fertilização sódica teve um efeito significativo no incremento em diâmetro do tronco das árvores, apresentando valores próximos aos observados nas árvores que receberam potássio. Tais resultados corroboram com Almeida et al. (2010) e Epron et al. (2012), os quais acrescentam ainda que, a eficiência do uso da água foi a mesma entre árvores tratadas com potássio e sódio e que houve um aumento significativo da produção primária bruta (PPB) da floresta fertilizadas com sódio. Além disso, Almeida et al. (2010) constataram que no tratamento que combinava K e Na, o crescimento não foi significativamente diferente das árvores que receberam somente K e, por fim, os autores comprovaram a hipótese de que solos pobres em K respondem de forma positiva à fertilização sódica.

Os valores de incremento corrente e acumulado do tronco no DAP das árvores de eucalipto obtidos pela mensuração dos dendrômetros, a cada 14 dias, ao longo de 79 meses, nas classes de área basal 1, 2, 3, 4 e 5, são apresentados pela Figura 19, onde a classe 1 corresponde à classe mais inferior e a classe 5 mais superior. Conforme observado nos resultados anteriores, analisados por tratamento, observa-se pela Figura 19A, períodos onde houve variações temporais dos incrementos mínimos e máximos no tronco das árvores estudadas.

Nos períodos de maiores taxas de incremento, os valores observados mostram, da mesma maneira, maior diferença no incremento corrente do tronco no DAP das árvores para as cinco classes de área basal, sendo que esta diferença é significativamente menor nos períodos caracterizados por menores taxas (Figura 19A). Observa-se que as árvores pertencentes às classes 4 e 5, de maiores dimensões, sofrem maiores reduções (quedas) no período de mínimo incremento (IA_{mín}) quando comparadas com as árvores menores, ou seja, as classes 1, 2 e 3.

O efeito das dimensões das árvores (classes de área basal) pode ser observado logo no início do monitoramento, onde as classes 1, 2, 3, 4 e 5

apresentavam incremento inicial de 5,2, 6,6, 7,6, 8,7 e 9,7 cm. Conforme observado anteriormente, essa diferença se manteve até o último mês de monitoramento (101° mês) com incremento final de 9,1, 12,2, 15,3, 17,1 e 19,1 cm para as classes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Figura 19 – (A) incremento corrente e (B) acumulado do tronco no DAP das árvores de eucalipto a cada 14 dias por classe de área basal, no período de 79 meses

As variáveis diâmetro (cm) e volume (m^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto na etapa inicial (fev. de 2006/ 22° mês após plantio) e final (set. de 2012/ 101° mês após plantio) para as cinco classes de área basal, além dos valores de incrementos acumulados (Figura 19B) no período total de monitoramento (79 meses) e no período de máximo e mínimo crescimento são apresentados na Tabela 8.

Conforme descrito anteriormente para os valores observados no diâmetro do tronco das árvores, verificam-se diferenças nos valores iniciais do volume do lenho do tronco das árvores, com valores de 0,010, 0,015, 0,024, 0,027 e 0,033 m^3 para as classes de área basal 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Da mesma forma, no 101° mês o volume final do tronco das árvores mantém essa diferença, onde as classes de área basal maior (4 e 5) apresentam valores estatisticamente diferentes e superiores as classes 1, 2 e 3, com valores de 0,271, 0,357, 0,068, 0,125 e 0,210 m^3 , respectivamente (Tabela 8).

O incremento do tronco no DAP das árvores de eucalipto, entre o início e o final do monitoramento (101° mês) foi de 3,9; 5,6; 7,7; 8,4 e 9,4 cm para as classes 1, 2, 3, 4 e 5, nesta ordem. Já o incremento em volume do lenho das árvores de eucalipto, durante o mesmo período, foi de 0,058, 0,110, 0,186, 0,244 e 0,324 m^3 para as classes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente, onde houve diferença significativa entre todas as classes de área basal. Este comportamento respeita a curva de tendência do crescimento em diâmetro do tronco de eucalipto, onde as árvores apresentam altas taxas de incremento no período inicial seguido por um período de estabilização com o avanço do tempo como consequência do aumento da competição de fatores como água, luz e nutrientes. Além disso, observa-se que as árvores de maiores dimensões acabam apresentando um maior potencial para assimilação dos fatores necessários para seu crescimento, conforme observado na Figura 19 (SETTE JUNIOR, 2010). Contudo, para um manejo florestal adequado e produtivo é necessário manter maior homogeneidade no decorrer do crescimento das árvores.

O incremento acumulado do tronco observado no período de máximo crescimento ($\text{IAM}_{\text{máx}}$) nas árvores das classes 1, 2, 3, 4 e 5 foi de 1,92, 3,02, 3,93, 4,53 e 4,80 cm, respectivamente, o que por sua vez representa de 51 a 53% do incremento total (Tabela 8). O incremento acumulado do tronco durante o período de mínimo crescimento ($\text{IAM}_{\text{mín}}$) das árvores foi de 0,60, 0,83, 1,03, 1,20 e 1,17 cm, representando de 10 a 13% do incremento total (Tabela 8). Estes resultados

demonstram, mais uma vez, a diferença significativa nos períodos de maiores taxas de incremento e que as árvores de maiores classes destacam-se das árvores de menores classes (1,2 e 3).

Tabela 8 - Diâmetro (cm) e volume (m³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto na etapa inicial (fev./2006; 22º mês) e final (set./2012; 101º mês) com os respectivos incrementos, no período de 79 meses e nos períodos de máximo e mínimo crescimento, nas cinco classes de área basal

Parâmetro	Período	Classes de área basal				
		1	2	3	4	5
Diâmetro (cm)	inicial	5,2 a (0,5)	6,6 b (0,4)	7,6 c (0,4)	8,7 d (0,4)	9,7 e (0,5)
	final	9,1 a (1,7)	12,2 b (1,9)	15,3 c (2,2)	17,1 d (2,5)	19,1 e (2,1)
	incremento	3,9 a (1,7)	5,6 ab (2,1)	7,7 b (2,7)	8,4 b (3,3)	9,4 b (1,9)
Volume (m ³)	inicial	0,010 a (0,002)	0,015 b (0,001)	0,024 c (0,003)	0,027 c (0,002)	0,033 d (0,003)
	final	0,068 a (0,032)	0,125 b (0,042)	0,210 c (0,068)	0,271 d (0,112)	0,357 d (0,110)
	incremento	0,058 a (0,030)	0,110 ab (0,054)	0,186 bc (0,079)	0,244 cd (0,009)	0,324 d (0,127)
IA _{máx} ¹		1,92 a (0,02)	3,02 b (0,03)	3,93 c (0,03)	4,53 cd (0,03)	4,80 d (0,04)
IA _{min} ²		0,60 a (0,01)	0,83 a (0,01)	1,03 ab (0,02)	1,20 b (0,02)	1,17 b (1,17)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância. ¹incremento acumulado do tronco no DAP no período de máximo incremento; ²incremento acumulado do tronco no DAP no período de mínimo incremento

As condições climáticas como disponibilidade hídrica e temperatura influenciaram no crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*, as quais apresentaram sazonalidade de crescimento em diâmetro do tronco. Esta situação também foi descrita por Downes, Beadle e Worledge (1999); Laclau et al. (2005); Drew et al. (2008, 2009) e Sette Junior (2010). Para Fahn et al. (1981), a periodicidade da atividade do câmbio que controla o ritmo de crescimento da planta, pode ser ainda influenciada pelo fotoperíodo, além dos fatores endógenos característicos de cada espécie (MARCATI; ANGYLOSSY; EVERT, 2006). Da mesma maneira e conforme descrito anteriormente, há efeito significativo dos tratamentos silviculturais, como a fertilização mineral.

As condições climáticas favoráveis como maior disponibilidade de água, maiores temperaturas e horas de luz/dia observados, principalmente, nos meses de janeiro a março e setembro a dezembro (Figura 20) refletem nos valores observados de máximo incremento do tronco neste período. Epron et al. (2012) explicam que o efeito positivo do potássio, na eficiência de transpiração na produção de lenho, durante o segundo ano de crescimento, não foi resultado do aumento da eficiência

no uso da água pelas folhas e sim do aumento da alocação da biomassa na madeira de *Eucalyptus*.

O estágio fenológico das árvores durante este período favorável (limbo expandido, copa bem formada e folhas maduras) é resultado da produção de hormônios e carboidratos que, ao serem deslocados pelo floema, acarretam maiores divisões celulares da camada do câmbio e do diâmetro do tronco (SETTE JUNIOR, 2010). Entretanto, no início dos períodos desfavoráveis, como no mês de maio (Figura 20), onde há uma redução da pluviosidade e das temperaturas, a taxa de crescimento pode ser considerada ainda elevada, pois é resultado da disponibilidade de água armazenada nas camadas mais profundas do solo, decorrente dos períodos mais chuvosos (LACLAU, 2010; BATTIE-LACLAU, 2013). Conforme essa redução na pluviosidade se agrava e a temperatura cai, as árvores podem entrar em estado de déficit hídrico, como nos meses de julho e agosto (Figura 20), onde estratégias como redução das células formadas, queda na condutância estomática e consequente redução da capacidade fotossintética (BATTIE-LACLAU, 2013) podem ocorrer, resultando em incremento mínimo.

Figura 20 - Precipitação e temperatura média na área experimental, no período de 79 meses

A relação entre o incremento do tronco no DAP das árvores de eucalipto e a variável climática precipitação é mostrada na Figura 21. Da mesma forma, Wimmer, Downes e Evans (2002), Drew e Pammenter (2007), Drew et al. (2008, 2009) e Sette Junior (2010) mostraram essa relação, citando que a precipitação explica mais de 50% da variação total do incremento em diâmetro do tronco.

É possível observar que, nos períodos como fevereiro de 2007, 2010, 2011 e 2012 e fevereiro e dezembro de 2009, os níveis de precipitação são altos (ultrapassando valores de 150 mm de chuva/dia em alguns casos) e mesmo assim o crescimento em DAP é baixo para aquele dado período. Laclau et al. (2005) e Sette Junior (2010) observaram uma redução do crescimento de *E. grandis* dois meses após o início das primeiras chuvas dos meses de novembro e dezembro (meses caracterizados por alta pluviosidade), sendo esta redução interpretada como uma alocação preferencial dos nutrientes e carboidratos na formação de novas folhas, raízes finas e nos meristemas apicais, em detrimento do meristema cambial do tronco. Além disso, períodos de alta pluviosidade podem afetar alguns processos fisiológicos, como a fotossíntese, a absorção e translocação de nutrientes e a respiração das raízes, prejudicando o crescimento das árvores (SETTE JUNIOR, 2010; POSADA; SCHUUR, 2011).

Ao contrário desta situação, há períodos como abril e maio dos anos 2006, 2007 e 2010 onde se podem verificar altos valores de crescimento e poucas chuvas (Figura 21). A observação do perfil do conteúdo de água no solo demonstrado por Battie-Laclau (2013), na mesma fazenda experimental, até seis metros de profundidade torna possível inferir que durante os períodos de déficit hídrico, as árvores do presente estudo mantiveram o crescimento pois foram capazes de ter acesso à água das camadas mais profundas (300 a 600 cm).

Comportamento semelhante também foi observado por Valenziano e Scaramuzzi (1967), Sette Junior et al. (2009), Laclau et al. (2010), Sette Junior (2010) e Battie-Laclau (2013). Dye (1996), em experimento de redução artificial de chuva, mostrou que as árvores de *E. grandis* de três e nove anos de idade apresentaram déficit hídrico moderado pois, com o aumento da alocação de carbono nas raízes, tornou-se possível a captação de água pelas mesmas em profundidade de oito metros aproximadamente.

Entretanto, é importante salientar que as variações temporais de incremento são influenciadas por outros fatores, principalmente àqueles inerentes às folhas.

Battie-Laclau (2013) realizou análises profundas de parâmetros foliares relacionadas com o déficit hídrico; a autora explica que durante as estações secas em áreas fertilizadas com potássio, as folhas são capazes de otimizar seu ajuste osmótico, no intuito de manter a turgescência das folhas em baixas condições de teor hídrico foliar. O ajuste osmótico é um mecanismo importante para tolerância à seca, que permite conservar o gradiente de potencial necessário para a absorção de água no solo, para a turgescência celular durante o déficit hídrico do solo e o déficit de pressão de vapor para manter os processos metabólicos das plantas (BLUM, 1996).

Esta alta sensibilidade estomática permite, às árvores, uma adaptação rápida e eficiente às mudanças restritivas do clima e uma recuperação rápida de taxas elevadas de trocas gasosas, assim que se iniciam os meses mais chuvosos (WHITEHEAD; BEADLE, 2004; BLEBY; COLQUHOUN; ADAMS, 2012). A autora mostra também que várias espécies do gênero *Eucalyptus* são capazes de apresentar uma diminuição no potencial osmótico e/ou na elasticidade das paredes celulares, em resposta ao déficit hídrico.

Deve-se ressaltar que outros fatores como dilatação/contração da casca em função da umidade do ambiente podem estar relacionados, porém não foram quantificados no presente estudo.

Figura 21 - Média do crescimento em diâmetro (cm) das árvores de todos os tratamentos e a precipitação durante os 79 meses de mensuração dos dendrômetros

Durante os períodos de mínimo crescimento do tronco das árvores, bem demarcados principalmente em meados de julho e agosto de todos os anos de monitoramento, a precipitação foi limitante, apresentando valores médios e acumulados variando entre 3 e 20 mm, respectivamente (Figura 21). Este comportamento também foi observado por Marien e Thibout (1980), Fahn et al. (1981), Deslauriers et al. (2003), Sette Junior et al. (2009, 2010).

Durante os sete anos de mensuração das faixas dendrométricas, os meses de julho e agosto apresentaram a primeira ou a segunda quinzena do mês sem chuvas. Estes meses podem ser considerados como períodos de déficit hídrico para as árvores de *Eucalyptus grandis*, conforme descrito por Almeida (2009) em estudo conduzido no município de Itatinga/SP, os quais verificaram que estes dois meses constituem o período de maior deficiência de água no solo, refletindo no crescimento das árvores. Estes resultados reafirmam a grande capacidade do gênero *Eucalyptus* em manter a produtividade frente a diferentes condições climáticas em regiões tropicais, onde os principais fatores que podem limitar seu crescimento são os nutrientes e a disponibilidade hídrica.

Battie-Laclau (2013) conclui que o *Eucalyptus grandis* não é uma espécie isohídrica (em que o potencial hídrico foliar permanece constante e elevado nos períodos secos) nem anisohídrica (em que o potencial hídrico foliar diminui acentuadamente nos períodos secos). Na verdade, a autora diz que o *E. grandis* apresentou um comportamento intermediário, definido como isohidrodinâmico (FRANKS et al., 2007; CALLISTER et al., 2008) pois demonstrou diferenças relativamente constantes entre as flutuações sazonais de potencial hídrico de base e mínimo, permitindo manter taxas fotossintéticas relativamente altas e, consequentemente o crescimento, durante períodos de déficit hídrico moderado.

Diante de todo o exposto e na tentativa do presente estudo em dar subsídio para expansão de plantações florestais em áreas que apresentam períodos com déficit hídrico, sugere-se que a fertilização potássica e sódica pode minimizar os efeitos da baixa disponibilidade hídrica, tornando as plantações viáveis. Contudo, é importante salientar que os resultados obtidos são descritos para a área de estudo, sendo necessários estudos prévios para outras regiões de características edafoclimáticas diferentes.

5.2 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto

5.2.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X

A densidade aparente média, mínima e máxima do lenho do tronco no DAP das árvores de eucalipto com 101 meses, segundo os tratamentos controle, potássio e sódio, é apresentada na Tabela 9.

Constatou-se diferença significativa entre a densidade aparente média das árvores controle entre relação às fertilizadas com K e Na. Este resultado corrobora com o observado no item 5.1, onde foi verificado forte efeito da aplicação de potássio e sódio no incremento em diâmetro e volume do tronco.

Além disso, é possível verificar proximidade dos valores de densidade aparente do tratamento potássio em relação ao sódio, com diferença inferior a 0,02 g/cm³. A comparação deste resultado com Sette Junior (2010) mostra que esta pequena diferença manteve-se, mesmo com o avanço da idade das árvores.

Os valores médios de densidade aparente mínima e máxima do lenho para todos os tratamentos variaram entre 0,30 e 0,34 g/cm³ e 0,88 e 0,90 g/cm³, respectivamente. Essa amplitude de variação da densidade aparente detectada permite afirmar que há alternância de faixas de crescimento no lenho das árvores estudadas (Figura 22). Esta constatação só é permitida devido a precisão do equipamento de densitometria de raios X realizada com intervalos de leitura igual a 0,04 mm.

Tabela 9 - Densidade aparente média, mínima e máxima (g/cm³) do lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por tratamento de fertilização

Tratamento	Densidade aparente (g/cm ³)		
	Média	Mínima	Máxima
Controle	0,55 a (0,03)	0,34 a (0,03)	0,88 a (0,07)
Potássio	0,53 b (0,04)	0,31 b (0,03)	0,90 a (0,07)
Sódio	0,51 b (0,03)	0,30 b (0,04)	0,88 a (0,07)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p<0,05%)

A média dos valores de densidade aparente do lenho das árvores de eucalipto obtidos neste estudo (0,53 g/cm³) foi igual ao obtido por Sette Junior et al. (2009) para *Eucalyptus grandis* de dois anos. Alzate (2004) e Silva et al. (2004) observaram para árvores da mesma espécie com dez e oito anos, respectivamente,

densidade aparente média do lenho igual a 0,46g/cm³. Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005) em estudo com clones do gênero *Eucalyptus*, obtiveram como média de densidade aparente valores entre 0,51 e 0,54g/cm³. Costa (2011) obteve 0,55 g/cm³ como valor de densidade aparente média para árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, no Distrito Federal. Oliveira et al. (2012) em seu estudo obtiveram densidade aparente média igual a 0,58 g/cm³ para árvores de *E. grandis* com 23 anos.

Diante dos dados apresentados, é possível inferir que a densidade aparente média obtida neste estudo está dentro da amplitude de valores citados pela literatura. Contudo, o material genético e o local de crescimento são fatores que podem ocasionar as diferenças observadas.

Além destes fatores citados, é possível observar também que a diferença de idade influenciou os valores de densidade aparente observados; árvores mais jovens apresentam maiores proporções de madeira juvenil do que de madeira adulta (HILLS; BROWN, 1984). Entretanto, a influência da aplicação de fertilizantes na densidade aparente do lenho é controverso. Destacam-se Vital (1990), Bouvet et al. (1999), Mäkinen et al. (2002) e Tomazello Filho (2006) os quais observaram diferenças significativas ocasionados pela fertilização na densidade aparente do lenho.

A determinação da densidade aparente média, mínima e máxima por classe de área basal não mostrou diferença estatística, conforme observado na Tabela 10. Esta situação permite dizer que a dimensão das árvores de eucalipto estudadas não influenciou a densidade aparente média, resultado também descrito por Sette Junior (2010).

Tabela 10 - Densidade aparente média, mínima e máxima (g/cm³) do lenho das árvores de eucalipto, aos 101 meses, por classe de área basal

Classe de Área Basal	Densidade aparente (g/cm ³)		
	Média	Mínima	Máxima
1	0,52 a (0,03)	0,33 a (0,03)	0,91 a (0,07)
2	0,52 a (0,04)	0,32 a (0,04)	0,90 a (0,07)
3	0,54 a (0,05)	0,32 a (0,05)	0,87 a (0,08)
4	0,53 a (0,04)	0,31 a (0,03)	0,89 a (0,07)
5	0,53 a (0,03)	0,32 a (0,04)	0,88 a (0,06)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

A variação de densidade aparente média, mínima e máxima apresentou-se com valores homogêneos quando analisados segundo o efeito das classes de área basal, com variação de apenas 0,02 g/cm³ entre os valores. Neste sentido, Hills (1968) e Skolmen (1972) observaram a mesma homogeneidade e justificam isso explicando que a densidade aparente média do lenho não é influenciada ou é pouco correlacionada com a taxa de crescimento das árvores de *Eucalyptus*. Entretanto, Sette Junior (2007) e Oliveira et al. (2012) constataram influência do crescimento sobre a densidade aparente.

Carpim e Barrichelo (1984) e Migliorini et al. (1988) mencionam que o diâmetro relaciona-se inversamente com a densidade, ou seja, as árvores de eucalipto de menores diâmetros foram as que apresentaram maiores valores de densidade aparente. Essa relação corrobora com o presente estudo, onde as árvores controle que demonstraram menor crescimento, apresentaram o maior valor de densidade aparente média (0,55 /cm³), conforme visto na Tabela 9.

Os diferentes perfis radiais da densidade aparente do lenho sujeito aos três tratamentos podem ser observados na Figura 22. A determinação detalhada da variação de densidade aparente na direção casca-medula-casca pode ser observada pelos perfis radiais obtidos pelo equipamento de raios X digital (Figura 22-2), o qual evidencia importantes respostas do crescimento das árvores de *Eucalyptus grandis*; podem-se verificar duas regiões bem demarcadas no lenho das árvores, sendo (i) a posição mais interna do lenho, onde se verificam maiores valores de densidade (caracterizados pelos picos e áreas de coloração mais próxima do branco, respectivamente – imagem 1 e 2) definida como medula (posição correspondente ao intervalo de -2 e 2 cm do raio) e (ii) as porções mais externas, ou seja, mais próximas da casca (diâmetro de 11, 13,5 e 14,5 cm nos tratamentos controle, potássio e sódio, respectivamente).

As oscilações dos valores de densidade aparente da região da medula são semelhantes para todas as árvores estudadas, a qual é constituída por um tecido juvenil, friável e sem camadas de crescimento bem demarcadas. Nesta região, foi encontrada densidade aparente mínima e máxima iguais a 0,23-0,47 e 0,53-0,68 g/cm³, respectivamente. Já nas regiões mais externas, as variações também são semelhantes entre os três tratamentos, onde são observadas alternâncias mais pronunciadas entre maiores e menores valores de densidade aparente, o que por sua vez, causa a aparição de camadas (anéis) de crescimento, nítidas nas imagens

obtidas pelo equipamento de raios X digital. A presença de fibras com parede celular mais espessa, acúmulo de parênquima axial, diâmetro do lume reduzido e a menor frequência (n°/mm^2), diâmetro e área de vasos na posição radial mais próxima da casca refletem nos maiores valores de densidade observados nesta região.

Este padrão de variação radial dos perfis de densidade do lenho por densitometria de raios X, caracterizados por maiores valores na região da medula (0,53-0,68 g/cm³), redução e estabilização (0,40-0,53 g/cm³) e aumento em direção à casca (0,63-0,82 g/cm³) é um comportamento também observado por outros autores como Alzate (2004), Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Tomazello Filho (2006, 2008), Sette Junior (2010), Oliveira et al. (2012) e Rodrigues (2013). Além disso, estes autores descrevem que o aumento da densidade na direção medula-casca, aliado a presença intercalada de fibras de maior e menor espessura de parede (zonas mais escuras e mais claras bem demarcadas nas imagens obtidas pelo equipamento de raios X digital) evidencia que a atividade de formação do câmbio é afetada pela sazonalidade das variáveis climáticas, o que acarreta mudanças na qualidade do lenho.

Fonseca e Lousada (2000), Tomazello Filho (2006) e Tomazello Filho et al. (2008) explicam que o maior valor da densidade aparente na medula pode ocorrer devido à presença de amido e de cristais nas células do parênquima e às variações de diâmetro e frequência dos vasos, além da presença de faixas de fibras de parede mais espessas, já que estas características influenciam na atenuação dos feixes de raios X.

Quanto ao uso do equipamento de raios X digital, a técnica demonstrou-se eficiente no estudo da qualidade do lenho, assim como relatado por Mannes et al. (2007), Carvalho et al. (2009) e Keunecke et al. (2012) em análise da qualidade de diversos tipos de materiais biológicos, como sementes e tecidos animais. No caso do lenho, Mannes et al. (2007) explicam que a técnica torna-se mais sensível, já que há aumento dos coeficientes de atenuação dos nêutrons devido à presença de elementos específicos, como o hidrogênio, na composição química da madeira, o que explica a capacidade da técnica em demarcar com clareza a variação radial da densidade.

Diante do exposto, pode-se dizer que o modelo de variação da densidade aparente do lenho das árvores estudadas, com 101 meses, caracteriza-se como um lenho juvenil em transição para adulto.

Figura 22 - Variação radial da densidade aparente (g/cm^3) do lenho das árvores de eucalipto da classe de área basal média dos tratamentos (A) controle, (B) potássio e (C) sódio. A imagem 1 representa o perfil radial escaneado e a imagem 2 o perfil radial obtido pelo equipamento de raios X digital, onde na escala de cinza, quanto mais próximo do branco, maior a densidade

A variação da densidade aparente média, mínima e máxima do lenho das árvores de eucalipto aos 24, 48, 72 e 101 meses mostra um aumento dos valores, independente dos tratamentos de fertilização e significativo para a densidade aparente média do 72° ao 101° mês (Tabela 11).

Segundo Tomazello Filho (2006), Tomazello Filho et al. (2008) e Oliveira et al. (2012), a densidade aumenta conforme há aumento da idade devido, principalmente, às alterações fisiológicas às quais o meristema cambial está sujeito. A sazonalidade do clima influencia na atividade cambial, produzindo camadas de crescimento onde alternam-se a presença de lenho inicial e tardio, onde a principal diferença está na espessura da parede celular (maior no lenho tardio). Neste sentido, é possível inferir que a maior quantidade de lenho tardio, além do maior tempo exposta às adversidades climáticas, fazem com que as árvores com maiores idades apresentem maiores valores de densidade aparente média.

Tabela 11 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, no 24°, 48°, 72° e 101° mês de idade

Idade (meses)	Densidade aparente (g/cm^3)		
	Média	Mínima	Máxima
24	0,48 a (0,03)	0,31 a (0,06)	0,80 a (0,04)
48	0,48 a (0,04)	0,38 a (0,05)	0,81 a (0,04)
72	0,52 b (0,04)	0,37 a (0,06)	0,82 a (0,07)
101	0,53 b (0,02)	0,31 a (0,03)	0,88 a (0,04)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

A análise da relação existente e da ordem de importância entre a densidade aparente média do lenho e as demais componentes (densidade aparente mínima e máxima) foi feita através da análise de regressão múltipla, conforme pode ser visto na Tabela 12. Consideraram-se como repetições os valores médios por posição radial.

Tabela 12 - Análise de regressão múltipla entre a densidade aparente média (variável dependente) e suas componentes densidade aparente máxima e mínima (variáveis independentes), com base nos valores médios por posição radial

Passo	Dmín	Dmáx	R ²
1	58,00	42,00	0,48

a) os valores colocados abaixo das variáveis independentes são os coeficientes estandardizados (betas) e representam a proporção com que cada variável contribui para a determinação da variável dependente, explicada pela regressão; b) o símbolo “—” indica que a variável independente se manifestou NS para o nível de probabilidade de $p < 0,05$

Na regressão Stepwise, a 5% de probabilidade, o modelo de regressão gerado (eq. 10) é capaz de explicar 48% da variação total da densidade aparente média, onde a densidade mínima e máxima são responsáveis por 58% e 42% desta variação, respectivamente.

$$D_{\text{méd}} = 0,1810 + 0,5293 \cdot D_{\text{mín}} + 0,2006 \cdot D_{\text{máx}} \quad (10)$$

Sette Junior (2010) explica que, devido à variabilidade natural da densidade do lenho, o restante da variação da densidade média (52%) ocorre, provavelmente, em função de outros fatores (bióticos e abióticos) e não somente os estudados.

5.2.2 Densidade básica do lenho pelo método da balança hidrostática

Os valores de densidade básica ponderada do lenho, obtidas a partir de amostras referentes à base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total das árvores de eucalipto, com 101 meses, para os três tratamentos de fertilização, são apresentados na Tabela 13.

A densidade básica média do lenho representativa das árvores dos tratamentos controle, potássio e sódio, ao contrário da densidade aparente média do lenho do DAP (item 5.2.1), não apresentaram diferenças significativas. Os valores obtidos foram homogêneos, sendo iguais a 0,47, 0,47 e 0,45 g/cm³ para os tratamentos controle, potássio e sódio, respectivamente.

Tabela 13 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, nos três tratamentos de fertilização

Tratamento	Densidade básica
	g/cm ³
Controle	0,47 a (0,02)
Potássio	0,47 a (0,03)
Sódio	0,45 a (0,03)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Sette Junior (2007, 2010), Trugilho (2009), Sette Junior et al. (2012) e Trevisan et al. (2012), todos em estudo conduzido para determinação da densidade básica em *Eucalyptus grandis*, encontraram valores próximos ao presente estudo. A pequena diferença entre os resultados pode ocorrer pois, segundo Kollmann e Côté (1968), as diferenças na estrutura anatômica e a variada quantidade de extrativos presentes por unidade de volume em razão do genótipo, índice de sítio, tratos silviculturais e, principalmente, às idades diferentes das árvores estudadas refletem nos valores de densidade básica obtidos. A literatura cita que a situação que ocorre, normalmente, é a densidade do lenho aumentar com o avanço da idade das árvores, conforme visto no item 5.2.1.

Kollmann e Côté (1968) afirmam ainda que as condições do clima e a localização geográfica onde árvores se encontram influenciam a densidade do lenho. Neste sentido, Oliveira et al. (2010) verificaram que houve aumento significativo da densidade básica de árvores cultivadas em região que apresenta déficit hídrico em certos períodos do ano. Drew et al. (2009) em estudo conduzido em ambiente com *Eucalyptus* irrigado e não-irrigado, obtiveram árvores com maiores densidades (que os observados) quando provenientes da área com déficit hídrico. Esta situação pode ocorrer em regiões onde a precipitação é menor pois as árvores apresentam um crescimento mais lento, produzindo células da parede mais espessas, refletindo nos maiores valores de densidade.

Com relação à aplicação de fertilizantes e suas consequências para o modelo de variação da densidade básica do lenho, a literatura é controversa; assim, como observado no presente estudo, Sette Junior (2010) não obteve diferenças significativas na densidade básica média de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio aos 48 meses de idade. Outros autores como Vigneron, Gerard e Bouvet (1995) afirmam que a fertilização de árvores de eucalipto cultivados na África, aumentou significativamente os valores obtidos para densidade básica do

lenho. Neste sentido, é de extrema importância estudos que tenham como objetivo compreender melhor os efeitos da fertilização na densidade da madeira, já que o uso de fertilizantes constitui uma realidade das práticas silviculturais em eucalipto e a densidade básica é capaz de fornecer informações sobre as demais características utilizadas para qualificação do lenho, além de ser resultado da integração das propriedades físico-químicas e características anatômicas do lenho, condicionando a madeira a diferentes usos.

A determinação da densidade básica quanto às cinco classes de área basal, também não indicou diferenças significativas, conforme pode ser observado na Tabela 14.

Os valores se distribuíram entre 0,45 e 0,47 g/cm³, o que demonstra homogeneidade entre os valores. Assim como discutido anteriormente para a densidade aparente, a literatura referente à relação entre diâmetro do tronco e a densidade básica do lenho das árvores de *Eucalyptus* é incerta, havendo autores que relatam existir influência e outros afirmando não terem observado relação.

Tabela 14 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto com 101 meses de idade, por classe de área basal

Classe de área basal	Densidade básica
	g/cm ³
1	0,45 a (0,02)
2	0,46 a (0,04)
3	0,47 a (0,03)
4	0,47 a (0,03)
5	0,46 a (0,02)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

A variação da densidade básica ponderada do lenho nas seis posições coletadas (base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total) no tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*, com 101 meses, é apresentada na Figura 23.

Foi verificado efeito estatisticamente significativo das posições longitudinais. O modelo de variação longitudinal da densidade básica do lenho é comum aos três tratamentos, onde verifica-se decréscimo da densidade na posição base-DAP (variação de 0,47-0,49 g/cm³ e 0,44-0,46 g/cm³, respectivamente) e posterior aumento até o ápice (0,47 e 0,48 g/cm³). Os maiores valores observados na base e no ápice das árvores se deve, principalmente, às exigências mecânicas para

sustentar o tronco e a copa devido à ação dos ventos. Deve-se destacar que, as árvores fertilizadas com potássio e sódio tiveram comportamentos semelhantes estatisticamente, porém as árvores fertilizadas com potássio sempre mantêm-se com os maiores valores de densidade em relação ao sódio. Além disso, nas posições referentes à 25, 50 e 75% da altura total, as árvores controle apresentam as maiores densidades. Esse resultado pode ter ocorrido devido ao fato destas árvores sempre terem apresentado os menores crescimentos quando comparado com as árvores fertilizadas, já que menores crescimentos podem acarretar em maiores densidades (conforme descrito anteriormente) devido as características anatômicas e químicas diferenciadas e à maior espessura de parede das fibras (TOMAZELLO FILHO, 2006; ARANTES et al., 2011).

A literatura relata que esse comportamento de decréscimo/estabilização da base-25%, seguido de aumento na posição 25-75% e posterior decréscimo/estabilização a 75-100% da altura total constitui um modelo comum de variação longitudinal da densidade básica do lenho de árvores do gênero *Eucalyptus*, conforme descrito por Barrichelo, Brito e Migliorini (1983), Barrichelo e Brito (1984), Carpim e Barrichelo (1984), Migliorini et al. (1988), Oliveira (1997), Alzate (2004), Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Sette Junior (2007) e Sette Junior et al. (2012).

Figura 23 - Variação longitudinal da densidade básica ponderada (g/cm³) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, aos 101 meses, segundo os tratamentos de fertilização; * significativo ($p < 0,05$)

O estudo da variação da densidade básica do lenho das árvores na direção base-topo é possível mediante a amostragem do lenho ao longo do fuste. Contudo, conforme realizado por Trugilho (2009), a amostragem do disco apenas da posição DAP, pode ser suficiente para prever a densidade básica média de toda a árvore. No presente estudo, esta relação apresentou um coeficiente de determinação de 0,6, demonstrando que a densidade básica obtida no disco retirado do DAP do tronco das árvores de eucalipto é bem representativo da densidade básica ponderada média da árvore. Entretanto, Downes et al. (1997) ressaltam que diferentes formas de amostragens longitudinais no tronco das árvores podem acarretar resultados diferentes nas estimativas da densidade básica do lenho.

A variação da densidade básica ponderada do lenho das árvores de eucalipto aos 24, 36, 48 e 101 meses mostra um aumento dos valores e significativo do 24° ao 101° mês (Tabela 15).

A literatura descreve que, basicamente, com o aumento da idade da árvore, há aumento da densidade básica do lenho. Tomazello Filho (1987) e Sette Junior et al. (2012) descrevem que o aumento da densidade do lenho acontece em função das alterações do meristema do câmbio devido à sazonalidade do clima e das maiores exigências mecânico-fisiológicas, resultantes do processo de crescimento das árvores, onde há aumento da espessura da parede das fibras e redução da frequência de vasos. Da mesma forma, Tomazello Filho (1985b), Trugilho, Lima e Mendes (1996) e Silva et al. (2004) acrescentam que a densidade aumenta conforme há formação de lenho adulto no tronco das árvores de eucalipto, sendo este tipo de avaliação da densidade do lenho ao longo do tempo importante, principalmente, quando se trata de madeiras para uso sólido ou estrutural.

Tabela 15 - Valores médios da densidade básica ponderada (g/cm^3) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, no 24°, 36°, 48° e 101° mês de idade

Idade (meses)	Densidade básica
	g/cm^3
24	0,42 a (0,01)
36	0,43 ab (0,01)
48	0,44 b (0,01)
101	0,46 c (0,01)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

5.2.3 Densidade básica do lenho por espectroscopia NIR

Para determinação da densidade básica através do NIR, foram feitas análises multivariadas de regressão utilizando o PLS no comprimento de onda de 1100 a 2500 nm (Figura 24), onde os melhores resultados de calibração foram encontrados com os dados obtidos (do pré-tratamento) da primeira derivada, seguido pela validação cruzada, já que o número de amostras não foi suficiente para fazer uma validação independente. O número de amostras foi reduzido, visto que houve a retirada de 15 valores considerados *outliers* (Tabela 16).

Figura 24 - Espectros obtidos de todas as amostras de *Eucalyptus grandis* para determinação da densidade básica (g/cm^3) e delimitação das regiões que apresentam harmônicos das vibrações moleculares presentes nos constituintes químicos da madeira

Os espectros obtidos para determinação da densidade básica e a delimitação das regiões referentes aos harmônicos das vibrações moleculares presentes nos constituintes químicos da madeira podem ser observado na Figura 24. Deste modo, reafirma-se o potencial de determinação de propriedades físicas da madeira pelo

NIR, devido à estreita relação entre estas propriedades e a composição química da madeira.

A calibração e validação cruzada correspondente obtida pelo NIR para estimativa da densidade básica ponderada de todos os tratamentos pode ser verificada na Tabela 16. A densidade básica das 148 amostras estudadas apresentou média de valor predito igual a 0,47 g/cm³, sendo observada uma variação de 0,42 a 0,53 g/cm³. O modelo para estimar a densidade básica média das árvores apresentou R² da calibração e da validação cruzada (R²_c e R²_{cv}) igual a 0,73 e 0,68, respectivamente, sendo que o número de fatores PLS e o RPD foram iguais a seis e 1,81, nesta ordem. O erro padrão de calibração e de validação cruzada (RMSEC e RMSECV) foi igual a 0,015 e 0,016, respectivamente, conforme demonstrado pela Tabela 16.

Tabela 16 – Calibração e validação cruzada correspondente obtida pelo NIR para estimativa da densidade básica ponderada de todos os tratamentos

Propriedade	R²_c	R²_{cv}	Fat PLS	SEC	SECV	Outliers	RPD
densidade básica ponderada	0,73	0,68	6	0,015	0,016	15	1,81

R²_c: coeficiente de determinação da calibração; R²_{cv}: coeficiente de determinação da validação cruzada; Fat PLS: número de fatores PLS; SEC: erro padrão da calibração; SECV: erro padrão da validação cruzada; *Outliers*: número de amostras retiradas do conjunto de dados; RPD: relação de desempenho do desvio

A Tabela 17 mostra os valores preditos e o valor observado de densidade básica ponderada para os três tratamentos. Devido ao pequeno número de amostras e, na tentativa de ter toda a heterogeneidade dos valores de densidade dentro do conjunto de dados, determinou-se um único modelo de predição pelo NIR com os dados de todos os tratamentos.

Tabela 17 – Resumo dos valores preditos observados de densidade básica ponderada (g/cm³)

	Db_{obs}	Db_{int}	Db_{med}	Db_{ext}	Db_{medt}
Média	0,47	0,44	0,47	0,49	0,47
sd	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02
mín	0,39	0,36	0,40	0,40	0,42
máx	0,53	0,55	0,58	0,60	0,53
CV(%)	6,69	7,98	7,41	7,42	4,25
N	148	148	148	148	148

Db_{obs}: densidade básica ponderada (g/cm³) de referência obtida em laboratório; Db_{int}: densidade básica ponderada (g/cm³) referente à posição mais interna do disco; Db_{med}: densidade básica ponderada (g/cm³) referente à posição mediana do disco; Db_{ext}: densidade básica ponderada (g/cm³) referente à posição mais externa do disco; Db_{medt}: densidade básica ponderada (g/cm³) média de todas as posições analisadas no disco; sd: desvio padrão; mín: valor mínimo obtido (g/cm³); máx: valor máximo obtido (g/cm³); CV: coeficiente de variação; N: número de amostras

A Figura 25 mostra a distribuição dos dados segundo os tratamentos para mostrar que não houve a presença de grupos, ou seja, os dados distribuíram-se igualmente entre os tratamentos, atingindo toda a heterogeneidade das amostras. Além disso, a diferença de angulação entre a *target line* e a linha de tendência foi pequena, mostrando que a tendência de superestimação e subestimação dos dados foi baixa.

Figura 25 - Relação entre valores de densidade básica ponderada (db – g/cm³) predita pelo NIR e valores referência para cada tratamento. A linha preta mostra a tendência dos dados e a linha vermelha representa a relação ideal entre os dados (*target line*)

Hein et al. (2009a, 2009b) e Viana et al. (2010) obtiveram valores semelhantes para a determinação da densidade básica de *Eucalyptus urophylla* pelo NIR. Contudo, os valores de *outliers* foram menores, variando de 1 a 4 amostras.

Fujimoto et al. (2012) em estudo de determinação da densidade básica pelo NIR para a espécie *Larix kaempferi* em diferentes condições de umidade, encontraram R^2_c igual a 0,82 e R^2_{cv} igual a 0,81. Os autores concluíram que a técnicas NIR é eficiente para determinar a densidade básica independente do teor de umidade da amostra. Gouvêa et al. (2011), determinaram a densidade básica de *Eucalyptus* através de vários métodos não-destrutivos e obtiveram para o NIR R^2_c igual a 0,84, com dez fatores PLS e RPD variando de 1,9 a 2,7. Inagaki et al. (2010) determinaram a densidade básica do *Eucalyptus camaldulensis* de cinco anos de idade e encontraram R^2_{cv} de 0,90 e RPD acima de três. Os autores ressaltam que, quanto maior o número de amostras estudadas melhor o modelo de predição, o que pode justificar as diferenças encontradas entre autores e o presente estudo. Além disso, o fato da determinação da densidade básica ponderada pelo método gravimétrico não ter sido feito exatamente nas mesmas amostras que foram utilizadas para a determinação pelo NIR, refletiu nos valores de RPD e R^2_c encontrados, sendo um pouco abaixo da literatura citada.

Segundo Williams e Sobering (1993) o valor do RPD é o principal parâmetro para determinar se o modelo é satisfatório ou não. Schimleck, Mora e Daniels (2003) afirmam que um RPD maior que 1,5 é considerado satisfatório para predições preliminares na área das ciências florestais, sendo que em programa de melhoramento, Schimleck e Evans (2004) consideram suficiente RPD igual a 2,5. Williams e Sobering (1993) explicam a classificação das calibrações na área de química analítica e citam que RPD entre 2 e 3 é suficiente para predições aproximadas, entre 3 e 5 satisfatória para predição e maior que 5 pode ser usado para aplicação em análise de controle de qualidade. Deste modo, pode-se dizer que o modelo obtido foi satisfatório e adequado para predição dos valores de densidade básica.

5.2.3 Cartografia da densidade básica predita pelo NIR

A boa correlação entre os dados obtidos pelo NIR e os valores de referência, permitiu a construção de modelos 2D que mostram a variação da densidade básica ao longo do tronco estimada pela interpolação dos dados obtidos pelo NIR, para cada um dos tratamentos estudados (Figura 26).

O padrão de variação da densidade básica das árvores de *Eucalyptus grandis* é menos consistente na direção longitudinal em relação ao radial observado no item 5.2.1; a Figura 26 permite a visualização clara da presença de menores valores de densidade na região próxima à medula e maiores mais próximas da casca em todos os tratamentos; situação semelhante é descrita por Ferreira (2013) para árvores do gênero *Eucalyptus*. A amplitude de variação radial da densidade é de 0,450 a 0,470 g/cm³ para os três tratamentos.

Entretanto, na direção longitudinal, é possível observar que a variação da densidade básica foi maior nas árvores controle, seguida pelas árvores fertilizadas com potássio e sódio. Além disso, a densidade varia de forma mais pronunciada nas regiões correspondentes à base, DAP e na posição correspondente a 25% da altura total nos três tratamentos (0,445-0,511 g/cm³ para o controle, 0,450-0,505 g/cm³ para o potássio e 0,437-0,492 g/cm³ para o sódio). Nas posições 50, 75 e 100% a variação ocorre, porém, em menor magnitude. É possível observar ainda que, independente do tratamento, a densidade da madeira decresce até certo ponto e cresce daí até o topo da árvore não obedecendo um padrão uniforme de variação, Este comportamento é descrito por Panshin e Zeeuw (1970), sendo que Barrichelo, Brito e Migliorini (1983) citam ser este modelo o mais comum para árvores do gênero *Eucalyptus*. Hein (2011) obteve um modelo semelhante de variação da densidade básica estimada pelo NIR para *E. urophylla*, onde há decréscimo/estabilização da base-25%, seguido por um aumento na posição 25-75% e decréscimo/estabilização na posição 75-100%.

Leite (2013) avaliou a variação longitudinal das propriedades anatômicas de três espécies de eucalipto e constatou a diminuição dos valores na direção base-topo. Este resultado acontece em função, principalmente, da maior proporção de tecido juvenil no topo, o que por sua vez reflete nos valores de densidade.

Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005) e Sette Junior (2010) e Sette Junior et al. (2012) explicam que as maiores densidades encontradas na base ocorrem em

função das alterações do meristema cambial e, estão relacionadas com as fibras de maior espessura de parede, menor diâmetro de lume e maior comprimento e redução da frequência de vasos, condição necessária para a árvore sustentar o tronco, galhos e a copa.

Esta variação da densidade básica, principalmente entre as posições 75 e 100% da altura, também pode ocorrer devido à variação longitudinal e radial do teor de extrativos e lignina totais, conforme descrito por Arantes et al. (2011) para árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, com seis anos de idade.

Figura 26 - Variação longitudinal e radial da densidade básica ponderada (g/cm^3) do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* estimada pelo NIR, segundo os tratamentos avaliados

5.3 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto

5.3.1 Dimensões das fibras

Os valores obtidos para as dimensões das fibras do lenho no DAP do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, segundo os tratamentos de fertilização, são apresentados na Tabela 18.

As maiores fibras foram encontradas no lenho das árvores fertilizadas com potássio, assumindo valor médio igual a 918,37 μm , sendo este tratamento estatisticamente diferente do tratamento controle, com valor de comprimento de fibra médio de 845,66 μm e do tratamento sódio, com valor igual a 838,07 μm . Quanto à largura, o potássio e o sódio foram estatisticamente iguais, sendo diferentes do controle, assumindo valores iguais a 17,67, 18,10 e 17,15 μm , respectivamente. Da mesma forma, para a espessura da parede, o potássio e o sódio foram estatisticamente iguais, sendo estes diferentes do controle, com valores iguais a 3,15, 3,04 e 3,57 μm , respectivamente. Já o diâmetro do lume das fibras do lenho das árvores fertilizadas com potássio, sódio e as árvores controle foram todos estatisticamente diferentes, com valores iguais a 11,38, 12,02 e 10,01 μm , nesta ordem. Deve-se destacar que os maiores valores de largura e diâmetro do lume obtidos foram observados nas fibras do lenho das árvores que receberam a aplicação de sódio. Diante do exposto, pode-se dizer que a aplicação de potássio e sódio nas árvores induziu a formação de parede secundária com menores dimensões.

Tabela 18 - Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por tratamento de fertilização

Tratamento	Comprimento	Largura	Espessura da parede	Diâmetro do lume
	μm			
Controle	845,66 a (174,97)	17,15 a (2,77)	3,57 b (0,91)	10,01 a (2,40)
Potássio	918,37 b (192,47)	17,67 b (3,07)	3,15 a (0,78)	11,38 b (2,94)
Sódio	838,07 a (193,47)	18,10 b (3,71)	3,04 a (0,70)	12,02 c (3,17)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Trugilho et al. (2005) em estudo com clones do gênero *Eucalyptus* com cinco anos e dez meses de idade, verificaram que o valor médio de comprimento das

fibras foi igual a 926 μm . Albino et al. (2012) obtiveram 1000 μm como valor médio de comprimento das fibras de *E. grandis* de 18 anos. Sette Junior (2010), avaliando o efeito da fertilização potássica e sódica no comprimento das fibras da mesma espécie com quatro anos, observou valores médios iguais a 886,83, 840,23 μm , respectivamente para cada tratamento, sendo que as árvores controle apresentaram valor médio igual a 870,94 μm . Isso mostra que a variação de idade das árvores influencia os resultados obtidos, onde a presença de lenho juvenil, de transição ou adulto influenciam nas dimensões das fibras, conforme descrito por Tomazello Filho (1987). No presente estudo, as árvores controle apresentaram o maior valor médio de espessura da parede; esta característica está de acordo com o valor de densidade aparente média encontrado (0,55 g/cm^3), sendo também o maior valor entre os tratamentos.

Com relação a largura das fibras e espessura da parede, poucos autores relatam valores semelhantes aos obtidos, sendo que na maioria dos trabalhos observou-se valores menores. Albino et al. (2012) observaram como largura e espessura da parede média das fibras de *Eucalyptus grandis* de 18 anos valores iguais a 16,10 e 4,43 μm , respectivamente.

Quanto ao diâmetro do lume, os valores foram superiores ao relatado pela literatura, sendo que Trugilho et al. (2005) relatam valores iguais ou superiores aos encontrados pelo presente estudo, para árvores de eucalipto, com valores variando de 9,42 a 13,26 μm . Alzate (2004) em estudo com várias espécies de eucalipto, explica que a largura das fibras está relacionada inversamente com a densidade e o diâmetro do lume está relacionado com a largura e espessura da parede das fibras. Portanto, quanto maior a quantidade de espaços vazios, menor será a densidade da madeira obtida. Panshin e De Zeeuw (1980) acrescentam que a idade do câmbio e a influência de fatores externos, como a precipitação sobre a atividade cambial, provocam estas diferenças observadas nos resultados obtidos.

Os altos valores de desvio padrão encontrados para o comprimento das fibras se deve, principalmente, aos efeitos aleatórios do resíduo, assumindo-se como a principal origem de variação, representando entre 35,2 e 55,6% da variação total. Assim como descrito por Lousada (1999) e Sette Junior (2010), tais efeitos aleatórios podem ser oriundos dos tratamentos de fertilização, das classes de área basal, da posição do disco de análise no tronco das árvores, da variabilidade natural da

densidade do lenho, da idade das árvores e de outros fatores não analisados, o que acabam por causar essas variações.

Larson (1964) e Zobel e Van Buijtenem (1989) explicam que o comprimento, largura, diâmetro do lume e, principalmente a espessura da parede das fibras são variáveis que estão envolvidas nos processos fisiológicos de formação do lenho que acontecem de forma independente e indicam que as dimensões das fibras dependem da pressão de turgescência no interior da célula e das auxinas produzidas na copa das árvores, induzindo à maior plasticidade da parede celular através das variações dos ângulos microfibrilares nas diferentes camadas. Com isso, maiores pressões de turgescência e concentração de auxinas induzem à formação de células de maiores dimensões na fase de divisão das células iniciais do câmbio.

Neste sentido, entende-se que a aplicação de fertilizantes influenciou os resultados obtidos para as fibras, uma vez que a pressão de turgescência e a auxina podem mudar com a aplicação destes fertilizantes; o potássio e o sódio influenciam na maior ou menor pressão de turgescência e na formação de maior área foliar da copa das árvores, onde estão concentradas as auxinas (ZOBEL; VAN BUIJTENEM, 1989). Nessas condições, as árvores sintetizando maiores quantidades de açúcares pela fotossíntese, acarretam um aumento da biosíntese de moléculas de celulose, as quais serão incorporadas como microfibrilas na parede secundária, aumentando sua espessura (ZOBEL; VAN BUIJTENEM, 1989). Além disso, segundo Almeida (2009), as diferenças observadas entre os tratamentos podem ocorrer devido à diferenças no padrão de transpiração, sendo que estes padrões estão relacionados à extensão do sistema radicular, à superfície foliar e às variações do controle estomático.

Contudo, conforme citado anteriormente, o efeito da fertilização nas características das fibras do lenho de árvores de eucalipto não tem apresentado um resultado comum entre os autores citados na literatura, havendo autores que verificaram a existência de diferenças estatísticas nas dimensões das fibras do lenho de árvores fertilizadas e outros que dizem não terem verificado influência significativa.

O estudo das dimensões das fibras no lenho das árvores de eucalipto das cinco classes de área basal pode ser verificado na Tabela 19. A avaliação mostra que apenas o comprimento das fibras apresentou diferenças significativas, com valores variando entre 847,98 e 886,40 μm . Observa-se também que os valores para o comprimento aumentam conforme há aumento da área basal. Os valores

observados para largura, espessura da parede e diâmetro do lume das fibras do lenho apresentaram valores que variaram pouco, sendo muito próximos entre si (para cada variável na coluna), demonstrando homogeneidade entre os valores.

Tabela 19 - Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por classe de área basal

Classe de área basal	Comprimento	Largura	Espessura da parede	Diâmetro do lume
	μm			
1	847,98 a (207,61)	17,92 a (3,08)	3,17 a (0,71)	11,57 a (2,76)
2	851,40 a (149,96)	17,34 a (3,08)	3,17 a (0,84)	11,01 a (2,93)
3	865,63 ab (185,36)	17,67a (3,41)	3,19 a (0,73)	11,28 a (3,14)
4	885,44 b (190,66)	17,48 a (3,21)	3,24 a (0,86)	11,00 a (2,94)
5	886,40 b (210,30)	17,55 a (3,16)	3,57 a (0,97)	10,41 a (2,84)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

A literatura que trata da influência do crescimento de árvores fertilizadas sobre as dimensões das fibras do lenho de árvores do gênero *Eucalyptus* é controversa. Pode-se citar Wilkes e Abbott (1983) os quais não verificaram diferenças significativas no comprimento das fibras em relação as classes de área basal de árvores de várias espécies de eucalipto com 40 anos de idade. Da mesma forma, Drew et al. (2009) não verificaram influência da taxa de crescimento nas propriedades mecânicas de *E. globulus*. Entretanto, Sette Junior (2010) verificou que o comprimento das fibras de *E. grandis* de quatro anos de idade apresentou diferenças significativas quando analisadas segundo classes de área basal pré-estabelecidas.

A variação das dimensões das fibras nas cinco posições radiais (0, 25, 50, 75 e 100%) no DAP do tronco das árvores de *E. grandis* aos 101 meses é mostrada na Figura 27.

O comprimento das fibras (Figura 27A) apresenta uma tendência de aumento na direção radial, sendo que os menores valores são observados na medula (672,39, 715,89, 847,01 μm) e os maiores valores observados na região mais próxima da casca (988,03, 1023,42, 1042,32 μm). O tratamento potássio diferencia-se nas regiões correspondentes a 25, 50 e 75% do raio, assumindo valores de comprimento iguais a 847,01, 947,93 e 1032,71 μm , respectivamente. Nestas posições, os tratamentos sódio e controle assumem valores semelhantes, sendo iguais a 706,02, 842,34 e 946,18 μm . Na região correspondente a medula e mais

próxima da casca (0% e 100% do raio) não houve diferença significativa entre os tratamentos.

A largura das fibras (Figura 27C) apresenta valores semelhantes entre os tratamentos em todas as posições radiais de análise. Nas posições correspondentes a 50 e 75% do raio, as árvores fertilizadas com sódio apresentaram fibras mais largas (19,12 e 19,42 μm) compreendendo a região onde o tratamento diferenciou-se estatisticamente do potássio e do controle, sendo que nas demais posições os tratamentos foram estatisticamente iguais.

Com relação à espessura da parede das fibras (Figura 27B), verifica-se, apesar de existir algumas oscilações, uma tendência crescente na direção medula-casca para os três tratamentos. Na região da medula e na posição correspondente a 50% do raio, o tratamento controle é estatisticamente diferente dos demais, apresentando fibras com maior espessura da parede (3,18 e 3,40 μm), seguido pela espessura das fibras do lenho tratado com potássio e sódio os quais assumem valores iguais entre si (2,75 e 2,99 μm , respectivamente). Na posição correspondente a 25% do raio, a espessura da parede das fibras do tratamento controle diminui (3,11 μm), do potássio aumenta (2,94 μm) e do sódio permanecem praticamente igual à medula (2,76 μm). Quanto à posição correspondente a 75% do raio, a espessura da parede das fibras de todos os tratamentos aumentaram (3,85, 3,32 e 3,18 μm). Por fim, na posição mais próxima da casca todos os tratamentos diferem entre si estatisticamente, sendo que o controle assume os maiores valores de espessura da parede (4,30 μm), seguido pelo potássio (3,82 μm) e sódio (3,35 μm).

O diâmetro do lume (Figura 27D), para todos os tratamentos, apresentou uma tendência de aumento nas posições intermediárias do raio, seguido por uma queda. Nas posições 0 e 25% do raio, o controle foi estatisticamente diferente dos demais, assumindo valores iguais a 9,50 e 10,57 μm , nesta ordem. Na posição correspondente a 50, 75 e 100% do raio, todos os tratamentos foram estatisticamente diferentes, onde as árvores fertilizadas com Na apresentaram os maiores diâmetros do lume, com valores iguais a 13,01, 12,77 e 11,52 μm , respectivamente.

Figura 27 - (A) variação radial do comprimento, (B) largura, (C) espessura da parede (D) e diâmetro do lume (µm) das fibras do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, nos três tratamentos de fertilização; *significativo ($p < 0,05$)

A literatura sobre a variação das dimensões das fibras na direção radial do lenho de árvores de diferentes espécies de *Eucalyptus* é vasta, destacando-se Hans, Burley e Williamson (1972), Brasil e Ferreira (1972, 1979), Tomazello Filho (1987), Jorge (1994), Trugilho et al. (2005), Sette Junior (2007, 2010), Sette Junior et al. (2009) e Albino et al. (2012) os quais demonstram que há aumento do comprimento das fibras, na direção medula-casca. Quanto à espessura da parede das fibras, tanto o aumento quanto a redução foram observados, podendo-se citar Tomazello Filho (1987), Oliveira (1997), Rocha et al. (2002), Alzate (2004), Sette Junior et al. (2009) e Sette Junior (2010). Em relação ao diâmetro do lume e largura da fibra, de maneira geral, observa-se resultado semelhante ao apresentado nos trabalhos de Rocha et al. (2002), Sette Junior et al. (2009) e Sette Junior (2010).

A variação média das dimensões das fibras do lenho das árvores de eucalipto, nos três tratamentos, ao longo do tempo é apresentada na Tabela 20.

Todas as variáveis de dimensão das fibras apresentam valores crescentes conforme há avanço da idade das árvores.

O comprimento das fibras variou de 748,17 a 888,68 μm , com diferença significativa entre todos os meses, exceto entre o 48° e 72° mês. Quanto a largura e espessura da parede das fibras, os valores médios mostraram que os meses 24 e 48 (13,24 e 2,00; 13,93 e 2,24 μm , respectivamente) foram estatisticamente diferentes do 72° e 101° mês (16,68 e 3,30; 17,62 e 3,42 μm , respectivamente), os quais são estatisticamente iguais. Em relação ao diâmetro do lume, apenas a média do último mês de análise (11,15 μm) foi estatisticamente diferente dos meses anteriores.

Tabela 20 - Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, nas idades de 24, 48, 72 e 101 meses

Idade (meses)	Comprimento	Largura	Espessura da parede	Diâmetro do lume
			μm	
24	748,17 a (61,04)	13,24 a (1,08)	2,00 a (0,20)	9,22 a (0,74)
48	866,00 b (32,97)	13,93 a (0,82)	2,24 a (0,55)	9,43 a (0,95)
72	867,93 b (45,97)	16,68 b (0,85)	3,30 b (0,63)	9,77 a (0,68)
101	888,68 c (47,84)	17,62 b (0,73)	3,42 b (0,68)	11,15 b (1,17)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

O aumento das dimensões das fibras, principalmente do comprimento, ocorre em função do aumento das células iniciais fusiformes, de onde as fibras se originam. Segundo Tomazello Filho (1987), o comprimento das fibras só estabiliza quando as células do câmbio atingirem comprimento máximo, sendo este o momento que se inicia a formação de madeira adulta. Trugilho, Lima e Mendes (1996) acrescentam que, neste momento, verifica-se que o comprimento das fibras permanece constante na direção medula-casca visto que as células atingiram a maturidade.

Por isso, no presente estudo pode-se dizer que o lenho está em transição, sendo de grande importância a continuação do estudo para verificar a partir de que momento a estabilização ocorrerá, verificando-se a formação de madeira adulta. É possível ainda dizer que o acompanhamento da variação das dimensões das fibras de forma detalhada na direção radial permite que o presente estudo possa esclarecer melhor como a fertilização age sobre o lenho, possibilitando inferir com grande precisão o uso mais adequado para uma determinada madeira de uma árvore cultivada em situação de clima e tratamentos silviculturais semelhantes a este estudo.

5.3.2 Dimensões e frequência dos vasos

Os valores obtidos para as variáveis diâmetro tangencial, frequência e porcentagem de área ocupada pelos vasos no lenho do tronco no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, para os tratamentos estudados, são apresentados na Tabela 21.

O diâmetro dos vasos foi estatisticamente maior no lenho das árvores fertilizadas com potássio e sódio (112,21 e 104,55 μm , respectivamente) quando comparado com as árvores controle (95,11 μm). Em relação a porcentagem de área ocupada pelos vasos e a frequência, apenas o potássio apresentou diferença significativa, assumindo valores iguais a 13,60 e 11 μm , respectivamente.

Tabela 21 - Valores médios do diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por tratamento de fertilização

Tratamento	Diâmetro tangencial	% de área	Frequência
	μm	%	$\text{n}^\circ/\text{mm}^2$
Controle	95,11 a (23,42)	14,72 b (3,23)	16,88 b (5,44)
Potássio	112,21 b (25,56)	13,60 a (2,84)	11,00 a (4,05)
Sódio	104,55 b (23,46)	14,49 b (3,01)	14,05 b (4,25)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Silva et al. (2007) e Albino et al. (2012) encontraram valores superiores para árvores de *E. grandis* com idade entre 10 e 25 anos; entretanto, Sette Junior (2010) encontrou valores muito próximos para árvores de *E. grandis* fertilizadas com K e Na. Segundo o autor, os valores médios para diâmetro tangencial, porcentagem de área ocupada e frequência de vasos variaram entre 106,57-107,40 μm , 10,80-11,46% e 11,41-12,57 vasos/ mm^2 , onde as árvores fertilizadas com sódio sempre assumiram valores menores em relação às fertilizadas com potássio.

Os valores obtidos para as variáveis diâmetro tangencial, frequência e porcentagem de área ocupada pelos vasos no lenho do tronco no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, segundo as classes de área basal, são apresentados na Tabela 22.

Verifica-se que há efeito significativo das classes de área basal para as variáveis relacionadas aos vasos. De maneira geral, existe uma tendência de aumento do diâmetro tangencial, o qual variou de 98,66 a 111,87 μm e uma

tendência de diminuição da frequência, variando de 15,50 a 12,36 μm . Isso mostra que o diâmetro tangencial apresenta uma relação inversa com a frequência de vasos. Com relação a % de área, observa-se valores crescentes até a classe 3 (13,93-15,16%), seguida por uma queda (13,49 e 14,46%).

Tabela 22 - Valores médios do diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com 101 meses, por classe de área basal

Classe de área basal	Diâmetro tangencial	% de área	Frequência
	μm	%	$\text{n}^\circ/\text{mm}^2$
1	98,66 ab (21,37)	13,93 a (2,72)	15,50 a (4,97)
2	95,54 b (18,92)	14,32 ab (3,06)	16,06 a (4,39)
3	104,99 ab (22,33)	15,16 b (3,06)	14,21 a (5,32)
4	108,72 a (26,62)	13,49 a (3,08)	11,77 b (4,70)
5	111,87 a (31,29)	14,46 ab (3,20)	12,36 b (5,28)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Os resultados encontrados são semelhantes ao discutido na literatura; Bamber, Horne e Graham-Higgs (1982) observaram que árvores de *Eucalyptus grandis* de dois anos e meio apresentaram maiores diâmetros e menor frequência de vasos devido a aplicação de fertilizantes. Drew et al. (2009) mostram que árvores fertilizadas, com rápido crescimento apresentam poucos vasos e de grande diâmetro, quando comparadas com as árvores de baixo crescimento. Sette Junior et al. (2009) e Sette Junior (2010) obtiveram resultados semelhantes para árvores de *Eucalyptus grandis* de 24 e 48 meses, respectivamente, fertilizadas com potássio e sódio. Entretanto, Tomazello Filho (2006) relata que não observou diferenças significativas nas variáveis relacionadas aos vasos em árvores de *Eucalyptus grandis x urophylla* que receberam tratamentos de fertilização e irrigação.

A variação radial do diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho do tronco no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, nos três tratamentos de fertilização é mostrada na Figura 28.

Com relação ao diâmetro tangencial dos vasos (Figura 28A), é possível observar uma oscilação dos valores, porém com tendência de aumento dos valores da medula para casca. Os valores próximos à medula são iguais a 73,35 μm para os tratamentos potássio e sódio (estatisticamente iguais neste ponto) e 66,25 μm para o tratamento controle, o qual difere dos demais. Na região próxima à casca, as diferenças estatísticas se mantêm iguais ao início, assumindo valores correspondentes a 132,24, 129,97 e 119,39 μm para os tratamentos potássio, sódio

e controle, respectivamente. Observa-se que em todas as posições, as árvores fertilizadas com K e Na apresentam valores de diâmetro tangencial dos vasos superiores às árvores controle, sendo que nas posições correspondentes a 25 e 75% do raio, todos os tratamentos foram diferentes estatisticamente entre si.

A porcentagem de área ocupada pelos vasos (Figura 28B) apresentou uma tendência de aumento, porém com valores muito próximos entre os tratamentos. Houve diferença significativa nas posições correspondentes a 50 e 100% do raio, onde o tratamento potássio diferiu dos demais, assumindo valores iguais a 13,91 e 14,41%, respectivamente. Na posição 75% do raio, o tratamento controle apresentou o maior valor, correspondendo a 11,55%. Na posição 0 e 25% do raio, todos os tratamentos foram estatisticamente iguais entre si.

Quanto a frequência (Figura 28C), os tratamentos apresentaram um modelo de variação radial muito semelhante entre si, com queda na posição de 25% do raio, seguida por uma suave queda dos valores até a posição 100%. As árvores controle sempre apresentam os maiores valores, seguido pelas árvores fertilizadas com sódio e potássio. Estatisticamente, as árvores controle são diferentes dos demais tratamentos nas posições 0, 50 e 75% do raio, assumindo valores iguais a 24,23, 15,24 e 14,72 vasos/mm², respectivamente. As árvores fertilizadas com potássio apresentam frequência de vaso estatisticamente diferente em todas as posições, exceto na posição 0%, assumindo valores iguais a 10,18, 9,70, 8,70 e 8,84 vasos/mm² nas posições 25, 50, 75 e 100% do raio, respectivamente.

Figura 28 - (A) variação radial do diâmetro tangencial (μm), (B) % de área ocupada e (C) frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 101 meses, nos três tratamentos de fertilização; *significativo ($p < 0,05$)

Da mesma forma que a Figura 28 apresenta a variação radial das variáveis relacionadas aos vasos, a Figura 29 mostra a avaliação qualitativa dessa variação para o tratamento potássio (A e C) e sódio (B e D) na classe de área basal intermediária (classe 3).

Figura 29 - Variação radial do diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses. Classe de área basal média/tratamento de fertilização com potássio (A e C) e sódio (B e D) na posição 50% do raio. As imagens C e D são ampliações (10X) das imagens A e B; escala igual a $500 \mu\text{m}$

Devido à importância nos processos fisiológicos, como condução da água e dos sais minerais e sua influência nas propriedades tecnológicas da madeira, o modelo de variação radial dos vasos, quanto ao diâmetro tangencial, porcentagem de área ocupada e frequência é um assunto muito estudado e bem consolidado. No gênero *Eucalyptus*, vários autores como Bamber, Floyd e Humphreys (1969), Alzate (2004), Trugilho et al. (2005), Tomazello Filho (2006), Silva et al. (2007), Sette Junior et al. (2009), Sette Junior (2010) e Albino et al. (2012) mostram como acontece a distribuição destas variáveis do vaso ao longo do raio, sendo o padrão de variação descrito muito semelhante ao encontrado.

Os valores médios de variação do diâmetro tangencial, porcentagem de área ocupada e frequência dos vasos do lenho das árvores de eucalipto, para cada um dos tratamentos, ao longo do tempo, são apresentados na Tabela 23. Verifica-se um aumento significativo do diâmetro tangencial (variação de 72,46 a 113,10 μm) e da porcentagem de área ocupada (variação de 11,01 a 14,27%) ao longo das idades estudadas, e ao mesmo tempo, observa-se que a frequência diminuiu ao longo do tempo (variação de 19,23 a 12,02 vasos/ mm^2).

Tabela 23 - Valores médios do diâmetro tangencial (μm), % de área e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos do lenho das árvores de eucalipto, nas idades de 24, 48, 72 e 101 meses

Idade (meses)	Diâmetro tangencial	% de área	Frequência
	μm	%	$\text{n}^\circ/\text{mm}^2$
24	72,46 a (3,46)	12,91 b (0,80)	19,23 b (2,61)
48	102,68 b (10,62)	11,01 a (1,27)	12,90 a (0,99)
72	112,58 c (16,83)	13,40 b (1,64)	12,40 a (2,94)
101	113,10 c (10,52)	14,27 b (0,93)	12,02 a (3,12)

Médias seguidas do teste de comparação de médias e desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Silva et al. (2007) em estudo conduzido com *Eucalyptus grandis* de quatro diferentes idades (10, 14, 20 e 25 anos), constataram que o diâmetro tangencial, a porcentagem de área e a frequência de vasos tiveram correlação positiva com a idade, onde maiores idade resultando em maiores diâmetros tangenciais e menores frequências de vasos/ mm^2 . Tomazello Filho (1985b) explica que este comportamento é padrão para as diferentes espécies de eucalipto e ressalta que fatores genéticos e ambientais também influenciam nos valores observados para os elementos de vaso.

5.4 Características anatômicas e a densidade aparente média do lenho

A relação entre as características anatômicas e a densidade aparente média do lenho no DAP do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 101 meses, e sua ordem de importância foi feita através da análise de regressão múltipla, onde foram considerados como repetições os valores médios das cinco posições radiais (0, 25, 50, 75 e 100%), conforme pode ser observado na Tabela 24.

Tabela 24 - Análise de regressão múltipla entre a densidade aparente média (Dméd: variável dependente) e as características anatômicas (variáveis independentes) do lenho das árvores de eucalipto com base nos valores médios das cinco posições radiais

Passos	Comprimento das fibras	Diâmetro do lume	Largura total da fibra	Espessura da parede	Frequência dos vasos	% de área dos vasos	Diâmetro dos vasos	R ²
1	0,63	33,1	31,3	28,7	1,9	1,4	3,2	0,81
2	6,9	-	6,1	15,9	21,1	15,9	34,3	0,81
3	-	-	6,9	15,9	21,4	15,2	40,7	0,81
4	-	-	-	17,4	24,1	18,8	39,4	0,78

a) os valores colocados abaixo das variáveis independentes são os coeficientes standardizados (betas) e representam a proporção com que cada variável contribui para a determinação da variável dependente, explicada pela regressão; b) o símbolo "--" indica que a variável independente se manifestou NS para o nível de probabilidade de $p < 0,05$

A análise dos resultados de regressão múltipla permite dizer que as características anatômicas explicam mais de 80% da variação total da densidade aparente média do lenho, quando considerados os valores obtidos nas cinco posições de amostragem do raio. As variáveis não significativas retiradas na determinação da densidade aparente média, neste caso, foram (i) diâmetro do lume, (ii) comprimento das fibras e (iii) largura total das fibras.

Diante do exposto, selecionaram-se as variáveis espessura da parede (espes.), frequência dos vasos (fr), porcentagem de área ocupada pelos vasos (area) e diâmetro dos vasos (diam) para explicar a densidade aparente média (Dap.méd) do lenho em regressão Stepwise, a 5% de probabilidade, para compor o modelo de regressão (eq. 11), o qual explica 78% da variação total da Dap.méd, com as variáveis citadas representando 17,4, 24,1, 18,8 e 39,4%, respectivamente.

$$\text{Dap.méd} = -0,3051 + 0,1296 * \text{espes} + 0,018 * \text{fr} - 0,032 * \text{area} + 0,006 * \text{diam} \quad (11)$$

A estreita relação entre a densidade e os elementos anatômicos do lenho de eucalipto foi descrita por diversos autores. Segundo Moreira (1999) a fibra é o principal componente que confere elasticidade e resistência à madeira. Contudo a sua estrutura tubular e a constituição polimérica são as principais responsáveis pelas propriedades físicas, mecânicas e químicas.

A análise da estrutura microscópica e dos perfis radiais de densidade aparente, conforme discutido nos itens 5.2 e 5.3 mostram, basicamente, que o perfil radial pode ser dividido em três regiões distintas, sendo a região mais próxima a medula, região intermediária e região mais próxima à casca. Nas três regiões

existem padrões de distribuição das características anatômicas e dos valores de densidade, os quais aumentando na direção medula-casca.

Os resultados obtidos por Sette Junior (2010) e Oliveira et al. (2012) permitem constatar que a densidade aparente obtida pelo equipamento de densitometria de raios X e raios X digital evidencia a estrutura anatômica das camadas de crescimento do lenho, onde é possível observar com maior precisão através da microscopia do perfil, o aumento do diâmetro tangencial dos vasos, a redução da frequência e porcentagem de área ocupada pelos vasos e respectivo aumento da porcentagem de fibras com maior espessura de parede e menor lume, acarretando o aumento da densidade aparente do lenho (representada pelos picos de densidade no perfil radial obtido - Figuras 30, 31 e 32).

Tomazello Filho (2006) e Tomazello Filho et al. (2008) explicam que a sazonalidade cambial, a qual ocorre principalmente em função das condições climáticas, é a principal causa da oscilação da densidade aparente observada nos perfis radiais do lenho. Desta forma, os anéis de crescimento do lenho tardio, onde os vasos são de menor diâmetro e frequência e as fibras são mais espessas, acarretando maiores densidades, são consequências da atividade cambial que está acontecendo em período desfavorável às árvores, ou seja, no período de inverno (junho-setembro), onde ocorrem períodos de déficit hídrico e menores temperaturas. Por isso e, assim como observado na regressão Stepwise, Downes et al. (2000) e Wimmer, Downes e Evans (2002) concluem que a densidade do lenho é resultado direto das dimensões dos vasos e da espessura da parede celular das fibras.

Figura 30 – Perfil radial da densidade aparente e respectiva seção transversal do lenho do tronco de eucalipto e da imagem obtida pelo equipamento de raios X digital, da classe de área basal média do tratamento controle, com destaque para (A,B) a região mais interna e (C,D) a região mais externa; escala igual a 500 μm

Figura 31 – Perfil radial da densidade aparente e respectiva seção transversal do lenho do tronco de eucalipto e da imagem obtida pelo equipamento de raios X digital, da classe de área basal média do tratamento potássio, com destaque para (A,B) a região mais interna e (C,D) a região mais externa; escala igual a 500 μm

Figura 32 – Perfil radial da densidade aparente e respectiva seção transversal do lenho do tronco de eucalipto e da imagem obtida pelo equipamento de raios X digital, da classe de área basal média do tratamento sódio, com destaque para (A,B) a região mais interna e (C,D) a região mais externa; escala igual a 500 µm

5.5 Propriedades mecânicas do lenho das árvores de eucalipto

Os valores médios da resistência (f_M) e rigidez (E_M) na flexão estática, resistência (f_{c0}) na compressão paralela às fibras e valor característico da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, segundo os tratamentos de fertilização são apresentados na Tabela 25.

A resistência à compressão paralela foi maior no lenho das árvores fertilizadas com potássio, com resistência igual a 49,9 MPa e estatisticamente diferente das demais, seguido pelo controle e sódio, os quais apresentaram valores praticamente iguais (39,7 e 39,6 MPa, respectivamente). A diferença estatística manteve-se no ensaio de flexão estática; a resistência a flexão foi de 110,73 MPa para o lenho das árvores fertilizadas com potássio, seguido pelo sódio (84 MPa) e controle (83,91 MPa), onde mais uma vez os tratamentos controle e sódio apresentaram uma diferença muito pequena. Em relação à rigidez, as árvores fertilizadas com potássio apresentaram o maior valor médio, sendo igual a 15756,03 MPa, seguido pelas árvores fertilizadas com sódio (12172,05 MPa) e controle (11929,97 MPa) (Tabela 25).

Sette Junior (2010) observou tendência semelhante, onde as árvores fertilizadas com potássio apresentaram valor médio superior (92,5 e 13116 MPa para f_M e E_M , respectivamente) em relação aos tratamentos controle e sódio no ensaio de flexão estática. Quanto à resistência à compressão paralela, o autor obteve maior valor médio para as árvores controle (44,6 MPa), seguido do potássio e sódio (43,9 e 38,8 MPa), sendo este último tratamento estatisticamente diferente dos demais tratamentos.

Da mesma forma, Berger (2000) e Haselein et al. (2002) observaram que árvores fertilizadas com potássio apresentaram maiores valores de resistência e rigidez na flexão estática. Cruz, Lima e Muniz (2003) e Lobão et al. (2004) encontraram valores semelhantes aos observados para as árvores fertilizadas com potássio, para resistência e rigidez na flexão estática para árvores do gênero *Eucalyptus*, com cerca de oito anos de idade; a resistência encontrada foi de 94 MPa em ambos e a rigidez igual a 15044 e 15275 MPa, respectivamente.

Entretanto, outros autores encontraram valores superiores; Gonçalves et al. (2009) observaram que a compressão paralela às fibras para árvores do gênero

Eucalyptus, com cerca de 70 meses de idade foi, em média, igual a 67 MPa. Scanavaca Jr. e Garcia (2004) em determinação das propriedades mecânicas do *E. urophylla* de 19 anos, constataram que a compressão paralela média foi igual a 64,34 MPa, com amplitude de valores de 42,19 a 84,14 MPa e o módulo de resistência à flexão estática (f_M) apresentou média de 126,65 MPa, com amplitude de 69,13 a 170,08 MPa.

A norma NBR 7190/97 (ABNT, 1997) apresenta valores médios de diversas propriedades mecânicas para diferentes espécies de *Eucalyptus*, onde os valores apresentados estão acima dos valores médios encontrados no presente trabalho.

Tabela 25 - Valores médios da resistência (f_{c0}) à compressão paralela às fibras e resistência (f_M) e rigidez (E_M) à flexão estática e valor característico da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0k}) do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, nos três tratamentos de fertilização

Tratamento	f_{c0} (MPa)	f_{c0k}	f_M (MPa)	E_M (MPa)
Controle	39,7 a (4,3)	38,0	83,9 a (10,3)	11929 a (1358,5)
Potássio	49,9 b (5,7)	41,1	110,7 b (8,5)	15756 b (869,7)
Sódio	39,6 a (4,3)	37,9	84,0 a (9,0)	12172 a (1236,7)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Os diferentes valores encontrados entre a literatura e o presente trabalho acontecem, principalmente, devido às diferenças de idade entre as árvores estudadas. Segundo Raymond e Muneri (2000) e Ballarin e Nogueira (2005), árvores adultas apresentam propriedades mecânicas superiores àquelas com maior quantidade de lenho juvenil, sendo esta característica uma consequência de várias outras propriedades da madeira (KOLLMAN; CÔTÉ, 1968), como maior quantidade de vasos (espaços vazios) e fibras com menor espessura de parede (o que confere menor resistência e rigidez). Além disso, Berger (2000) e Lima e Garcia (2011) afirmam que tratamentos silviculturais, como a fertilização, podem proporcionar significativo aumento dos valores de MOE e MOR.

É interessante observar que nas propriedades caracterizadas anteriormente (densidade e anatomia), as árvores fertilizadas com potássio assumiram os maiores valores para densidade básica e comprimento da fibra, assim como observado para as propriedades mecânicas. Esta relação também foi observada por Scanavaca Jr. e Garcia (2004), Kretschmann (2010) e Sette Junior (2010).

Diante da determinação da resistência à compressão paralela às fibras e, sabendo que os dados apresentaram distribuição normal, foi possível calcular o valor característico, segundo a NBR 7190/97 (ABNT, 1997). O valor característico foi maior nas árvores fertilizadas com potássio, o qual assumiu valor igual a 41,14, seguido pelas árvores controle (38,01) e pelas árvores fertilizadas com sódio (37,99) (Tabela 25). Por isso, pode-se dizer que as árvores fertilizadas com potássio estão enquadradas na classe de resistência C40 e as árvores fertilizadas com sódio e as controle na classe C30.

O uso da classe de resistência permitiu observar que a utilização do potássio na fertilização acarretou o aumento da classe de resistência em relação aos outros tratamentos. Isso comprova que a utilização das classes de resistência permite orientar com maior precisão a utilização final da madeira, especificando o uso mais adequado estruturalmente. Neste sentido, a literatura descreve que madeiras classe C30 podem ser usadas na construção civil em usos leves e estruturais como ripas e tábuas e as madeiras classe C40 em partes secundárias de estruturas e para produção de móveis (ZENID, 2009).

5.6 Propriedades químicas do lenho das árvores de eucalipto

Os valores médios dos extrativos totais, lignina Klason insolúvel, lignina Klason solúvel, lignina Klason total, holocelulose e teor de cinzas do lenho do tronco no DAP das árvores de eucalipto, com 101 meses, segundo os tratamentos de fertilização, podem ser observados na Tabela 26.

Os extrativos totais apresentaram pequena variação entre os tratamentos (2,07-2,87%), sendo o teor das árvores fertilizadas com potássio e sódio estatisticamente iguais. A porcentagem de lignina Klason insolúvel variou de 19,24 a 25,49%, onde o tratamento sódio diferiu estatisticamente do potássio e controle. Na porcentagem de lignina Klason total e de holocelulose, o mesmo comportamento foi observado, porém com uma variação menor (22,19-27,95% e 69,67-75,10%, respectivamente). A porcentagem de lignina Klason solúvel foi maior no lenho das árvores fertilizadas, as quais foram estatisticamente iguais e, conseqüentemente, diferentes das árvores controle. O teor de cinzas foi pequeno, variando de 0,16 a 0,21%, sendo todos os tratamentos estatisticamente iguais (Tabela 26).

Trugilho, Lima e Mori (2003) em estudo conduzido com sete clones de *Eucalyptus grandis*, encontraram uma variação de 4,87 a 7,74% no teor de extrativos totais, 27,93 a 32,75% para lignina Klason insolúvel, 1,18 a 1,76% para lignina Klason solúvel, 29,17 a 34,23% para lignina Klason total e 0,10 a 0,25% no teor de cinzas. Observa-se que todos os valores encontrados pelos autores são maiores que o presente estudo, porém com pequena variação. Brito e Barrichelo (1977) em estudo da composição química de dez espécies de *Eucalyptus*, verificaram que o teor de cinzas do *E. grandis* com 11 anos de idade é um dos menores dentre as espécies estudadas e a porcentagem de lignina Klason total também (26,7%), quando comparado, por exemplo, com o *Eucalyptus urophylla*, de mesma idade (29,8%). Gomide et al. (2005) em estudo conduzido para determinação das características químicas de um clone de *Eucalyptus*, encontraram para porcentagem de lignina Klason insolúvel, solúvel, total e holocelulose valores médios iguais a 25,56, 3,74, 29,30 e 67,19%, respectivamente. Da mesma forma, Alves et al. (2011) encontraram valores próximos ao presente trabalho em estudo conduzido para caracterizar a composição química da madeira de *E. benthamii*, com seis anos de idade, para produção de celulose Kraft.

Desta forma, pode-se dizer que os dados obtidos estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura, sendo que as divergências de valores encontrados se deve, principalmente, às diferenças de idade entre as árvores, visto que na madeira juvenil as características químicas estão sujeitas a grandes variações iniciais, com maiores teores de extrativos e lignina e menores teores de holocelulose que na madeira adulta, onde os valores tendem a ser mais estáveis (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; MORAIS, 2008).

Silveira (2000) em estudo sobre o efeito do potássio no crescimento, nas concentrações dos nutrientes e nas características da madeira juvenil de *E. grandis* cultivadas em solução nutritiva, explica que as progênies estudadas apresentaram comportamentos distintos; duas das quatro progênies demonstraram que quanto maior a concentração de K, maior a porcentagem de holocelulose obtida. O autor explica que a progênie “2” consumiu 45% a mais de K que a progênie “3” para a produção de uma unidade de holocelulose. Este valor foi maior que o obtido para produção de lenho (35%), o que mostra a baixa eficiência do uso do K na progênie “2”, situação mais ainda pronunciada quando analisada junto com a produção de holocelulose. Além disso, o autor explica que as equações de regressão

encontradas mostram que os efeitos da aplicação do K sobre o teor de extrativos assume uma relação inversa, situação semelhante ao encontrado no presente trabalho. Por fim, em relação à lignina, o autor descreve que as progênes não apresentaram um comportamento padrão, pois o aumento na concentração de K causou respostas variadas entre as progênes estudadas.

Tabela 26 - Valores médios dos extrativos totais, lignina Klason residual, lignina Klason solúvel, lignina Klason total, holocelulose e teor de cinzas do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com 101 meses, nos três tratamentos de fertilização

Tratamento	Teor de extrativos totais	Lignina Klason insolúvel	Lignina Klason solúvel	Lignina Klason total	Holocelulose	Teor de cinzas
%						
Controle	2,87 b (1,20)	25,49 a (1,01)	1,97 a (0,24)	27,45 a (0,88)	69,67 a (1,64)	0,16 a (0,03)
Potássio	2,07 a (0,93)	25,14 a (0,85)	2,81 b (0,16)	27,95 a (0,90)	69,98 a (0,61)	0,21 a (0,05)
Sódio	2,71 a (0,33)	19,34 b (0,92)	2,85 b (0,35)	22,19 b (0,86)	75,10 b (0,94)	0,16 a (0,03)

Médias seguidas do desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Segundo Vital (1990), a fertilização em plantações de eucalipto pode ocasionar aumento nos teores de lignina e extrativos e redução no teor de celulose. Andrade et al. (1994) afirmam que o aumento do teor de extrativos observado em árvores de *E. grandis* foi devido à aplicação de calcário no solo.

Gava (2005) estudou a relação da composição química da madeira com as características do solo e afirma que os teores médios de holocelulose e de lignina total apresentam comportamentos distintos em relação às classes de solo e DAP das árvores de *E. grandis*. O autor explica que o teor de holocelulose aumenta e de lignina diminui com o aumento do teor de argila, sendo este comportamento diretamente relacionado com a disponibilidade de água do solo. Segundo Larcher (1975) e Kozlowski (1982), a disponibilidade de água regula a produção de fotoassimilados, como a holocelulose, através da abertura ou fechamento dos estômatos, ou seja, quanto menor o grau de déficit hídrico, mais intenso será o metabolismo do câmbio e maior será a produção de fotoassimilados. Além disso, Zahner (1968) destaca que a lignina é constituinte importante nos tecidos responsáveis pelo transporte de água, portanto essencial para as árvores resistirem ao déficit hídrico. Isso sugere que, árvores sujeitas a estas restrições hídricas,

podem apresentar maior porcentagem de lignina para melhorar a condutividade hídrica. Cosgrove (2002) ressalta que, em situação contrária, a planta deve produzir menos lignina para facilitar o aumento da parede celular e o alongamento das fibras, expandindo as células e aumentando o consumo de água, como consequência do clima favorável ao crescimento.

Deve-se destacar o ineditismo dos resultados da composição química das árvores fertilizadas com sódio, onde mais estudos são necessários. Pouco se sabe sobre o comportamento das propriedades químicas da madeira fertilizadas com este elemento, sendo que o presente estudo pode funcionar como referência para conhecimento inicial sobre o possível uso de madeiras que sofreram o mesmo trato silvicultural para produção de polpa celulósica ou carvão vegetal, por exemplo. Além disso, é importante ressaltar a necessidade do estudo da composição química da madeira em idade mais avançada (com presença de lenho adulto) o que pode alterar os valores observados.

5.7 Intensidade das linhas de emissão dos analitos no lenho das árvores de eucalipto

A média da intensidade das linhas de emissão do Ca, K, Mg, Na e P no lenho das árvores de eucalipto, para os três tratamentos estudados, é apresentada na Tabela 27.

Exceto para K, não houve diferença estatística entre os tratamentos. Considerando-se que a intensidade das linhas de emissão de um determinado elemento tem relação direta com a sua presença na amostra, observa-se que os maiores valores para K e Na ocorrem nas árvores fertilizadas com os respectivos nutrientes. Isso confirma a influência dos tratamentos na constituição do lenho. A intensidade das linhas de emissão do Ca e Mg é maior no tratamento potássio, seguido pelo sódio e controle. Em relação ao P, observa-se, para todos os tratamentos, uma baixa amplitude de variação dos valores, sempre menor no tratamento controle. Estes resultados indicam uma possível interação dos elementos potássio e sódio (provenientes dos respectivos tratamentos) sobre a maior disponibilidade do Ca, Mg e P para as respectivas árvores.

As árvores do tratamento controle, conforme demonstrado anteriormente, apresentaram menor crescimento e menor quantidade de biomassa produzida, o que

pode ter influenciado nos valores de intensidade de emissão obtidos. Tendência semelhante entre os tratamentos foi observada por Laclau, Bouillet e Ranger (2000) e Laclau et al. (2003) em estudo para verificar o acúmulo de biomassa e a dinâmica de nutrientes em plantação de clones do gênero *Eucalyptus* no Congo.

Tabela 27 – Intensidade das linhas de emissão dos analitos de acordo com os tratamentos

	Ca	K	Mg	Na	P
Tratamento	Intensidade das linhas de emissão (u.a.) dos elementos				
Controle	10966,96 a	301,47 a	9294,54 a	897,80 a	98,62 a
Potássio	13325,32 a	470,61 b	10574,44 a	957,84 a	93,91 a
Sódio	11535,80 a	391,24 b	10440,03 a	1023,29 a	98,06 a

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

A variação da intensidade das linhas de emissão dos elementos estudados segundo a posição radial pode ser observada na Figura 33. Em geral, observa-se para todos os tratamentos uma tendência de seu aumento da medula para casca (posição 0 para 100%), com maiores variações e valores a partir da posição 50% do raio. Diante disso, as principais diferenças estatísticas são observadas entre as posições 75 e 100% para o Ca no tratamento controle, para K e Na no tratamento controle e potássio, para Mg em todos os tratamentos e para P no tratamento potássio e sódio.

Observa-se ainda que a intensidade de emissão do Na e do K varia pouco ao longo do raio das amostras, sendo que o K foi o que apresentou maior homogeneidade de aumento da intensidade de emissão em relação às posições radiais. Já o Mg é o elemento que mais variou de acordo com as posições radiais, com queda característica da intensidade de emissão na posição correspondente a 50% do raio em todos os tratamentos.

Chagas (2013), em estudo da variação radial da intensidade de emissão de diversos elementos por LIBS em árvores urbanas, observou seis modelos de variação. Pode-se dizer que o modelo definido como quarto (4º) é o mais próximo do observado no presente estudo, onde o autor relata valores de Cu, Mg e P mais ou menos constantes até próximo dos últimos anos de crescimento, seguido de aumento na posição radial final (próxima à casca).

Figura 33 - Intensidade de emissão de Ca, K, Mg, Na e P nas posições radiais 0, 25, 50, 75 e 100% do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis*, respectivamente; Colunas C, K e Na indicam os tratamentos controle, potássio e sódio, nesta ordem

A literatura especializada reporta que as principais fontes de variação radial da concentração de elementos no lenho de árvores está associada a (i) disponibilidade do elemento no solo (RÖMHELD; MARSCHNER, 1986; WRIGHT et al., 1999), (ii) capacidade da planta em absorver este elemento (FRIED; BROESHART, 1967; NYE; TINKER, 1977; PRENZEL, 1979; POSADA; SCHUUR, 2011), (iii) capacidade de mobilidade radial (translocação) do elemento (HELMISAARI, 1990; NAMBIAR; SANDS, 1993; SETTE JUNIOR et al., 2013) e (iv) função fisiológica desempenhada pelos elementos químicos e da possível competição entre eles (GORDON; JACKSON, 2000; AUGUSTO; BERT, 2005; AUGUSTO et al., 2008).

A média de variação da intensidade das linhas de emissão dos elementos nas amostras de acordo com a posição radial e tratamento é observada na Tabela 28. De maneira geral, pode-se dizer que entre os tratamentos em uma mesma posição, a intensidade de emissão dos elementos assume valores próximos, onde a baixa variação dos valores obtidos para o P é vista em todos os tratamentos e posições.

Houve diferença estatística somente para o K entre os tratamentos controle e potássio nas posições 25, 50 e 100%. Para os demais elementos não foram observadas diferenças significativas entre as médias dos tratamentos nas posições radiais, mesmo quando a intensidade das linhas de emissão dos elementos apresentou grande variação. Considerando-se que os valores observados na Tabela 28 são resultado da interrogação de pontos fixos pré-definidos do lenho através da análise por LIBS (Figura 16), invariavelmente, distintas posições do lenho são avaliadas, constituindo fontes de variação dos resultados. Como exemplo de fontes de variação pode-se citar: lenho tardio, lenho juvenil, cerne e alburno, madeira de reação e características anatômicas e físicas de composição química elementar distintas.

Apesar da ausência de diferenças estatísticas, a influência dos tratamentos fica evidente; exceto na posição 25%, a intensidade de emissão do K é, em média, 16% maior em todas as posições no lenho das árvores que receberam fertilização potássica (Tabela 28). Em relação ao Na, com exceção da posição 100%, a intensidade de emissão do mesmo é, em média, 12% maior em todas as posições no lenho das árvores que receberam fertilização sódica (Tabela 28).

Além disso, no tratamento controle, foi observada, em todas as posições radiais, maior intensidade de emissão do Na em relação ao K. Este resultado pode

estar em consonância com o observado por Sette Junior et al. (2013), em que árvores de *Eucalyptus grandis* plantadas em solo com teores de K limitados, remobilizaram grandes quantidades de Na para desempenhar o papel do K no metabolismo e, possivelmente, suportar sem danos os períodos de déficit hídrico.

Contudo, conforme sugerido por Rosecrance, Weinbaum e Brown (1998), Farroq et al. (2009) e Taiz e Zeiger (2009), o potássio pode assumir algumas funções fisiológicas específicas em culturas agrícolas e florestais as quais nenhum elemento pode suprir completamente, sendo esta a possível causa de haver diferença estatística apenas para o K sempre entre os tratamentos controle e potássio nas posições 25, 50 e 100%.

Independente da posição radial ou do tratamento, observa-se que a intensidade de emissão dos elementos apresentou a seguinte ordem decrescente: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K} > \text{P}$, sendo a intensidade de emissão do Ca cerca de 18% maior em relação ao Mg. Neste sentido, Laclau, Bouillet e Ranger (2000), Corrêa et al. (2007) e Silva et al. (2012) observaram sequências semelhantes para árvores do gênero *Eucalyptus*, todos com sete anos de idade.

Rowell (2005) explicam que Na, K, Mg e P estão mais presentes no alburno do que na casca e o Ca, ao contrário, pode ser encontrado em maiores teores na casca do que no alburno. Entretanto, os autores ressaltam que, o Ca, Mg e K compõem cerca de 80% da composição inorgânica da madeira (teor de cinzas). Estes elementos estão presentes na forma de oxalatos, carbonatos, sulfatos ou ligados à grupos de carboxilas em elementos que contenham pectina. Por isso, os autores deixam claro que a presença e a concentração destes elementos variam amplamente dentro e entre espécies e segundo as condições do ambiente onde a planta está inserida.

Tabela 28 - Variação radial da intensidade das linhas de emissão média dos elementos de acordo com os tratamentos

Posição	Tratamento	Ca	K	Mg	Na	P
		Intensidade das linhas de emissão (u.a.) dos elementos				
0	C	8199,18 a	224,23 a	5616,96 a	840,80 a	90,74 a
	K	12476,28 a	374,28 a	9645,04 a	913,85 a	90,86 a
	Na	10696,30 a	340,43 a	7072,94 a	1048,72 a	88,97 a
25	C	8000,08 a	254,07 a	7008,26 a	790,00 a	94,48 a
	K	12085,16 a	438,71 b	9430,90 a	855,88 a	93,23 a
	Na	9115,80 a	344,52 ab	6826,78 a	914,78 a	96,23 a
50	C	8727,02 a	287,18 a	6482,20 a	783,83 a	91,61 a
	K	11169,78 a	460,95 b	7689,86 a	813,40 a	88,88 a
	Na	9609,36 a	360,35 ab	6576,48 a	850,18 a	87,64 a
75	C	10268,42 a	360,96 a	8752,28 a	902,93 a	97,58 a
	K	13193,20 a	464,52 a	9963,00 a	897,71 a	89,55 a
	Na	11151,08 a	384,80 a	9334,94 a	1078,73 a	86,33 a
100	C	19640,10 a	380,91 a	18613,00 a	1171,42 a	118,69 a
	K	17702,20 a	614,58 b	16143,40 a	1308,38 a	107,03 a
	Na	17106,44 a	526,11 ab	22389,00 a	1224,05 a	131,12 a

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05\%$)

Durante a interrogação de amostras vegetais por LIBS, a vaporização do material pode ser favorecida por características específicas do material analisado, como a densidade, porosidade e rugosidade superficial, propriedades que podem influenciar a interação entre o laser e a amostra e, conseqüentemente, a sensibilidade de captação dos elementos (NUNES, 2010; CARVALHO, 2011).

Sabendo-se desta relação e conhecendo-se a estreita ligação entre a densidade e parâmetros anatômicos da madeira (conforme exposto no item 5.4) e, ainda, na tentativa de aprimorar a interpretação dos resultados obtidos, propôs-se a elaboração de uma matriz de correlação entre as variáveis densidade média aparente, intensidade de emissão dos analitos e variáveis anatômicas das fibras (comprimento, espessura, diâmetro do lume e espessura de parede) do lenho das árvores, nos três tratamentos (Tabela 29). É importante salientar que os dados utilizados para realização da correlação de Pearson foram as médias obtidas para cada qualidade do lenho (densidade e anatomia) e posição radial pré-definida, dentro de uma mesma amostra.

Inicialmente, a análise da Tabela 29 permite inferir que a variável densidade aparente média apresenta correlações coerentes (positivas) com espessura de parede e comprimento de fibra para os tratamentos potássio e sódio, conforme

discutido no item 5.4. Além disso, observa-se altas correlações entre a densidade e K, Mg, Na e P. Contudo, o Ca apresentou correlação significativa com a densidade (0,631) apenas no tratamento com sódio.

Todos os elementos apresentaram altas correlações entre os mesmos, o que sugere a existência de uma forte interação entre eles e comprova as observações feitas na Figura 33, onde existem semelhanças entre o comportamento da distribuição radial dos elementos nos diferentes tratamentos.

Pode-se afirmar ainda que a espessura e o comprimento das fibras apresentaram boas correlações com todos os elementos investigados, principalmente o Ca (Tabela 29). Isso pode ter ocorrido devido à estreita relação entre a constituição química da parede celular dos elementos anatômicos e a presença deste elemento descrita por Stamm (1964) e Sumi et al. (1964). Além disso, Rowell (2005) explicam que o Ca é o principal constituinte da lamela média da parede celular, onde ele está presente na forma de pectato de cálcio; este fato pode explicar as altas correlações observadas entre o Ca e a espessura da parede para o tratamento controle e densidade aparente e comprimento da fibra para o tratamento sódio e controle, respectivamente.

Sabe-se que o Mg funciona como um ativador de determinadas enzimas relacionadas com o metabolismo dos carboidratos e com a síntese de ácidos nucléicos nas células. Já o K e o Na podem desempenham funções semelhantes nos processos fisiológicos das árvores como síntese de proteínas e regulação estomática, conforme exposto anteriormente, sendo encontrados principalmente nos tecidos meristemáticos (MALAVOLTA, 1970). Saka e Goring (1983) estudaram a variação radial dos elementos inorgânicos da madeira de *Picea mariana* Mill e encontraram 15 elementos diferentes, sendo que a maior concentração estava nos anéis de crescimento mais externos. Sette Junior et al. (2013) observaram maiores concentrações de Mg, K e Na nos anéis de crescimento mais externo, ou seja, na região do alburno, área fisiologicamente ativa do xilema responsável pela condução da seiva bruta na direção raiz-copa, onde a atividade metabólica é maior. Em análise paralela, pode-se dizer que no presente estudo a maior intensidade das linhas de emissão dos elementos foram observadas na posição correspondente a 100% do raio, o que por sua vez, corrobora com os resultados dos autores.

Quanto ao P, sua presença é essencial para ativar o uso de açúcares e amido (MALAVOLTA, 1970). Além disso, Malavolta (1970) destaca que, em geral, quando

as árvores atingem 25% da altura total, as mesmas já armazenam 78% das suas necessidades totais de P, situação onde as concentrações deste elemento nos diferentes componentes da árvore são semelhantes. Esta situação, pode explicar o fato de haver pouca variação na intensidade das linhas de emissão do P (Figura 33).

Tabela 29 - Matriz de correlação entre as variáveis densidade aparente média, elementos químicos e características anatômicas das fibras do lenho das árvores de *Eucalyptus grandis* nos três tratamentos

Variável	Tratamento	Dméd	Ca	K	Mg	Na	P	Esp	Dlume	Largfib	Compfib
Dméd	C	.	0,107	-0,043	0,107	0,301	0,379	0,133	0,083	0,230	0,331
	K	.	0,317	0,476*	0,406*	0,451*	0,503*	0,769**	-0,413*	0,107	0,485*
	Na	.	0,631**	0,615**	0,668**	0,626*	0,424*	0,601**	-0,008	0,203	0,629**
Ca	C	.	.	0,492*	0,918**	0,757**	0,529**	0,710**	-0,336	0,483*	0,580**
	K	.	.	0,583**	0,898**	0,697**	0,701**	0,133	0,247	0,408*	0,397*
	Na	.	.	0,860**	0,741**	0,843**	0,368	0,362	-0,262	-0,109	0,399*
K	C	.	.	.	0,580**	0,524**	0,382	0,461*	-0,077	0,449*	0,637**
	K	.	.	.	0,495*	0,570**	0,428*	0,348	0,064	0,356	0,543**
	Na	.	.	.	0,451*	0,731**	0,351	0,417*	-0,287	-0,112	0,401*
Mg	C	.	.	.	.	0,870**	0,573**	0,745**	-0,418*	0,444*	0,618**
	K	.	.	.	.	0,778**	0,689**	0,269	0,144	0,391	0,353
	Na	.	.	.	.	0,707**	0,578**	0,338	-0,162	-0,028	0,545**
Na	C	.	.	.	.	.	0,692**	0,605**	-0,265	0,432*	0,561**
	K	.	.	.	.	.	0,730**	0,442*	-0,168	0,147	0,340
	Na	.	.	.	.	.	0,220	0,347	-0,253	-0,106	0,293
P	C	.	.	.	.	.	.	0,207	0,083	0,315	0,491*
	K	.	.	.	.	.	.	0,437*	-0,305	-0,025	0,323
	Na	.	.	.	.	.	.	0,146	-0,323	-0,239	0,500*
Esp	C	.	.	.	.	.	.	.	-0,555*	0,602**	0,573**
	K	.	.	.	.	.	.	.	-0,582**	0,085	0,561**
	Na	.	.	.	.	.	.	.	0,117	0,454*	0,747**
Dlume	C	.	.	.	.	.	.	.	.	0,330	-0,090
	K	.	.	.	.	.	.	.	.	0,761**	0,037
	Na	.	.	.	.	.	.	.	.	0,938**	0,123
Largfib	C	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,563**
	K	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,493*
	Na	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,371
Compfib	C	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	K	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Na	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Sendo Dméd: densidade aparente média; Esp: espessura da parede celular; Dlume: diâmetro do lume; Largfib: largura da fibra; Compfib: comprimento da fibra; * correlação significativa ao nível de 0,05; ** correlação significativa ao nível de 0,01

Em síntese, pode-se dizer que o uso da técnica LIBS foi eficiente na obtenção de uma visão geral da variação radial dos elementos químicos de interesse nos diferentes tratamentos. Os resultados puderam ser comparados apenas com as

tendências de concentração disponíveis na literatura, uma vez que as metodologias de determinação química empregadas foram diferentes.

Entretanto, Carvalho (2011) explica que mesmo em estudo comparativo entre trabalhos que usaram o LIBS, a observação de semelhanças entre resultados deve ser cuidadosa pois as propriedades intrínsecas do laser (comprimento de onda, duração do pulso, número de pulsos, taxa de repetição, configuração do conjunto óptico de focalização e respectiva fluência), as propriedades da amostra analisada, a atmosfera de ablação e as condições das medidas de emissão óptica (ex: seleção de linhas atômicas e iônicas, tempo de atraso e tempo de integração das medidas, entre outras) podem variar entre estudos, afetando a sensibilidade de captação do elemento por LIBS, o que por sua vez reflete nos resultados. Além disso, a dificuldade do estudo da composição química da madeira, matéria altamente heterogênea e influenciada por fatores internos e externos, deve ser considerada.

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitem concluir que:

- A aplicação de potássio promoveu maiores taxas de incremento em diâmetro do tronco e volume de lenho árvores de eucalipto em relação aos outros tratamentos. Entretanto, a diferença de valores encontrados entre o potássio e sódio é muito pequena, sugerindo a possibilidade da substituição parcial do potássio pelo sódio;

- A influência da fertilização potássica e sódica demonstrada pelo *Eucalyptus grandis* nos períodos de déficit hídrico para região estudada é clara, uma vez que a durante os períodos de baixa pluviosidade a variação sazonal do crescimento apresentou-se de forma diferenciada em relação aos períodos com maior quantidade de chuvas;

- O monitoramento dos dendrômetros e das variáveis climáticas de forma detalhada durante oito anos demonstrou que a variação sazonal do crescimento apresenta sensibilidade, principalmente, à variação dos níveis de precipitação;

- Os valores de densidade aparente observados para as árvores fertilizadas com potássio e sódio foram estatisticamente iguais e diferentes do controle, comprovando o forte efeito da fertilização na densidade. Entretanto, a densidade básica não apresentou alterações significativas entre os tratamentos;

- A determinação da densidade básica pelo NIR demonstrou resultados satisfatórios com R^2 próximo a 0,70;

- A aplicação de fertilizantes minerais alterou significativamente as propriedades anatômicas, onde foi possível observar fibras mais longas e vasos de maior diâmetro, menor frequência e porcentagem de área ocupada nas árvores fertilizadas com potássio e maiores valores de largura e diâmetro do lume e menor espessura de parede das fibras das árvores que receberam fertilização sódica;

- Existe uma relação direta entre a densidade aparente e as propriedades anatômicas do lenho, principalmente com a espessura da parede da fibra e os parâmetros de vasos;

- A aplicação de fertilizantes minerais influenciou as propriedades mecânicas, onde as árvores fertilizadas com potássio apresentaram os maiores valores de resistência e rigidez na flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras;

- As propriedades químicas também foram influenciadas pela fertilização, sendo verificadas maiores porcentagens de lignina total, cinzas e menores teores de extrativos nas árvores fertilizadas com potássio e maiores teores de holocelulose nas árvores fertilizadas com sódio;

- Determinou-se uma tendência clara de maiores quantidades de Ca, K, Mg, Na e P da região mais interna para mais externa (medula para casca), demonstrando que estes elementos estão mais presentes nos tecidos fisiologicamente ativos;

- As árvores que foram fertilizadas com potássio e sódio apresentaram maiores teores de K e Na, respectivamente, demonstrando que a constituição química do lenho sofreu influência da fertilização;

- Todas as mudanças das propriedades do lenho observadas e quantificadas que foram causadas pela fertilização podem direcionar melhor o uso final da madeira;

- Em áreas com condição de déficit hídrico e fertilização semelhante, todos os resultados aqui demonstrados permitem inferir que plantações de *Eucalyptus grandis* podem acontecer sem quaisquer perdas produtivas.

7 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações são apresentadas sugestões para futuras pesquisas fundamentadas nas metodologias aplicadas e nos resultados obtidos no presente estudo. As futuras análises visam ampliar os conhecimentos a cerca da influência da fertilização e dos períodos de déficit hídrico que acontecem na área de estudo. São elas:

- continuação das análises das propriedades do lenho até a fase de estabilização, ou seja, formação de madeira adulta, para verificar possíveis diferenças entre os resultados aqui obtidos;
- aplicação da metodologia de re-escala para os valores de densidade aparente média, dados climáticos e propriedades químicas obtidas pelo NIR e LIBS para melhor correlacionar as propriedades;
- aprofundamento das análises por LIBS, com preparação de pastilhas de madeira das posições radiais, eliminando a variação de densidade da amostra, seguido de nova análise LIBS e comparação dos resultados com o uso de outras técnicas analíticas (e.g. ICP-MS e fluorescência de raios X) para quantificação do teor dos elementos;
- aplicação da análise de isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) para obter informações detalhadas da relação existente entre a condutância estomática nas árvores e as variáveis climáticas ao longo do tempo, para melhor entendimento da sazonalidade de crescimento das árvores;
- uso de modelo ecofisiológicos para melhor explicar a variação do crescimento das árvores de eucalipto em função das condições edafoclimáticas;
- quantificação de parâmetros foliares como condutância estomática e índice de área foliar para melhor entender os mecanismos fisiológicos de adaptação do *Eucalyptus grandis* aos períodos de déficit hídrico.

REFERÊNCIAS

- AERTS, R.; CHAPIN III, F.S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. **Advances in Ecological Research**, Amsterdam, v. 30, p. 1–67, 2000.
- ALBINO, V.C.S.; MORI, F.A.; MENDES, L.M. Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden na qualidade da colagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 803-811, out./dez. 2012.
- ALLEN, C.D. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? **Unasylva**, Rome, v. 60, p. 43-49, 2009.
- ALMEIDA, J.C.R. de. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 112 p. Tese (Doutorado em Silvicultura e Manejo Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- _____; 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-efficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1786-1795, Apr. 2010.
- ALVES, A.; SCHWANNINGER, M.; PEREIRA, H.; RODRIGUES, J. Calibration of NIR to assess lignin composition (H/G ratio) in maritime pine wood using analytical pyrolysis as the reference method. **Holzforschung**, Berlin, v. 60, p. 29-31, 2006.
- ALVES, I.C.N.; GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; SILVA, H.D. da. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 167-174, jan./mar. 2011.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.
- _____; 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.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 11/12, n. 6, p. 17-23, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Chemical analysis of wood charcoal. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, v. 410, p. 257-263, 1974.

ANDRADE, A.M.; VITAL, B.R.; BARROS, N.F.; LUCIA, R.M.D.; CAMPOS, J.C.C.; VALENTE, O.F. Efeitos da fertilização mineral e da calagem do solo na produção e na qualidade da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 18, n. 1, p. 69-78, 1994.

ANDRADE, C.R.; TRUGILHO, P.F.; NAPOLI, A.; QUINHONES, R.; LIMA, J.T. Calibrações NIRS para três propriedades químicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 9-14, jul. 2010. Suplemento.

ANTONY, F.; JORDAN, L.; SCHIMLECK, L.R.; DANIELS, R.F.; CLARK III, A. The effect of mid-rotation fertilization on the wood properties of Loblolly Pine (*Pinus taeda*). **IAWA Journal**, Lieden, v. 30, n. 1, p. 49-58, 2009.

ANTTI, H. **Multivariate characterization of wood related materials**. 1999. 86 p. Thesis (Ph.D. in Applied Mathematics) – University of Umea, Umea, 1999.

ARANTES, M.D.C.; TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; CARNEIRO, A.C.O.; ALVES, E.; GUERREIRO, M.C. Longitudinal and radial variation of extractives and total lignin contents in a clone of *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 283-291, jul./set. 2011.

ARNDT, S.K.; LIVESLEY, J.S.; MERCHANT, A.; BLEBY, T.M.; GRIERSON, P.F. Quercitol and osmotic adaptation of field-grown *Eucalyptus* under seasonal drought stress. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 31, p. 915-924, 2008.

ASHLEY, P.N.; OZARSKA, B. Furnititure from young, plantation eucalypts. In: THE FUTURE OF EUCALYPTUS FOR WOOD PRODUCTS, 2000, Launceston, Tasmania. **Proceedings...** Launceston: IUFRO, 2000. p. 176-184.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013. 148 p.

AUGUSTO, L.; BERT, D. Estimating stemwood nutrient concentration with an increment borer: A potential source of error. **Forestry**, Oxford, v. 78, n. 4, p. 451-455, 2005.

_____; MEREDIEU, C.; BERT, D.; TRICHET, P.; PORTÉ, A.; BOSCH, A.; LAGANE, F.; LOUSTAU, D.; PELLERIN, S.; DANJON, F.; RANGER, J.; GELPE, J. Improving models of forest nutrient export with equations that predict the nutrient concentration of tree compartments. **Annals of Forest Science**, Dordrecht, v. 65, n. 8, p. 1-14, 2008.

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

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

_____; WERKER, E.; FAHN, A. Some ecological trends in vessel characters. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 4, n. 2/3, p. 141-160, 1983.

BAILLÈRES, H.; DAVRIEUX, F.; HAM-PICHAVENT, F. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. **Annals of Forest Science**, Dordrecht, v. 59, p. 479-490, 2002.

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

_____; CURTIN, R.A. Some properties of wood in blackbutt trees of two ages. **Australian Forestry**, Canberra, v. 36, n. 3, p. 226-234, Jan. 1974.

_____; HYMPHREYS, F.R. A preliminary study of some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Journal Institute Wood Science**, Madison, n. 11, p. 63-70, 1963.

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

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

BARAJAS-MORALES, J. Wood structural differences between trees of two tropical forests in Mexico. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 6, n. 4, p. 355-364, 1985.

BARBOSA, L.C.A. **Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos**. Viçosa: Editora UFV, 2007. 189 p.

BARREIROS, R.M.; GONÇALVES, J.L.M.; SANSÍGOLO, C.A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causada pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 103-111, 2007.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel**. Brasília: PRODEPEF; PNUD; FAO; IBDF; BRA, 1976. 145 p. (Série Divulgação, 13).

_____. Variabilidade longitudinal e radial da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 17., 1984. São Paulo **Anais...** São Paulo: ABCP, 1984. p. 84-91.

_____; SHIMOYAMA, V.R.S. Importância da adubação na qualidade da madeira e celulose. In: SÁ, M.E.; BUZETTI, S. (Ed.). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Cone, 1994. cap. 9, p. 153-160.

_____; BRITO, J.O.; MIGLIORINI, A.J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-31, jan./fev. 1983.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. (Ed.). **Nutrition of eucalypts**. Collingwood: CSIRO Publ., 1996. p. 335-355.

_____; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. cap. 4, p. 127-86.

_____; BRAGA, J.M.; BRANDI, R.M.; DEFELIPO, B.V. Produção de eucalipto em solos de cerrado em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 5, n. 1, p. 90-103, 1981.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R. Prediction of the module of elasticity (MOE) in beams of *Eucalyptus* using the longitudinal velocity of ultrasonic waves. **E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics**, Bad Breisig, v. 12, p. 4853-4860, 2007.

BASILE, B.; REIDEL, E.J.; WEINBAUM, S.A.; DEJONG, T.M. Leaf potassium concentration, CO₂ exchange and light interception in almond trees (*Prunus dulcis* (Mill) D.A. Webb). **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 98, p. 185-194, 2003.

BATTIE-LACLAU, P.R.F.B. **Efeitos da adubação potássica sobre a adaptação à seca do *Eucalyptus grandis***. 2013. 130 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

BELLOTE, A.F.J. **Suprimento de nutrientes minerais e crescimento de plantações adubadas de *Eucalyptus grandis* nos cerrados do Estado de São Paulo**. 1990. 166 p. Thesis (Ph.D. in Soil Ecology) – Universidade de Freiburg, Freiburg, 1990.

_____; SILVA, H.D. da; GAVA, J.L.; MENEGOL, O. Nutrient export by clear cutting *E. grandis* of different ages on two sites in Brazil. In: KOBAYASHI, S.; TURNBULL, J.W.; TOMA, T.; MORI, T.; MAJID, N.M.N.A. (Ed.). **Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems**. Bogor: Center for International Forestry Research, 2001. p. 173-177.

BENJAMIN, C.A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2006. 180p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ARQUERO, O.; FOURNIER, J.M.; BARRANCO, D.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 165, p. 623-630, 2008.

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

BERNARZ, C.; OOSTERHUIS, D. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 39, p. 131-139, 1998.

_____. Physiological changes associated with potassium deficiency in cotton. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 2, p. 303-313, 1999.

BERTOLUCCI, F.L.; PENCHEL, R.M. Clonagem do eucalipto: efeitos sobre a produtividade e qualidade da madeira. **Ciência Hoje**, São Paulo, v. 16, n. 91, p. 16-21, 1993.

BIRKETT, M.D.; GAMBINO, M.J.T. Potential applications for Near Infrared Spectroscopy in the pulping industry. **Paper Southern Africa**, Pretoria, v. 11, n. 12, p. 34-38, 1988.

BLAKE, T.J.; TSCHALPLINSKI, T.J. Water relations: In: MITCHELL, J.B.; ROBERTSON, F.; HINCKLEY, T.; FORSSE, L.S. (Ed.). **Ecophysiology of short rotation forest crops**. New York: Elsevier Applied Science, 1992. p. 66-94.

BLEBY, T.M.; COLQUHOUN, I. J.; ADAMS, M.A. Hydraulic traits and water use of *Eucalyptus* on restored versus natural sites in a seasonally dry forest in southwestern Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 274, p. 58-66, 2012.

BLOM-ZANDSTRA, M.; VOGELZANG, S.A.; VEEN, B.W. Sodium fluxes in sweet pepper exposed to varying sodium concentrations. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, n. 328, p. 1863-1868, 1998.

BLUM, A. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 20, n. 2, p. 135-148, 1996.

BODIG, J.; JAYME, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Reinhold, 1982. 234 p.

BOOTLE, K.R. **Wood in Australia**: types, properties and uses. Sydney: McGraw-Hill Book, 1983. 440 p.

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

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

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

_____. Características das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis*, aos 3 anos de idade. **IPEF**, Piracicaba, n. 19, p. 79-80, dez. 1979.

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

BRINKMANN, K.; BLASCHKE, L.; POLLE, A. Comparison of different methods for lignin determination as a basis for calibration of near-infrared reflectance spectroscopy and implications of lignoproteins. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 28, n. 12, p. 2483-2501, Dec. 2002.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

BUKATA, A.R.; KYSER, T.K. Tree-ring elemental concentrations in oak do not necessarily passively record changes in bioavailability. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 390, n. 1, p. 275-286, 2008.

BURNS, D.A.; CIURCZAK, E.W. (Ed.). **Handbook of near-infrared analysis**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 826 p. (Practical Spectroscopy, 35).

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

_____; 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, p. 49-59, 2011.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Plant Nutrition and Soil Science**, Mönchhagen, v. 168, p. 521-530, 2005.

CALDEIRA, A.F.; ROCHA, A.P.; SANTOS, C.V.C.; ALMEIDA, C.; PATELLI, J.E.; CALVOSA, P.S.P.; SACON, V. NIR on line: an innovation in the VCP wood yard. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE DE EUCALIPTO, 3., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ICEP, 2007. p. 1-22.

CALLADO, C.H.; ROIG, F.A.; TOMAZELLO FILHO, M.; BARROS, C.F. Cambial growth periodicity studies of South American woody species: a review. **IAWA Journal**, Leiden, v. 34, n. 3, p. 213-230, 2013.

CALLISTER, A.N.; ARNDT, S.K.; ADES, P.K.; MERCHANT, A.; ROWELL, D.; ADAMS, M.A. Leaf osmotic potential of *Eucalyptus* hybrids responds differently to freezing and drought, with little clonal variation. **Tree Physiology**, Victoria, v. 28, p. 1297-1304, 2008.

CAMARGO, M.A.F. **Matéria seca, concentração e conteúdo de macronutrientes em mudas de cones de eucalipto, em função da idade**. 1997. 94 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

CARLQUIST, S.; HOEKMAN, D.A. Ecological wood anatomy of the woody southern Californian flora. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 6, n. 4, p. 319-347, 1985.

CARMO, A.P.T. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto**. 1996. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L.E.G. Influência da procedência e classe de diâmetro sobre as características da madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 17., 1984. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1984. p. 23-34.

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, p. 1407-1418, 2009.

CARVALHO, F.A.; FELFILI, J.M. Cost-benefit analysis of industrial and homemade dendrometer bands. **Acta Botanica Brasilica**, Feira de Santana, v. 25, n. 3, p. 566-570, 2011.

CARVALHO, G.G.A. de. **Efeito da fluência na análise de pastilhas de materiais vegetais por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser**. 2011. 116 p. Dissertação (Mestrado em Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CARVALHO, M.L.M. de; SILVA, C.D. da; OLIVEIRA, L.M. de; SILVA, D.G.; CALDEIRA, C.M. Teste de raios-X na avaliação da qualidade de sementes de abóbora. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2009.

CHAGAS, M.P. **Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo**. 2013. 159 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CHERUBINI, P.; HUMBEL, T.; BEECKMAN, H.; GÄRTNER, H.; MANNES, D.; PEARSON, C.; SCHOCH, W.; TOGNETTI, R.; LEV-YADUN, S. Olive tree-ring problematic dating: a comparative analysis on Santorini (Greece). **Plos One**, San Francisco, v. 8, n. 1, p. 1-5, Jan. 2013.

CLARK, N.A.; WYNNE, R.H.; SCHMOLDT, D.L. A review of past research on dendrometers. **Forest Science**, Bethesda, v. 46, n. 4, p. 570–576, 2000.

CLEMENT, A.; JANIN, G. Etude comparee de la repartition des principaux cations et du phosphore dans une tige de peuplier 'Fritzi-Pauley'. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 45, p. 543-554, 1976.

COKER, D.L.; OOSTERHUIS, D.M.; BROWN, R.S. Yield and physiological response of dryland and irrigated. cotton to potassium fertilization: a four-year summary. In: OOSTERHUIS, D.M. (Ed.). **Summaries of Arkansas cotton research**. Fayetteville: University of Arkansas, Agricultural Experiment Station, 2002. p. 104-109. (Research Series, 507).

COLIN-BELGRAND, M.; RANGER, J.; BOUCHON, J.; D'ARGOUGES, S. Transferts internes d'elements nutritifs dans le bois de chataignier (*Castanea sativa* Miller): approche dynamique sur une chronosea quence de peuplements: I. Distribution des elements mineaux. **Acta Oecologica**, Paris, v. 14, p. 653-680, 1993.

COLODETTE, J.L.; EIRAS, K.M.M.; OLIVEIRA, R.; VENTORIM, G. Influence of eucalypt wood supply on pulp brightness. **Appita Journal**, Victoria, v. 53, n. 6, p. 481-487, 2004.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1307-1317, 2007.

CORTEZ, J. **Construção e avaliação de um instrumento para espectroscopia de emissão em plasma induzido por laser (LIBS)**: aplicação em ligas metálicas. 2007. 133 p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

COSGROVE, D.J. Cell walls: structure, biogenesis and expansion. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Ed.). **Plant physiology**. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. p. 313-338.

COSTA, A.J. **Qualidade da madeira de *E. urograndis* plantado no Distrito Federal, para a produção de celulose Kraft**. 2011. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

COSTA FILHO, P.A. da. **Estudo comparativo entre técnicas de inteligência artificial e modelos lineares em determinações quantitativas no infravermelho próximo**. 2003. 110 p. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

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

_____; LIMA, J.T.; MUNIZ, G.I.B. Variações dentro das árvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 33-47, 2003.

DESLAURIERS, A.; ANFODILLO, T.; ROSSI, S; CARRARO, V. Using simple causal modeling to understand how water and temperature affect daily stem radial variation in trees. **Tree Physiology**, Victoria, v. 27, n. 8, p. 1125–1136, 2007.

_____; MORIN, H.; URBINATI, C.; CARRER, M. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada). **Trees – Structure and Function**, Berlin, v. 17, n. 6, p. 477-484, 2003.

DÉTIENNE, P. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. **IAWA Bulletin New Series**, Leiden, v. 10, n. 2, p. 123-132, 1989.

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

DOBBS, R.C. An electrical device for recording small fluctuations and accumulated increment of tree stem circumference. **Forest Chronology**, Quebec, v. 45, p. 187-189, 1969.

DONALD, D.G.M.; SCHUTZ, D.J. The response of Eucalyptus to fertilizer application at planting: the Louw's Creek trial. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n. 102, p. 23-28, 1977.

DOWNES, G.; TURVEY, N.D. Reduced lignification in *Pinus radiata* D. Don. **Australian Forest Research**, Sydney, v. 16, n. 4, p. 317-377, 1986.

_____; BEADLE, C.H.; WORLEDGE, D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. **Trees**, Heidelberg, v. 14, p. 102–111, 1999.

DOWNES, G.M.; EVANS, R.; SCHIMLECK, L.R.; FRITTS, H.C. The commercial cambium: Understanding the origin of wood property variation. In: SAVIDGE, R.A.; BARNETT, J.R.; NAPIER, R. (Ed.). **Cell and molecular biology of wood formation**. Oxford: BIOS Science, 2000. p. 325-336.

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

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

_____; PAMMENTER N.W. Developmental rates and morphological properties of fibers in two eucalypt clones at sites differing in water availability. **Southern Hemisphere Forestry Journal**, Rotorua, v. 69, p. 71–79, 2007.

_____; GRADY, A.P.; DOWNES, G.M.; READ, J.; WORLEDGE, D. Daily patterns of stem size variation in irrigated and nonirrigated *Eucalyptus globulus*. **Tree Physiology**, Victoria, v. 28, p. 1573–1581, 2008.

_____; 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**, Dordrecht, v. 66, p. 1-10, 2009.

DUNISCH, O.; BAUCH, J.; MULLER, M. Subcellular quantitative determination of K and Ca in phloem, cambium and xylem cells of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) during earlywood and latewood formation. **Holzforschung**, Berlin, v. 52, n. 6, p. 582-588, 1998.

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

EASTY, D.B.; BERBEN, S.A.; DETHOMAS, F.A.; BRIMMER, P.J. Near-infrared Spectroscopy for the analysis of wood pulp: quantifying hardwood-softwood mixtures and estimating lignin content. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 73, n. 10, p. 257-261, 1990.

EKLUND, L.; ELIASSON, L. Effects of calcium ion concentration on cell wall synthesis. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 41, p. 863-867, 1990.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EPRON, D.; LACLAU, J.-P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; PONTON, S.; SETTE JUNIOR, C.R.; DELGADO-ROJAS, J.S.; BOUILLET, J.-P.; NOUVELLON, Y. Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? **Tree Physiology**, Victoria, v. 31, p. 1-13, 2012.

EVANS II, J.W.; SENFT, J.F.; GREEN, D.W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Productions Journal**, Madison, v. 50, n. 7/8, p. 75-87, 2000.

FAHN, A.; BURLEY, J.; LONGMAN, K.A.; MARIAUX, A.; TOMLINSON, P.B. Possible contributions of wood anatomy to the determination of the age of tropical trees. In: BORMANN, F.H.; BERLYN, G. **Age and growth rate of tropical trees: new directions for research**. New Haven: Yale University, School of Forestry & Environmental Studies, 1981. p. 31-54. (Bulletin, 94).

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.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S.M.A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 29, p. 185-212, 2009.

FAXITRON X-RAY. **Model LX-60 technical manual**. Lincolnshire, 2009. 82 p.

FELDHOFF, R.; HUTH-FEHRE, T.; CAMMANN, K. Detection of inorganic wood preservatives on timber by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 6, p. 171-173, 1998.

FELKER, P.; LEON, V.D. An improved tool for the fabrication of dendrometer bands to estimate growth as function of treatments in slow growing native *Prosopis* stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 209, n. 3, p. 353-356, May 2005.

FERREIRA, A.T.B. **Avaliação da estrutura anatômica e da densidade aparente do lenho e do carvão de árvores de *Eucalyptus sp.* e de *Corymbia sp.*** 2013. 132 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FERREIRA, D.F. **Estatística multivariada**. Lavras: UFLA, 2008. 662 p.

FERRETTI, M.; UDISTI, R.; BARBOLANI, E. A new approach to experimental data evaluation from tree ring analysis: Ion-chromatographic determination of P, Cl, and S. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**, Heidelberg, v. 343, n. 7, p. 607-611, 1992.

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

FONSECA, F.M.A.; LOUSADA, J.L.P.C. **Variação na madeira de *Pinus pinaster*: a densidade, o crescimento e a qualidade físico-mecânica da madeira**. Lisboa: Vila Real, 2000. 242 p. (Série Técnica-científica).

FRANKS, P.J.; DRAKE, P.L.; FROEND, R.H. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 30, p. 19-30, 2007.

FRIED, M.; BROESHART, H. **The soil-plant system ill relation to inorganic nutrition**. New York, London: Academic Press, 1967. 358 p.

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

FUJIMOTO, T.; KOBORI, H.; TSUCHIKAWA, S. Prediction of wood density independently of moisture conditions using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 20, p. 353-359, 2012.

_____; KURATA, Y.; MATSOMOTO, K.; TSUCHIKA, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 16, n. 6, p. 529-537, 2008.

GARBUTT, D.C.F.; DONKIN, M.J.; MEYER, J.H. Near-infrared reflectance analysis of cellulose and lignin in wood. **Paper Southern Africa**, Pretoria, v. 2, n. 4, p. 45-48, 1992.

GARCIA, S.L.R. **Importância de características de crescimento, de qualidade da madeira e da polpa na diversidade genética de clones de eucalipto**. 1998. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

GAVA, J.L. Efeito de adubação potássica em plantios de *Eucalyptus grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 84-94, 1997.

_____. **Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus grandis* para produção de celulose**. 2005. 54 p. Dissertação (Mestrado em Manejo de Florestas de Produção) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

_____; GONÇALVES, J.L.M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantation of *Eucalyptus grandis* clone. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 3, p. 306-313, 2008.

_____; GONÇALVES, J.L.M.; SHIBATA, F.Y.; CORRADINI, L. Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 497-504, 1997.

GATTWARD, J.N.; ALMEIDE, A.A.F.; SOUZA, J.O.; GOMES, F.P.; KRONZUCKER, H.J. Sodium-potassium synergism in Theobroma cacao: stimulation of photosynthesis, water-use efficiency and mineral nutrition. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 146, p. 350-362, 2012.

GELADI, P.; KOWLASKI, B. Partial least square regression: a tutorial. **Analytica Chemica Acta**, Amsterdam, v. 35, p. 1–17, 1986.

GÉRARD, J.; BAILLÈRES, H.; FOURNIER, M.; THIBAUT, B. Qualité du bois chez les *Eucalyptus* de plantation: etude de variation de tris propriétés de référence. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, n. 245, p. 101-111, 1995.

GILBOY, W.B.; MASON, P.I.; TOUT, R.E. Time variations in environmental pollution. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest, v. 48, p. 327-335, 1979.

GINDL, W.; TEISCHINGER, A. Axial compression strength of Norway spruce related to structural variability and lignin content. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Bristol, v. 33, n. 12, p. 1623-1628, 2002.

GOMES, A.F. **Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva.** 2007. 124 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. de; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

GONÇALEZ, J.C.; VIEIRA, F.S.; CAMARGOS, J.A.A.; ZERBINI, N.J. Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 251-255, abr./jun. 2009.

GONÇALVES, F.G.; OLIVEIRA, J.T.S.; DELLA LUCIA, R.M.; SARTÓRIO, R.C. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 501-509, 2009.

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

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

_____; 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.

_____; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity wood quality of eucalypt plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 45-61, 2004b.

GORDON, W.S.; JACKSON, R.B. Nutrient concentrations in fine roots. **Ecology**, Washington, v. 81, n. 1, p. 275–282, 2000.

GORHAM, J. Sodium. In: BARKER, A.V.; PILBEAM, D.J. **Handbook of plant nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2006. chap. 20, p. 569-583.

GOUVÊA, A.F.G.; TRUGILHO, P.F.; GOMIDE, J.L.; SILVA, J.R.M. da; ANDRADE, C.R.; ALVES, I.C.N. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

GREEN, J.W. Continuous measurements of radial variation in *Eucalyptus paniciflora* Sieb. Ex. Spreng. **Australian Journal of Botany**, Sydney, v. 17, p. 191-198, Feb. 1969.

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

GUYETTE, R.P.; CUTTER, B.E.; HENDERSON, G.S. Long-term relationships between molybdenum and sulfur in red cedar tree rings. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 18, p. 385-389, 1989.

HALL, G.S. Sample preparation methods of tree-rings for PIXE-PIGE multielemental analysis. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Amsterdam, v. 49, p. 60-64, 1990.

_____.; NAUMANN, M. Element analysis of *Pinus rigida* intra-annual growth rings by photon-induced X-ray emission. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest, v. 87, p. 317-330, 1984a.

_____. Trace element analysis of environmental samples by PIXE. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Amsterdam, v. 3, p. 431-435, 1984b.

HANS, A.S.; BURLEY, J.; WILLIAMSON, P. Wood quality of *Eucalyptus grandis* grown in Zambia. **Holzforschung**, Berlin, v. 26, n. 4, p. 138-141, 1972.

HARRIS, J.M. Effect of rapid growth on wood processing. In: WORD CONGRESS, 17., Kyoto, 1981. **Proceedings...** Kyoto: IUFRO, 1981. p. 117- 125.

HASELEIN, C.R.; BERGER, R.; GOULART, M. STHAL, J.; TREVISAN, R.; SANTINI, E.J.; LOPES, M.C. Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da adubação. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 147-152, 2002.

HAUKSSON, J.B.; BERGQVIST, G.; BERGSTEN, U.; SJOSTROM, M.; EDLUND, U. Prediction of basic wood properties for Norway spruce. Interpretation of near infrared spectroscopy data using partial least squares regression. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 35, p. 475–485, 2001.

HEIN, P.R.G. **Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

_____. **Genetic and environmental control of microfibril angle on *Eucalyptus* wood: Its effects on wood traits and implication for selection**. 2011. 224 p. Thesis (Ph.D. in Information, Systems and Structure) – Universite Montpellier 2, Montpellier, 2011.

_____.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.

_____; BRANCHERIAU, L.; TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Resonance and near infrared spectroscopy for evaluating dynamic wood properties. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 18, p. 443-454, 2010.

_____; CAMPOS, A.C.M.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; CHAIX, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 119-129, jun. 2009a.

_____; CAMPOS, A.C.M.; TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Near infrared spectroscopy for estimating Wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, abr./jun. 2009b.

HELMISAARI, H.-S. Temporal variation in nutrient concentrations of *Pinus sylvestris* needles. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Stockholm, v. 5, p. 177-193, 1990.

HERBERT, M.A. Fertilizers and eucalypt plantations in South Africa. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. (Ed.). **Nutrition of eucalypts**. Collingwood: CSIRO Publ., 1996. p. 303-325.

HILLS, W.E. Chemical aspects of heartwood formation. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 2, n. 4, p. 241-259, Dec. 1968.

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

HINGSTON, F.J.; TURTON, A.G.; DIMMOCK, G.M. Nutrient distribution in Karri (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell) ecosystems in Southwest Western Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 2, p. 133-158, 1979.

HOFFMANN, E.; LUDKE, C.; SCHOLZE, H.; STEPHANOWITZ, H. Analytical investigations of tree rings by laser ablation ICP-MS. **Journal of Analytical Chemistry**, Washington, v. 350, p. 253-259, 1994.

HOFFMEYER, P.; PEDERSEN, J.G. Evaluation of density and strength of Norway spruce wood by near infrared reflectance spectroscopy. **Holz als Roh-und Werstoff**, Berlin, v. 53, n. 3, p. 165-170, 1995.

HOPKINS, W.G.; HÜNER, N.P.A. **Introduction to plant physiology**. 4th ed. New York: Wiley, 2009. 503 p.

HUBBARD, R.M.; STAPE, J.; RYAN, M.G.; ALMEIDA, A.C.; ROJAS, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1714-1721, 2010.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features for wood identification. **IAWA Bulletin**, Oakland, v. 10, n. 3, p. 226-332, 1989.

INAGAKI, T.; SCHWANNINGER, M.; KATO, R.; KURATA, Y.; THANAPASE, W.; PUTHSON, P.; TSUCHIKAWA, S. *Eucalyptus camaldulensis* density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**, New York, v. 45, n. 1/3, p. 143-155, 2010.

INJUK, J.; NAGJ, M.; VALKOVIC, V. Variations of trace element contents within single tree rings. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 195, p. 299-305, 1987.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7. ed. Brasília, 2012. 68 p.

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

_____. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption**: a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2012. 582 p.

JACOB, W.S.; BALLONI, E.A. Efeitos da fertilização na qualidade da madeira. **Boletim Informativo IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. 1-12, 1978.

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

_____; CAO, L.; LIN, J.A.; SHANHUA, W.; LUO, J.J.; YANG, J.L.; WEI, S.H. Effects of fertilization treatments on contents of Wood chemical components of *Eucalyptus urophylla*. **Scientia-Silvae Sinicae**, Beijing, v. 34, n. 5, p. 96-102, 1998.

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

JOHNSTON, M.; GROF, C.P.L.; BROWNELL, P.F. The effect of sodium nutrition on the pool sizes of intermediates of the C photosynthetic pathway. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 15, n. 6, p. 749-760, 1988.

JORGE, M.F.C.T.F. **Variabilidade anatômica, física e química da madeira de *Eucalyptus globulus***. 1994. 135 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Instituto Superior de Agricultura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1994.

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

KAISER, J.; NOVOTNÝ, K.; MARTIN, M.Z.; HRDLIČKA, A.; MALINAA, R.; HARTL, M.; ADAME, V.; KIZEKE, R. Trace elemental analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: biological applications. **Surface Science Reports**, North-Holland, v. 67, p. 233-243, 2012.

KEELAND, B.D.; SHARITZ, R.R. Accuracy of tree growth measurements using dendrometer bands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, n. 11, p. 2454–2457, 1993.

KELLEY, S.S.; JELLISON, J.; GOODELL, B. Use of NIR and pyrolysis-MBMS coupled with multivariate analysis for detecting the chemical changes associated with brown-rot biodegradation of spruce wood. **FEMS Microbiology Letters**, Delft, v. 209, p. 107-111, 2002.

_____; RIALS, T.G.; SNELL, R.; GROOM, L.H.; SLUITER, A. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 38, p. 257–276, May 2004.

KEMPEN, T. van; JACKSON, D. NIRS may provide rapid evaluation of amino acids. **Feedstuffs**, Minnetonka, v. 68, p. 12-15, 1996.

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

KIKUTI, P.; NAMIKAWA, I.S. Estudo da interação clone x níveis da adubação em *Eucalyptus saligna*. **O Papel**, São Paulo, n. 3, p. 37-44, 1990.

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

KOTHIYAL, V.; RATURI, A. Estimating mechanical properties and specific gravity for five-year-old *Eucalyptus tereticornis* having broad moisture content range by NIR spectroscopy. **Holzforschung**, Berlin, v. 65, n. 5, p. 757-762, Mar. 2011.

KOZLOWSKI, T.T. Water supply and tree growth: water deficits. **Forestry Abstracts**, Oxford, v. 43, p. 57-95, 1982.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press, 1995. 495 p.

_____; KOZLOWSKI, T. **Physiology of wood plants**. New York: Academic Press, 1979. 811 p.

KRETSCHMANN, D.E. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. chap. 5, p. 1-46. (General Technical Report FPL-GTR, 190).

KRONZUCKER, H.J.; BRITTO, D.T. Sodium transport in plants: a critical review. **New Phytologist**, London, v. 189, p. 54-81, 2011.

LACLAU, J.-P. **Dynamique du fonctionnement mineral d'une plantation d'*Eucalyptus***: effets du reboisement sur um sol de savane du littoral congolais; consequences pour La gestion dês plantations industrielles. 2001. 146 p. Thèse (Doctorat en Sciences Forestières) – Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2001.

_____; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 181-196, 2000.

_____; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.-P.; KAZOTTI, G. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, London, v. 91, p. 879-892, 2003.

_____; BOUILLET, J.-P.; RANGER, J.; JOFFRE, R.; GOUMA, R.; SAYA, A. Dynamics of nutrient translocation in stemwood across an age series of a *Eucalyptus* hybrid. **Annals of Botany**, London, v. 88, n. 6, p. 1079-1092, 2001.

_____; POGGIANI, F.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LIMA, W. P. **Resposta do *Eucalyptus grandis* a adubação potássica e a substituição do potássio por sódio**. Piracicaba: ESALQ, 2010. 65 p. Relatório apresentado a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

_____; 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.

_____; 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. 111-124, 2009.

_____; BOUILLET, J.-P.; GONÇALVES, J.L.M.; SILVA, E.V.; JOURDAN, C.; CUNHA, M.C.S.; MOREIRA, M.R.; SAINT-ANDRÉ, L.; MAQUÈRE, V.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 1. Growth dynamics and net primary production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 3905–3917, 2008.

LAPOINT, G.; VAN CLEVE, K. A portable electronic multichannel dendrograph and environmental factor recording system. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 1, p. 273-277, 1971.

LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. New York: Springer-Verlag, 1975. 252 p.

LARSON, P.R. Assessing wood quality of fertilized coniferous trees. In: TENNESSEE LARSON, P.R. Some indirect effects of environment on wood formation. In: ZIMMERMANN, M.H. (Ed.). **The formation of wood in forest trees**. New York: Academic Press, 1964. p. 345–365.

_____. Silvicultural control of the characteristics of wood used for furnish. In: FOREST BIOLOGY CONFERENCE, 4., 1967, Quebec. **Proceedings...** Quebec: Tappi, 1967. p.143-151.

_____. **Wood formation and the concept of wood quality**. New Haven: Yale University, School of Forestry 1969. 54 p. (Bulletin, 74).

LATORRACA, J.V.; ALBUQUERQUE, C.E.C. Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 25, n. 2, p. 275–294, 2002.

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

LEGGE, A.H.; KAUFMANN, H.C.; WINCHESTER, J.W. Tree-ring analysis by PIXE for a historical record of soil chemistry response to acidic air pollution. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Amsterdam, v. 3, n. 1/3, p. 507-510, Apr./May 1984.

LEIGH, R.A.; TOMOS, A.D. An attempt to use isolated vacuoles to determine the distribution of sodium and potassium in cells of storage roots of red beet (*Beta vulgaris* L.). **Planta**, Berlin, v. 159, n. 9, p. 469-475, Nov. 1983.

LEITE, M.K. **Caracterização tecnológica da madeira de *Corymbia maculata*, *Eucalyptus cloeziana* e *E. resinífera* para a aplicação no design de Produtos de Maior Valor Agregado (PMVA)**. 2013. 130 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

LIM, M.T.; COUSENS, J.E. The internal transfer of nutrients in a Scots Pine stand. 1. Biomass components, current growth and their nutrient content. **Forestry**, Oxford, v. 59, p. 1-16, 1986.

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

_____; GARCIA, J.N. Efeito da fertilização em propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 601-608, jul.-set. 2011.

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

LIMA, W.P.; JARVIS, P.; RHIZOPOULOU, S. Stomatal responses of *Eucalyptus* species to elevated CO₂ concentration and drought stress. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 231-238, 2003.

LINDORF, H. Eco-anatomical wood features of species from a very dry tropical forest. **IAWA Journal**, Leiden, v. 15, n. 4, p. 361-376, 1994.

LOBÃO, M.S.; DELLA LÚCIA, R.M.; MOREIRA, M.S.S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LOPES, C.S.D. **Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria**. 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LOUSADA, J.L.P.C. **Variação fenotípica e genética em características estruturais na madeira de *Pinus pinaster* Ait.** 1999. 293 p. Dissertação (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 1999.

MÄKINEN, H.; SARANPÄÄ, P.; LINDER, S. Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 32, p. 185-194, 2002.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 3. ed. São Paulo: Editora Ceres, 1970. 189 p.

_____. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Ceres, 1980. 251 p.

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

MAQUÈRE, V. **Dynamics of mineral elements under a fast-growing *Eucalyptus* plantation in Brazil**: implications for soil sustainability. 2008. 375 p. Thesis (Ph.D. in Forest Science) - Agro Paris Tech, Paris, 2008.

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

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

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

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

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

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

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTIN, M.Z.; LABBÉ, N.; RIALS, T.G.; WULLSCHLEGER, S.D. Analysis of preservative-treated wood by multivariate analysis of laser-induced breakdown spectroscopy spectra. **Spectrochimica Acta Part B**, London, v. 60, n. 7/8, p. 1179-1185, 2005.

MARTIN, R.R.; ZANIN, J.P.; BENSETTE, M.J.; LEE, M.; FURIMSKY, E. Metals in the annual rings of eastern white pine (*Pinus strobus*) in southwestern Ontario by secondary ion mass spectroscopy (SIMS). **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 27, p. 76-79, 1997.

MASSART, D.L.; VANDEGINSTE, B.G.; DEMING, S.N.; MICHOTTE, Y.; KAUFMAN, L. **Chemometrics: a textbook**. New York: Elsevier Science, 1986. 500 p.

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

_____; MASCARENHAS SOBRINHO, J.; SIMÕES, J.W.; COUTO, H.T.Z. do. Resultados da aplicação de fertilizantes minerais na produção de madeira de *Eucalyptus saligna* SM. em solos de cerrado do Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n. 1, p. 7-26, 1970.

MICHELL, A.J. Pulpwood quality estimation by near-infrared spectroscopic measurements on eucalypt wood. **Appita Journal**, Victoria, v. 8, n. 6, p. 425-428, Mar. 1995.

MIGLIORINI, A.J.; BARRICHELO, L.E.G.; KAGEYAMA, P.Y.; CAMARGO, F.R.A. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes níveis de floresta. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 21., 1988, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1988. p. 17-23.

MILAGRES, F.R. **Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *E. urophylla*, para produção de celulose, utilizando espectroscopia NIR.** 2009. 142 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

MORAIS, P.H.D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa.** 2008. 79 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

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

MORGAN, J.M. Osmoregulation and water stress in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 35, p. 299-319, 1984.

MOSKAL, T.M.; HAHN, D.W. On-line sorting of wood treated with chromate copper arsenate using laser-induced breakdown spectroscopy. **Applied Spectroscopy**, Frederick, v. 56, p. 1337-1344, 2002.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, p. 651-681, 2008.

NABIL, M.; COUDRET, A. Effects of sodium chloride on growth, tissue elasticity and solute adjustment in two *Acacia nilotica* subspecies. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 93, n. 2, p. 217-224, Feb. 1995.

NAES, T.; ISAKSSON, T. Different strategies for handling non-linearity problems in NIR calibration. **NIR News**, Chichester, v. 5, n. 1, p. 4-11, Jan. 1994.

NAMBIAR, E.; SAND, R. Competition for water and nutrient in forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, p. 1955-1968, 1993.

NAMBIAR, E.K.S.; FIFE, D.N. Nutrient retranslocation in temperate conifers. **Tree Physiology**, Victoria, v. 9, p. 185-207, 1991.

NISGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** 2005. 173 p. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização em Produtos Florestais) – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

_____; MUÑIZ, G.I.B. de; KLOCK, U. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 67-76, 1998.

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

NUNES, L.C. **Estratégias quimiométricas para análise de plantas por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser**. 2010. 149 p. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

NYE, P.H.; TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Berkeley: University of California Press, 1977. 342 p.

OGBONNAYA, C.I. Growth and histochemical response of *Gmelina arborea* seedlings to application of N and K fertilizers and their combinations on oxisolic soils. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 6, n. 4, p. 169-175, 1994.

OLALE, K.; YENESEW, A.; JAMNADASS, R.; SILA, A.; AYNEKULU, E.; KUYAH, S.; SHEPHERD, K. Limitations to use of infrared spectroscopy for rapid determination of carbon-nitrogen and wood density for tropical species. **Advances in Analytical Chemistry**, Missouri, v. 3, n. 3, p. 21-28, 2013.

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

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

_____; ABAD, J.I.M.; RODRIGUES, B.P.; OLIVEIRA, J.G.L.; BRAZ, R.L. NETO, H.F. Influência da precipitação na densidade básica da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 12., 2010, Lavras. **Anais...** Lavras: EBRAMEM, 2010. p. 22-35.

PADILLA, L.K.; ANDERSON, A.K. Trace element concentration in tree-rings biomonitoring centuries of environmental change. **Chemosphere**, Oxford, v. 49, p. 575-585, 2002.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3rd ed. New York: Mcgraw-Hill, 1970. 736 p.

_____. **Textbook of wood technology**. 4th ed. New York: Mcgraw-Hill, 1980. 722 p.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 198-219, mar./abr. 2003.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PEREIRA, J.S.; TENHUNEN, J.D.; LANGE, O.L.; BEYSCHLAG, W.; MEYER, A.; DAVID, M.M. Seasonal and diurnal patterns in leaf gas exchange of *Eucalyptus globulus* trees grown in Portugal. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 16, n. 2, p. 177-184, 1986.

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

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. 964 p.

POOK, E.W.; HALL, T. Effects of freezing conditions on boles of snow gum. **Forest Science**, Bethesda, v. 22, n. 3, p. 370-376, 1976.

POOLE, D.J. Diameter growth of 4 - 7 year old *Eucalyptus regnans*. **New Zealand Forestry**, Wellington, v. 31, n. 1, p. 23, 1986.

POSADA, J.M.; SCHUUR, E.A.G. Relationship among precipitation regime, nutrient availability, and carbon turnover in tropical rain forests. **Oecologia**, Berlin, v. 165, p. 783-795, 2011.

PRENZEL, J. Mass flow to the root system and mineral uptake of a beech stand calculated from 3-years field data. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 51, p. 39-49, 1979.

PRITCHETT, W.L. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley, 1979. 500 p.

QMS. **Tree ring analyzer users guide - Model QTRS-01X**. Knoxville, 1999. 72 p.

QUEIROLO, F.; VALENTA, P. Trace determination of Cd, Cu, Pb, and Zn in annual growth rings by differential pulse anodic stripping voltammetry. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**, Heidelberg, v. 328, p. 93-98, 1987.

RADZIEMSKI, L.J. From LASER to LIBS: the path of technology development. **Spectrochimica Acta Part B**, Oxford, v. 57, p. 1109-1113, 2002.

RAMOS, S.I.N. **Caracterização das propriedades mecânicas e durabilidade biológica da madeira de *Quercus faginea***. 2009. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia vegetal**. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 856 p.

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

_____. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. I. Basic density. **Wood Science and Technology**, New York, v. 35, p. 27-39, 2001.

_____; SCHIMLECK, L.R.; MICHELL, A.J.; MUNERI, A. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. III. Predicted pulp yield using near infrared reflectance analysis. **Wood Science and Technology**, Madison, v. 35, p. 203–215, 2001.

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

REMADE. **Seleção automática de madeira maciça**. 2003. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=325&subject=Compensado&title=Sele%C3%A7%C3%A3o%20autom%C3%A1tica%20de%20madeira%20maci%C3%A7a>. Acesso em: 06 fev. 2014.

RENGASAMY, P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 37, p. 613-620, 2010.

RENNENBERG, H.; DANNENMANN, M.; GESSLER, A.; KREUZWIESER, J.; SIMON, J.; PAPEN, H. Nitrogen balance in forests: nutritional limitation of plants under climate change stresses. **Plant Biology**, Berlin, v. 11, p. 4-23, 2009.

RIALS, T.G.; KELLEY, S.S.; SO, C.-L. Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. **Wood Fiber Science**, Madison, v. 34, n. 3, p. 398-407, 2002.

RIBEIRO, P.G. **Utilização de técnicas alternativas para caracterização tecnológica de madeiras**. 2009. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

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

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: EBRAMEM, 2002. p. 1-10.

RODRIGUES, B.P. **Qualidade do lenho de árvores de clone de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* sob estresse abiótico e o impacto na produção de celulose**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2013.

ROMERO, R.R. **Resposta fisiológica de plantas de *Eucalyptus grandis* à adubação com potássio ou sódio**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses. **Plant Physiology**, Amsterdam, v. 80, n. 1, p. 175-180, Jan. 1986.

_____; KIRKBY, E.A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, p. 155-180, 2010.

ROSECRANCE, R.C.; WEINBAUM, S.A.; BROWN, P.H. Alternate bearing affects nitrogen, phosphorus, potassium and starch storage pools in mature pistachio trees. **Annals of Botany**, Oxford, v. 82, p.463-470, 1998.

ROWELL, R.M. (Ed.). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2005. 487 p.

SAKA, S; GORING, D.A.I. The distribution of inorganic constituents in black spruce wood as determined by TEM-EDXA. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 29, p. 648-656, 1983.

SALES, A.; CALIL JUNIOR, C. Sistema de classes de resistência para madeira serrada de eucaliptos cultivados no Brasil: Proposição para a NBR 7190. **Revista Madeira, Arquitetura e Engenharia**, São Carlos, v. 6, n. 17, p. 1-10, set./dez. 2005.

SAMISTRARO, G. **Previsão das propriedades químicas da polpa e papel Kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e regressão de mínimos quadrados parciais (PLS)**. 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

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

SANTIAGO, L.S.; WRIGHT, S.J.; HARMS, K.E.; YAVITT, J.B.; KORINE, C.; GARCIA, M.N.; TURNER, B.L. Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 100, p. 309–316, 2012.

SANTINI JUNIOR, L. **Descrição macroscópica e microscópica da madeira aplicada na identificação das principais espécies comercializadas no Estado de São Paulo – Programas “São Paulo Amigo da Amazônia” e “Cadmadeira”**. 2013. 272 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

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

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

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J.N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 120-129, 2004.

SCATOLINI, F.M.; FIRME, D.J.; GARCIA, C.H.; GOMES, F.P.; CAMARGO, F.R. Parcelamento da adubação potássica em *E. grandis* em áreas de reforma da Votorantim Celulose e Papel. In: CONGRESSO LATINO- AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Solo-suelo 96: trabalhos...** Piracicaba: SBSC; SLCS, 1996. 1 CD-ROM.

SCHIMLECK, L.R.; EVANS, R. Estimation of microfibril angle of increment cores by near infrared spectroscopy. **IAWA Journal**, Leiden, v. 23, n. 3, p. 225-234, 2002.

_____. Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, p. 66-73, 2004.

_____; MICHELL, A.J. Determination of within-tree variation of kraft pulp yield using near-infrared spectroscopy. **Appita Journal**, Victoria, v. 81, p. 229–236, 1998.

_____; EVANS, R.; ILIC, J. Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, p. 1671-1675, 2001.

_____; MICHELL, A.J.; VINDEN, P. Eucalypt wood classification by NIR spectroscopy and principal component analysis. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 49, p. 319-324, 1996.

_____; MORA, C.; DANIELS, R.F. Estimation of the physical wood properties of green *Pinus taeda* radial samples by near infrared spectroscopy. **Canadian Journal Review**, Ottawa, v. 33, n. 12, p. 2295-2305, 2003.

_____; MICHELL, A.J.; RAYMOND, C.A.; MUNERI, A. Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 29, p. 194-201, 1999.

_____; WRIGHT, P.J.; MICHELL, A.J.; WALLIS, A.F.A. Near-infrared spectra and chemical compositions of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* plantation woods. **Appita Journal**, Victoria, v. 50, p. 40–46, 1997.

_____; RAYMOND, C.A.; BEADLE, C.L.; DOWNES, G.M.; KUBE, P.D.; FRENCH, J. Some applications of NIR spectroscopy to forest research. **Appita Journal**, Victoria, v. 53, p. 458-464, 2000.

SCHÖNAU, A.P.G. The effects of fertilizing on the foliar nutrient concentrations in *Eucalyptus grandis*. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 2, p. 73-87, 1981.

SCHRIEVE, G.D.; MELISH, G.G.; ULLMAN, A.H. The Herschel-infrared: a useful part of the spectrum. **Applied Spectroscopy**, Bound Brook, v. 45, p. 711–714, 1991.

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

SCHULTZ, T.P.; BURNS, D.A. Rapid secondary analysis of lignocellulose: comparison of near infrared (NIR) and Fourier transform infrared (FTIR). **Tappi Journal**, Atlanta, v. 73, n. 5, p. 209-212, May 1990.

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi - SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, p. 21-34, 1993.

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J.C.; FACKLER, K. A review of bands assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 19, p. 287-308, 2011.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings: basics and applications of dendrocronology**. Amsterdam: Kluwer Academic, 1988. 292 p.

SEN GUPTA, A.; BERKOWITZ, G.A. Osmotic adjustment, symplast volume, and non-stomatally mediated water stress inhibition of photosynthesis in wheat. **Plant Physiology**, Rockville, v. 85, p. 1040-1047, 1987.

SERPA, P.N.; VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M.; PIMENTA, A.S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003.

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

_____. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden.** 2010. 151 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

_____; 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. 43, n. 6, p. 979-990, 2010.

_____; OLIVEIRA, I.R. de; 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.

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

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

SGARBI, F.; SILVEIRA, R.V.A.; HIGASHI, E.N.; PAULA, T.A. e; MOREIRA, A.; RIBEIRO, F.A. Influencia da aplicação de fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de um clone de *Eucalyptus urophylla*. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZAÇÃO E NUTRIÇÃO FLORESTAL, 2., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF; ESALQ, 1999. p. 120-125.

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

SIDDIQUI, K.A. Extraction of ancestral constituents of natural polyploids. **Hereditas**, Lund, v. 71, p. 95-100, 1972.

SIESLER, H.W.; OZAKI, Y.; KAWATA, S.; HEISE, H.M. **Near infrared spectroscopy: principles, instruments, applications.** New York: Wiley; VCH, 2002. 360 p.

SILVA, G.A. da; MENDES, L.M.; TRUGILHO, P.F.; MORI, F.A.; SANTOS, I.F. dos. Umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 639-646, 2005.

SILVA, H.D. da; POGGIANI, F.; COELHO, L.C. Eficiência de utilização de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 6/7, p. 1-8, jun./dez. 1983.

SILVA, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J.T.S.; CASTRO, V.R. de. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1081-1090, 2007.

_____; 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**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SILVA, J.V. da; NOGUEIRA, G.S.; SANTANA, R.C.; LEITE, H.G.; OLIVEIRA, M.L.R. de; ALMADO, R.P. Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 11, p. 1555-1562, nov. 2012.

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

_____; MALAVOLTA, E. **Nutrição e adubação potássica em *Eucalyptus***. Piracicaba: POTAFOS, 2000. 12 p. (Informações Agronômicas, 91).

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

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

_____; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; RAGOZZINI, P.E.A.; MOREIRA, A. **Nutrição mineral de mudas de *Eucalyptus grandis*: crescimento, produção de matéria seca, concentração e acúmulo de nutrientes**. Piracicaba: IPEF, 1998. 21 p.

SIMAS, R.C. **Determinação de proteína bruta e aminoácidos em farelo de soja por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2005. 199 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SKOLMEN, R.G. **Specific gravity variation in *Eucalyptus robusta* grown in Hawaii**. Berkeley: U.S. Forest Service Pacific Southwest; Forest Range Station Research, 1972. 12 p. (Paper, PSN-78).

SONG, K.; LEE, Y.I.; SNEDDON, J. Applications of laser-induced breakdown spectrometry. **Applied Spectroscopy Review**, Lake Charles, v. 32, n. 3, p. 183-235, 1997.

SPERRY, J.S.; HACKE, U.G.; OREN, R.; COMSTOCK, J.P. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 25, p. 251-263, 2002.

STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.

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

_____; BENEDETTI, V. Decréscimos de produtividade e resposta da brotação de *Eucalyptus grandis* à fertilização com macronutrientes em areia quartzosa no Estado de São Paulo-Brasil. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: IUFRO, 1997. v. 3: Silvicultura, produtividade e utilização de eucaliptos, p. 112-117.

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

SUBBARAO, G.V.; JOHANSEN, C. Physiological mechanism relevant to genetic improvement of salinity tolerance in crop plants. In: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of plant and crop physiology**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 857-880.

_____; CHAUHAN, Y.S.; JOHANSEN, C. Patterns of osmotic adjustment in pigeonpea: its importance as a mechanism of drought resistance. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 12, p. 239-249, 2000.

SUMI, Y.; HALE, R.D.; MEYER, J.A.; LEOPOLD, B.; RANBY, B.G. Accessibility of wood and wood carbohydrates measured with tritiated water. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 47, p. 621-624, 1964.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TANDON, V.N.; PANDE, M.C.; SINGH, R. Biomass estimation and distribution of nutrients in five different aged *Eucalyptus grandis* plantation ecosystems in Kerala state. **Indian Forester**, Dehradun, v. 114, p. 184-199, 1988.

TARDIEU, F. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 337, p. 57-67, 2005.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. Preparation of wood for chemical analysis. In: _____. **Test methods**. Atlanta, 2007. 376 p.

THUMM, A.; MEDER, R. Stiffness prediction of radiata pine clearwood test pieces using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 9, p. 117-122, 2001.

THYGESEN, L.G. Determination of dry matter content and basic density of Norway spruce by near infrared reflectance and transmission spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 2, p. 127-135, 1994.

TIMELL, T.E. The chemical composition of tension wood. **Svensk Papperstidning-nordisk Cellulosa**, Stockholm, v. 72, p. 173-181, 1969.

TOGNONI, E.; PALLESCHI, V.; CORSI, M.; CRISTOFORETTI, G. Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches. **Spectrochimica Acta Part B**, London, v. 57, n. 7, p. 1115-1130, 2002.

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

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

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

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

_____; LISI, C.S.; HANSEN, N.; CURY, G. Anatomical features of increment zones in different tree species in the State of São Paulo, Brazil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 46-55, dez. 2004.

_____; 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.

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

TREVIZOR, T.T. **Anatomia comparada do lenho de 64 espécies arbóreas de ocorrência natural na floresta tropical Amazônica no Estado do Pará.** 2011. 214 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

TROVATI, L.R.; FERRAZ, E.S.B. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. **IPEF**, Piracicaba, n. 26, p. 31-36, abr. 1984.

TRUGILHO, P.F. Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1228-1239, set./out. 2009.

_____; LIMA, J.T.; MENDES, L.M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-11, 1996.

_____; LIMA, J.T.; MORI, F.A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

_____; BIANCHI, M.L.; GOMIDE, J.L.; LIMA, J.T.; MENDES, L.M.; MORI, F.A.; GOMES, D.F.F. Clones de *Eucalyptus* versus a produção de polpa celulósica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 145-155, 2005.

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

TSUCHIKAWA, S. A review of recent near infrared research for wood and paper. **Applied Spectroscopy Reviews**, New York, v. 42, n. 1, p. 43-71, 2007.

_____; SCHWANNINGER, M. A review of recent near-infrared research for wood and paper (part 2). **Applied Spectroscopy Reviews**, New York, v. 48, n. 7, p. 560-587, 2013.

_____; INOUE, K.; NOMA, J.; HAYASHI, K. Application of near infrared spectroscopy to wood discrimination. **Journal of Wood Science**, Amsterdam, v. 49, n. 1, p. 29-35, 2003.

TURNER, J.; LAMBERT, M.J.; Nutrient cycling within a 27-year-old *Eucalyptus grandis* plantation in New South Wales. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 6, p. 155-168, 1983.

URZEDO, D.I. de; FRANCO, M.P.; PITOMBO, L.M.; CARMO, J.B. do. Effects of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gas (GHG) emissions in tropical forestry. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 37-44, 2013.

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

VALERI, S.V.; CORRADINI, L.; AGUIAR, I.V. Efeitos de níveis de NPK e calcário dolomítico na produção volumétrica de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Científica**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 63-70, 1991.

_____; ISMAEL, J.J.; TORRES, R.M.; CORRADINI, L. Efeito do potássio no crescimento e idade de corte de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho Escuro. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Solo-suelo 96: trabalhos...** Piracicaba: SBCS; SLCS, 1996. 1 CD-ROM.

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

VIA, B.K. **Modeling longleaf pine (*Pinus palustris* Mill) wood properties using near infrared spectroscopy**. 2004. 141 p. Thesis (Ph.D. in Renewable Natural Resources) – Agriculture and Mechanical College, The School of Renewable Natural Resources, Louisiana State University, Baton Rouge, 2004.

VIANA, L.C. **Uso da espectroscopia no infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus***. 2008. 111 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

_____; TRUGILHO, P.F.; HEIN, P.R.G.; SILVA, J.R.M. da; LIMA, J.T. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 367-376, abr./jun. 2010.

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

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

_____. Reflexos da fertilização mineral na qualidade e na utilização da madeira. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.

VITOUSEK, P.; PORDER, S.; HOULTON, B.Z.; CHADWICK, O.A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. **Ecological Applications**, Washington, v. 20, p. 5–15, 2010.

WADT, P.G.S.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; FONSECA, S.; BARROS, N.F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 685-692, 1998.

WAGNER, R.J.; KAYE, M.W.; ABRAMS, M.D.; HANSON, P.J.; MARTIN, M. Tree-ring growth and wood chemistry response to manipulated precipitation variation for two temperate *Quercus* species. **Tree-Ring Research**, Tucson, v. 68, p. 17-29, 2012.

WAKEEL, A.; SÜMER, A.; HANSTEIN, S.; YAN, F.; SCHUBERT, S. In vitro effect of different Na⁺/K⁺ ratios on plasma membrane H⁺ -ATPase activity in maize and sugar beet shoot. **Plant Physiology Biochemistry**, Versailles, v. 49, n. 3, p. 341-345, Mar. 2011.

WALLBACKS, L.; EDLUND, U.; NORDEN, B.; BERGLUND, I. Multivariate characterization of pulp using ¹³C NMR, FTIR and NIR. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 74, n. 10, p. 201-206, Oct. 1991.

WANGAARD, F.F. **The mechanical properties of wood**. New York: University of Florida, 1950. 377 p.

WARING, R.H.; SCHLESINGER, W.H. **Forest ecosystem, concepts and mangement**. Orlando: Academic Press, 1985. 340 p.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C.; EVANS, R.D. Application of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry in dendrochemical analysis. **Environmental Science Technology**, Washington, v. 31, p. 114-118, 1997.

WELTZIN, J.F.; LOIK, M.E.; SCHWINNING, S. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. **Bio Science**, Washington, v. 53, p. 941-952, 2003.

WENTZEL-VIETHEER, M.; WASHUSEN, R.; DOWNES, G.M.; HARWOOD, C.; EDBON, N.; OZARSKA, B.; BAKER, T. Prediction of non-recoverable collapse in *Eucalyptus globulus* from near infrared scanning of radial wood samples. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 71, n. 6, p. 755-768, Nov. 2013.

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, p. 1157-1165, 2000.

WHITE, P.J. The molecular mechanism of sodium influx to root cells. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 4, n. 7, p. 245-246, July 1999.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 113-140, 2004.

WIEDENHOEFT, A. Structure and function of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. chap. 5, p. 1-46. (General technical Report FPL-GTR, 190).

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

_____; ABBOTT, D. Influence of the rate of tree growth on the anatomy of eucalypt species. **Appita Journal**, Victoria, v. 37, n. 3, p. 231-232, Nov. 1983.

WILKINS, A.P.; KITAHARA R. Silvicultural treatments and associated growth rates, growth strains and wood properties in 12.5-year-old *Eucalyptus grandis*. **Australian Forestry**, Canberra, v. 54, n. 1/2, p. 99-104, 1991.

WILLIAMS, P.C.; SOBERING, D.C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 1, n. 1, p. 25-33, Jan. 1993.

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

WORKMAN JR, J.; WEYER, L. **Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy**. Boca Raton: CRC Press, 2008. 332 p.

WRIGHT, J.A.; BIRKETT, M.D.; GAMBINO, M.J.T. Prediction of pulp yield and cellulose content from wood samples using near infrared reflectance spectroscopy. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 73, n. 8, p. 164-166, Aug. 1990.

WRIGHT, S.J.; CARRASCO, C.; CALDERON, O.; PATON, S. The El Niño southern oscillation, variable fruit production, and famine in a tropical forest. **Ecology**, Ithaca, v. 80, p. 1632-1647, 1999.

_____; 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.

WU, Y.; COSGROVE, D.J. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 51, p. 1543-1553, 2000.

ZAHNER, R. Water deficits and growth of trees. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York, London: Academic Press, 1968. p. 191-254.

ZEN, S.; POGGIANI, F.; COUTO, H.T.Z. **Variação na concentração de nutrientes ao longo do caule de *Eucalyptus saligna***: implicações na utilização energética dos resíduos florestais. Piracicaba: IPEF, 1981. 7 p. (Circular Técnica, 136).

ZENID, G.J. (Ed.). **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: IPT; SVMA, 2009. 99 p.

ZHANG, J.W.; OLIVER, W.W.; BUSSE, M.D. Growth and development of ponderosa pine on sites of contrasting productivities: relative importance of stand density and shrub competition effects. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 36, p. 2426-2438, 2006.

ZHANG, S.; ALLEN, H.L. Foliar nutrient dynamics of 11-year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) following nitrogen fertilization. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 26, p. 1426-1439, 1996.

ZOBEL, B.J. Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations. In: IUFRO CONFERENCE, 1980, Oxford. **Proceedings...** Oxford: IUFRO, 1980. p. 169-188.

_____. Silvicultural effects on wood properties. **IPEF International**, Piracicaba, n. 2, p. 31-38, 1992.

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

ZWEIFEL, R.; DREW, D.M.; SCHWEINGRUBER, F.; DOWNES, G.M. Xylem as the main origin of stem radius changes in *Eucalyptus*. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, p. 1-15, 2014.