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

**Plasticidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no contexto das
mudanças climáticas: interação do déficit hídrico e da fertilização
no crescimento e qualidade do lenho das árvores**

Mariana Pires Franco

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

**Piracicaba
2018**

Mariana Pires Franco
Engenheira Florestal

Plasticidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no contexto das mudanças climáticas: interação do déficit hídrico e da fertilização no crescimento e qualidade do lenho das árvores

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2018

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

Franco, Mariana Pires

Plasticidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no contexto das mudanças climáticas: interação do déficit hídrico e da fertilização no crescimento e qualidade do lenho das árvores / Mariana Pires Franco. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

171 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Qualidade da madeira 2. Eucalipto 3. Extrativos 4. Arquitetura dos vasos 5. NIR 6. Imagem hiperespectral I. Título

**Dedico este trabalho aos meus pais,
Maria José e Roberto,
com todo amor e carinho.**

AGRADECIMENTOS

A produção de uma tese de doutorado exige não só o trabalho árduo e contínuo do autor, mas depende também de muitas outras pessoas trabalhando coletivamente para que o trabalho se concretize.

Agradeço primeiramente à Deus, pelas oportunidades que me foram concedidas durante todo esse trabalho, pela saúde e por sempre iluminar meu caminho;

À minha família, principalmente pai, mãe e avós que sempre estiveram ao meu lado nessa trajetória;

Ao Chico, pela sua admiração, companherismo, ternura, apoio, incentivo e entusiasmo;

Ao meu orientador francês Gilles Chaix, pela oportunidade, amizade, imensa confiança em mim, broncas, cia. de cafézinho no Brasil e na França e, acima de tudo, influenciador.

Admiro a pessoa que você é me inspiro em você. Tenha minha maior gratidão por tudo!

Merci beaucoup!

Ao meu orientador brasileiro Mario Tommasiello Filho pela oportunidade, parceria, confiança, paciência e por sempre acreditar no meu trabalho. Sem o seu esforço inigualável pelo laboratório, nada disso seria possível;

Aos meus (muitos!) amigos que agora estão espalhados por todo esse mundo, principalmente no Brasil e na França;

À Giovana Monteiro, pela ajuda nas burocracias mas, principalmente, pela amizade, parceria e carinho;

Aos professores e coordenadores da pós-graduação Edson José Vidal da Silva e Demóstenes Ferreira da Silva Filho por toda ajuda, incentivo e confiança depositada em mim. Vocês fazem toda a diferença para o Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais;

À Jussara Braz Bonnal, pela imensa hospitalidade e carinho quando à minha chegada em *Montpellier*, cidade que me acolheu muito bem e que já considero minha segunda casa;

Ao André Barone pelo incentivo, paciência, conversas, parceria e atenção;

Aos professores Carlos Sette Jr., Adriano Ballarin, Matheus Chagas e Fidel Roig pela presença constante na avaliação dos meus trabalhos, pela amizade e dedicação;

Aos pesquisadores Jean-Michel Roger e Nathalie Gorretta, sem os quais importante parte desse trabalho não poderia ser realizado e, sobretudo, pela paciência e por me mostrar como se faz uma pesquisa de alta qualidade;

Ao *Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture* (IRSTEA), pelo espaço, oportunidade e confiança no meu trabalho;

À todo o pessoal da UNICAMP, especialmente ao prof. Célio Pasquini, Cristiane Vidal, Eduardo Paiva e Rafael Ribessi pela oportunidade de realização da aquisição das imagens HI-NIR, pelos ensinamentos e incentivo ao trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), *Comité Français d'Evaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil* (CAPES COFECUB) e ao *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD), pela concessão da bolsa e auxílio à pesquisa no Brasil e na França, sem as quais não seria possível a execução desse trabalho e ao enriquecimento pessoal e científico que a vida na França me proporcionou;

Ao pesquisador Jean-Paul Laclau, pela disponibilização da área experimental e importantes contribuições à esta pesquisa;

À Estação Experimental de Itatinga, em especial ao Rildo, Eder e Elaine, por todo apoio no trabalho de campo;

À Maria Bermudez e Aparecido Candido Siqueira, sem os quais esse trabalho não poderia ser feito e, sobretudo, pela amizade e carinho;

À Samara Franzol e Lucas Oste pela imensurável ajuda neste trabalho, amizade e confiança;

À Eimi Arikawa pela ajuda nos trabalhos estatísticos e pela paciência e solicitude;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, pelo espaço para realização deste trabalho e pelas belezas naturais deste lindo *campus*;

Aos amigos de laboratório e da pós-graduação, pela convivência e bons momentos compartilhados;

À todas as pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse possível, minha eterna gratidão!

**“Antes de assumir alguma coisa na vida,
é sábio pensar sobre a natureza de nossa motivação.
Sem uma motivação pura, os resultados não costumam ser auspiciosos.
Nós colhemos o que semeamos. Quem inicia uma viagem
sem levar em conta a motivação e sem saber
um pouco sobre a importância da intenção, é um homem tolo”.**

Passos para a liberdade – Reshad Feild

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	15
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 Mudanças climáticas	23
3.2 Plasticidade das árvores de eucalipto em um contexto de mudanças climáticas	24
3.3 Efeito do déficit hídrico no crescimento das árvores	26
3.4 Resposta do eucalipto à adubação potássica	28
3.5 Efeito da fertilização com sódio em árvores de eucalipto.....	30
3.6 Substituição do potássio pelo sódio	31
3.7 Interação do potássio e sódio com a disponibilidade hídrica	32
3.8 Qualidade do lenho de eucalipto submetido ao déficit hídrico	33
3.9 Periodicidade e crescimento em diâmetro do tronco de árvores de eucalipto e relação com as variáveis climáticas	35
3.10 Efeito da fertilização mineral nas propriedades do lenho de eucalipto.....	36
3.11 Propriedades do lenho.....	37
3.11.1 Arquitetura dos vasos	37
3.11.2 Compostos químicos da madeira: extrativos.....	41
3.12 Princípios da espectroscopia no infravermelho	44
3.12.1 Aquisição de uma imagem hiperespectral e métodos de análise dos dados	48
3.12.2 Transferência de calibração	57
3.12.3 Uso do HI-NIR para determinação da qualidade do lenho	58
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	63
4.1 Local de estudo	63
4.2 Plantio e tratos culturais	64
4.3 Delineamento experimental	65
4.4 Seleção, corte e coleta das amostras do lenho das árvores de eucalipto.....	66
4.5 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto: densidade aparente e básica .	67
4.5.1 Densidade aparente do lenho das árvores de eucalipto	67
4.5.2 Densidade básica do lenho das árvores de eucalipto	69
4.6 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto	71
4.6.1 Dimensões das fibras	71

4.6.2 Dimensões dos vasos	72
4.7 Análises estatísticas	74
4.8 Imagem hiperespectral do lenho das árvores de eucalipto	75
4.8.1 Problemática da análise.....	75
4.8.2 Aquisição das imagens hiperespectrais.....	82
4.8.2.1 Preparação das amostras.....	82
4.8.2.2 Sistema de aquisição da imagem hiperspectral	82
4.8.3 Processamento e análise dos dados	83
4.8.3.1 Predição direta.....	84
4.8.3.2 Criação da base de dados para calibração, teste e dados standard.....	84
4.8.3.3 Construção do modelo PLS	85
4.8.3.4 Métodos de transferência de calibração	85
4.8.3.5 Desempenho da predição.....	89
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
5.1 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto	91
5.1.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X.....	91
5.1.2 Densidade básica do lenho por espectroscopia NIR	97
5.1.3 Cartografia da densidade aparente do lenho.....	99
5.2 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto.....	102
5.2.1 Dimensões das fibras	102
5.2.2 Dimensões e frequência dos vasos	107
5.2.3 Largura dos anéis de crescimento.....	112
5.3 Aquisição da imagem HI-NIR.....	114
5.3.1. Predição direta do teor de extrativos totais das “amostras finais”	114
5.3.2 Transferência de calibração.....	117
5.4 Análise integrada dos dados.....	125
6. CONCLUSÕES.....	129
7. RECOMENDAÇÕES.....	131
REFERÊNCIAS	133

RESUMO

Plasticidade de árvores de *Eucalyptus grandis* no contexto das mudanças climáticas: interação do déficit hídrico e da fertilização no crescimento e qualidade do lenho das árvores

A plasticidade do *Eucalyptus* às mudanças no clima merece destaque, principalmente pelo fato da maioria dos povoamentos florestais implantados no Brasil serem, em geral, estabelecidos em regiões de baixa fertilidade, pobres em potássio (K) e submetidos a longos períodos de déficit hídrico. A expansão das plantações pode ser prejudicada pelas mudanças climáticas, com a alteração da frequência e intensidade da precipitação. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da interação do déficit hídrico e da fertilização com K e sódio (Na) no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *E. grandis* sob o contexto das mudanças climáticas. Em experimento do tipo *split-plot* instalado em junho de 2010, foram selecionadas 54 árvores de eucalipto com cinco anos submetidas a dois regimes hídricos (100% e 63%) e três fertilizantes (K, Na e controle). Realizou-se a amostragem do lenho, coletando-se seis discos nas posições base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total. Avaliou-se as propriedades físicas (densidade aparente por densitometria de raios x e predição da densidade básica por NIR), propriedades anatômicas (fibras e vasos) e química (predição do teor de extrativos totais pela aquisição da imagem HI-NIR), de acordo com os tratamentos. Para a predição dos extrativos, propôs-se a predição direta e a transferência de calibração entre equipamentos NIR e HI-NIR. A transferência foi baseada em uma coleção de base de calibração completa medida nos dois aparelhos. Comparou-se quatro modelos de transferência de calibração (*Update*, *Reprofile*, PDS e TOP). A eficácia dos modelos foi testada em um grupo de amostras teste (1/3 das amostras totais). Os resultados mostram que em todas as propriedades do lenho houve efeito significativo dos tratamentos; a densidade aparente é menor nas árvores fertilizadas com K e Na e sem exclusão parcial de chuvas. A predição da densidade básica apresentou resultado satisfatório com RMSECV igual a 0,022 g/cm³. As fibras são maiores nas árvores fertilizadas com K e apresentam maior espessura de parede nas árvores controle, ambas na condição de exclusão parcial de chuvas. Os vasos e a largura dos anéis de crescimento sofreram influência, principalmente, da exclusão de chuvas. A predição direta do teor de extrativos totais foi eficaz, mostrando resultados semelhantes com a literatura para valores de extrativos de eucalipto preditos e observados. O tratamento K sem exclusão parcial de chuvas apresentou o menor valor médio predito de extrativos totais (3,90%). O melhor modelo de transferência de calibração foi o TOP, com SEP de 1,53%, SECV de 1,41% e R² de 0,88. Conclui-se que a interação do déficit hídrico e da fertilização influenciou as propriedades do lenho das árvores de *E. grandis* e as análises realizadas permitem traçar estratégias mais adequadas para dar subsídio à expansão de povoamentos florestais brasileiros em áreas sujeitas a longos períodos de seca.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Eucalipto; Extrativos; Arquitetura dos vasos; NIR; Imagem hiperespectral

ABSTRACT

Plasticity of *Eucalyptus grandis* trees in the context of climate change: interaction of drought and fertilization on wood growth and quality

The plasticity of the *Eucalyptus* to changes in the climate deserves to be highlighted, mainly because most of the forests implanted in Brazil are generally established in regions of low fertility, poor in potassium (K) and subjected to long periods of drought. Expansion of plantations can be hindered by climate change, with changes in the frequency and intensity of precipitation. The objective of this work is to evaluate the interaction of drought and fertilization with K and sodium (Na) on the growth and quality of *E. grandis* trees in the context of climate change. In a *split-plot* experiment installed in June 2010, 54 *Eucalyptus* trees with five years submitted to two water regimes (100% and 63%) and three fertilizers (K, Na and control) were selected. Sampling was carried out by collecting six discs at the base positions, DBH, 25, 50, 75 and 100% of the total height. The physical properties (apparent density by x-ray densitometry and basic density prediction by NIR), anatomical properties (fibers and vessels) and chemistry (prediction of total extractive content by HI-NIR image acquisition) were evaluated according to the treatments. For the prediction of extractives, the direct prediction and calibration transfer between NIR and HI-NIR equipment was proposed. The transfer was based on a complete calibration base collection measured on both devices. Four calibration transfer models (*Update*, *Repfite*, PDS and TOP) were compared. The efficacy of the models was tested in test set samples (1/3 of the total samples). The results show that in all the properties of the wood there was significant effect of the treatments; the apparent density is lower in the trees fertilized with K and Na and without partial throughfall exclusion. The prediction of the basic density presented satisfactory results with RMSECV of 0.022 g/cm³. The fibers are larger in the trees fertilized with K and present a greater thickness of wall in the control trees, both in partial throughfall exclusion. The vessels and the width of the growth rings were influenced, mainly, by partial throughfall exclusion. The direct prediction of the total extractive content was efficacy, showing similar results with the literature for values of predicted and observed *Eucalyptus* extractives. The K treatment without partial rainfall exclusion had the lowest predicted mean value of total extractives (3.90%). The best calibration transfer model was the TOP, with SEP of 1.53%, SECV of 1.41% and R² of 0.88. The conclusion of this work is that the interaction of water deficit and fertilization influences the wood properties of *E. grandis* trees and the analyzes carried out allow to draw up more adequate strategies to subsidize the expansion of Brazilian plantation forests in areas subject to long periods of drought.

Keywords: Wood quality; Eucalypt; Extractives; Architecture of vessels; NIR; Hyperspectral image

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composição do espectro eletromagnético	44
Figura 2. Esquema das diversas formas de vibração em uma molécula triatômica heteronuclear.....	46
Figura 3. Espectros NIR de amostras de madeira de Eucalyptus	47
Figura 4. Esquema de uma matriz de dados de imagens HI-NIR	50
Figura 5. Desdobramento das matrizes 3D de imagens HI-NIR	51
Figura 6. Organograma de etapas para validação do modelo	55
Figura 7. Principais etapas de análise de imagens HI-NIR	56
Figura 8. Imagem HI-NIR de uma amostra de <i>Pinus sylvestris</i> para análise detalhada das variações químicas do lenho entre os anéis de crescimento, sendo (A) as três primeiras componentes principais (PCA); (B) concentração de lignina estimada com modelo preliminar	60
Figura 9. Local de estudo na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP	63
Figura 10. Croqui do delineamento experimental (split-plot) ilustrando os três blocos, com as 18 subparcelas contendo os seis tratamentos de fertilização e regimes hídricos.....	65
Figura 11. (A) vista geral do experimento, com destaque para o mecanismo de redução das chuvas (B).....	66
Figura 12. (A) corte das amostras em dupla serra circular paralela; (B) amostra casca-casca obtida; (C) densitômetro de raios X utilizado; (D) suporte metálico utilizado para encaixe das amostras dentro do equipamento	68
Figura 13. (A) vista geral do equipamento de raios X digital; (B) câmara de irradiação 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	69
Figura 14. Esquema de aquisição dos espectros NIR; (A) oito pontos na madeira sólida em disco por meio de fibra óptica; (B) dois pontos de aquisição por quadrado por meio de fibra óptica; (C) um ponto de aquisição por meio da esfera de integração nas posições 0 (seção quadrada representada pelo nº 4), 25 (seção quadrada representada pelo nº 4), 50 (seção quadrada representada pelo nº 3 e 5), 75 (seção quadrada representada pelo nº 2 e 6) e 100% (seção quadrada representada pelo nº 1 e 7) do raio.....	71
Figura 15. Avaliação da espessura e diâmetro do lume das fibras do lenho através do software <i>Image Pro Plus</i>	72

Figura 16. Imagem macroscópica do raio 1 de uma amostra de <i>E. grandis</i> , fertilizada com Na em condição de exclusão parcial de chuvas, para estudo da arquitetura dos vasos, de acordo com a delimitação dos anéis de crescimento referentes aos anos de 2011 a 2015 (denominados de 1 a 5, nesta ordem)	74
Figura 17. Esquema do caminho direto para realização da predição dos teores de extrativos da madeira baseado na calibração das amostras HI-NIR com base em amostras	76
Figura 18. Esquema da transferência de calibração entre os equipamentos NIR (<i>Vector</i> , <i>Brucker</i>) e HI-NIR (<i>SisuCHEMA</i> , <i>Specim®</i>)	77
Figura 19. Diagrama referente à organização e quantidade total de amostras usadas de acordo com cada equipamento utilizado para obtenção do modelo de transferência de calibração.....	79
Figura 20. Fluxograma dos métodos, sendo (A) coleta da imagem HI-NIR das amostras de madeira em pó da coleção; (B) divisão do conjunto de dados para conduzir a calibração e o teste do modelo; (C) PLS e construção dos modelos de transferência. O conjunto de dados N_{im} está incluído em N_{pt} ; $N_{im, teste}$ e $N_{pt, teste}$ são compostas pelas mesmas amostras; $N_{im, std}$ e $N_{pt, std}$ são compostas pelas mesmas amostras.....	80
Figura 21. Fluxograma dos métodos, sendo (A) coleta da imagem HI-NIR das amostras de madeira sólida da coleção; (B) divisão do conjunto de dados para conduzir a calibração e o teste do modelo; (C) PLS e construção dos modelos de transferência. O conjunto de dados N_{im} está incluído em N'_{pt} ; $N_{im, teste}$ e $N'_{pt, teste}$ são compostas pelas mesmas amostras sólida e pó, respectivamente; $N_{im, std}$ e $N'_{pt, std}$ são compostas pelas mesmas amostras sólida e pó, respectivamente.....	81
Figura 22. Esquema de funcionamento do equipamento HI-NIR utilizado, sendo a: fonte de radiação; b: bandeja móvel para amostra; c: amostra; d: fenda (<i>entrance line slit</i>); e: rede de difração de transmissão; f: detector bidimensional.....	83
Figura 23. Aquisição da imagem HI-NIR das (A) amostras em pó (4 mm); (B) amostras sólidas de 2 x 2 x 3 cm (comprimento, largura e espessura, nesta ordem); (C) “amostras finais” de 3 cm de espessura	83
Figura 24. Predição direta do teor de extrativos totais das “amostras finais” por meio do software MatLab R2015a.....	84
Figura 25. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo “PLS Mpt”. CV: validação cruzada	86
Figura 26. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração Update. CV: validação cruzada	87
Figura 27. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração Repfile. CV: validação cruzada.....	87

Figura 28. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração PDS. CV: validação cruzada	88
Figura 29. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração TOP	89
Figura 30. Variação radial da densidade aparente (g/cm^3) do lenho das árvores de eucalipto da classe de área basal média dos tratamentos C/+A, Na/+A, K/+A, C/-A, Na/-A e K/-A. 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. As amostras escolhidas para compor esta Figura são representativas da média geral de densidade aparente por tratamento.....	95
Figura 31. Variação da densidade aparente média do DAP do lenho das árvores de <i>E. grandis</i> , aos 12º, 24º, e 36º mês (CASTRO, 2014), 48º mês (LEGOAS, 2015) e 60º mês por tratamento.....	96
Figura 32. Relação entre valores de densidade básica ($\text{db} - \text{g/cm}^3$) predita pelo NIR e valores referência para todos os tratamentos (em validação cruzada). A linha contínua mostra a tendência dos dados e a linha tracejada representa a relação ideal entre os dados (linha diagonal)	99
Figura 33. Modelo 2D de variação da densidade aparente ao longo do tronco, realizado pela krigagem dos dados radiais das diferentes alturas (base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total) obtidos no equipamento de densitometria de raios X, para cada um dos tratamentos estudados	101
Figura 34. (A) variação radial do comprimento, (B) largura, (C) diâmetro do lume e (D) espessura da parede (μm) das fibras do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 60 meses, nos seis tratamentos	106
Figura 35. Variação anual (A) do diâmetro tangencial (μm), (B) % de área ocupada e (C) frequência dos vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 60 meses, nos seis tratamentos. Os anos de 2011 a 2015 correspondem ao anel 1 a 5, nesta ordem	110
Figura 36. Valores médios das larguras dos anéis de crescimento para cada tratamento, sendo 1 referente ao anel de crescimento formado no ano de 2011 e 5 referente ao ano de 2015, o ano de coleta das amostras.....	113
Figura 37. Espectros obtidos das 90 amostras de madeira em pó da base de dados NIR (em vermelho); das 90 amostras de madeira em pó da base de dados HI-NIR (em azul) e das 90 amostras <i>standard</i> (em amarelo).....	118

Figura 38. Resultados da predição em validação externa obtidos com os modelos sem transferência de calibração, sendo (A) NIR (506) testado sobre o conjunto de dados “*lab*”; (B) NIR (506) testado sobre o conjunto de dados “*im*”; (C) HI-NIR (90) testado sobre o conjunto de dados “*lab*”; (D) HI-NIR (90) testado sobre o conjunto de dados “*im*” e os resultados da predição em validação externa obtidos com os modelos com transferência de calibração, sendo (E) *Update*; (F) *Reptile*; (G) PDS sentido NIR → HI-NIR; (H) PDS sentido HI-NIR → NIR; (I) TOP. LV: número de variáveis latentes; R²: coeficiente de determinação; *bias*: viés; σ : desvio padrão (ou SEP); *slope*: inclinação da reta em relação à linha diagonal (*target line*); *offset*: compensações de pixels..... 123

Figura 39. Espectros da matriz “*comprimento de onda versus a diferença*” entre os espectros obtidos no NIR e no HI-NIR 124

Figura 40. Resultados da densidade aparente (g/cm³) em preto; predição direta da % de extrativos totais em vermelho e demarcação dos anéis de crescimento, a partir do ano 2011, em árvores de *E. grandis* no tratamento K/+A..... 127

Figura 41. Resultados da densidade aparente (g/cm³) em preto; predição direta da % de extrativos totais em vermelho e demarcação dos anéis de crescimento, a partir do ano 2011, em árvores de *E. grandis* no tratamento C/-A 128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diferentes autores e os valores de teor de extrativos totais (em solventes orgânicos ou água) encontrados no gênero <i>Eucalyptus</i>	44
Tabela 2. Região do infravermelho, respectivo comprimento de onda (nm) e característica medida	45
Tabela 3. Região espectral e respectiva natureza da transição vibracional.....	47
Tabela 4. Atributos químicos do solo da área experimental.....	64
Tabela 5. Amostras que compõe a coleção utilizada para obtenção do modelo de transferência de calibração.....	77
Tabela 6. Densidade aparente média, mínima e máxima (g/cm ³) do lenho das árvores de eucalipto, com 60 meses, de acordo com o tratamento	92
Tabela 7. Calibração e validação cruzada correspondente obtida pelo NIR para estimativa da densidade básica ponderada de todos os tratamentos	97
Tabela 8. Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (µm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, com 60 meses, por tratamento de fertilização.....	102
Tabela 9. Valores médios do diâmetro tangencial (µm), % de área ocupada e frequência (nº/mm ²) dos vasos no lenho das árvores de eucalipto, com 60 meses, por tratamento....	107
Tabela 10. Valores médios, mínimos e máximos preditos (%) e desvio-padrão (%) dos teores de extrativos totais das “ <i>amostras finais</i> ” para cada tratamento	115
Tabela 11. Resultados obtidos com os modelos sem transferência de calibração (NIR e HI-NIR) e com transferência de calibração testados no conjunto de dados “ <i>lab</i> ” constituída pelas amostras da coleção e “ <i>im</i> ” formada pelas imagens HI-NIR	119

1. INTRODUÇÃO

As florestas que ocorrem nas regiões tropicais podem ser afetadas pelas mudanças climáticas (CHOAT et al., 2012; IPCC, 2014). O aumento da temperatura e a alteração da frequência e intensidade das chuvas como resultado dessa mudança do clima podem ocasionar períodos de seca e, consequentemente, a queda no crescimento e até mesmo a mortalidade das florestas nestas áreas (CABRAL et al., 2011; WU et al., 2011; BINKLEY et al., 2017; CHRISTINA et al., 2017). A temática da seca é contemporânea (CHANG et al., 2018); a falta de chuvas alcançou níveis recordes em alguns estados brasileiros em 2014. No Sudeste, durante o verão, choveu apenas 55,5% do esperado (MCTI/INPE/CPTEC, 2014). Foi o segundo verão mais seco da série histórica, sendo superado apenas pelo ano de 1941. Em relação à temperatura média, ainda no Sudeste, foi registrada a média de 21,3° C considerada a mais alta de toda a série climatológica (IAG/USP, 2014; MCTI/INPE/CPTEC, 2014). No início de 2018, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) declarou que 2017 foi o ano mais quente sem *El Niño* (fenômeno que eleva as temperaturas atmosféricas) dos 137 anos de registros históricos.

Essa alteração climática, resultante das atividades humanas como o uso de combustíveis fósseis, a agricultura e mudança no uso da terra, (URZEDO et al., 2013) tende a se intensificar futuramente afetando os segmentos da cadeia produtiva de base florestal no Brasil (CHRISTINA et al., 2018), o qual totaliza 5,6 milhões de hectares de áreas com plantações de *Eucalyptus* (IBÁ, 2017). Esta significativa área com plantações demonstra a importância das florestas plantadas tropicais para suprir a demanda das indústrias nacionais e internacionais por produtos madeireiros e diminuir a pressão sobre as florestas naturais. A atividade econômica do país possui uma estreita relação com os recursos naturais e, por isso, depende das condições climáticas. Esta dependência deixa claro o interesse específico do Brasil em abordar estudos que envolvam a interação do déficit hídrico e da fertilização, como uma forma de minimizar esse problema.

A plasticidade das árvores do gênero *Eucalyptus* às mudanças no clima merece destaque principalmente pelo fato dos povoamentos florestais implantados no Brasil serem, em geral, estabelecidos em regiões de baixa fertilidade, pobres em potássio (K) e com longos períodos de déficit hídrico. Dentre as espécies de eucalipto, o *E. grandis* é a mais plantada nas regiões tropicais (GONÇALVES et al., 2013). Battie-Laclau (2013) descreve que a espécie, quando plantada no sudeste do Brasil, apresentou um comportamento definido como isohidrodinâmico (FRANKS et al., 2007; CALLISTER et al., 2008) pois demonstrou diferenças significativas entre as flutuações sazonais de potencial hídrico, permitindo manter taxas fotossintéticas relativamente altas e, consequentemente, o crescimento durante períodos de déficit hídrico moderado.

As árvores sujeitas ao déficit hídrico podem produzir extrativos para protegê-las, por exemplo, da inibição do crescimento como uma resposta adaptativa à seca (LEVITT, 1980; KOZLOWSKI, 2003; BOVY et al., 2010). Sob o ponto de vista fisiológico, as árvores detêm vários mecanismos que reduzem a perda de água em situações de déficit hídrico como controle da abertura dos estômatos (ARNDT et al., 2008; REICH, 2014) ou adaptações na flexibilidade das paredes celulares das folhas 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, 2009), conforme sugerido por Battie-Laclau et al. (2014b), Franco (2014), Christina et al. (2015) e Legoas (2015). Além disso, as árvores podem ajustar a arquitetura das raízes e folhas (CHRISTINA et al., 2017), adaptar a anatomia dos vasos e/ou fibras no xilema (FONTI et al., 2013; BATTIE-LACLAU et al., 2014a). Por consequência, a compreensão dos processos e das interações entre a disponibilidade de fertilizantes e hídrica sobre o funcionamento dos povoamentos de eucalipto (ALMEIDA et al., 2010; ATKINSON et al., 2011; LACHENBRUCH; MCCULLOH, 2014; CHRISTINA et al., 2015; CHRISTINA et al., 2018) são determinantes para manter a produtividade da floresta e idealizar novos métodos de manejo silvicultural, como a seleção de genótipos adaptados às mudanças climáticas globais, necessários para expansão das plantações florestais.

O K é o único cátion essencial para as plantas superiores (MALAVOLTA, 1980). O elemento assume importante função no ajuste do potencial hídrico e está envolvido no mecanismo de abertura/fechamento dos estômatos. Coker et al. (2002) afirmam que uma das funções mais importantes do K é aperfeiçoar as relações fonte-dreno nas árvores submetidas ao déficit hídrico através do transporte dos compostos resultantes da fotossíntese.

O K e o sódio (Na) são estruturalmente e quimicamente cátions monovalentes similares e, assim como o K, o Na pode ter um papel importante no ajuste osmótico (MARSCHNER, 1995). Battie-Laclau et al. (2013; 2014b), demonstram que o Na^+ e o K^+ compartilham algumas funções fisiológicas. Franco et al. (2014) e Sette Junior et al. (2014) obtiveram resultados satisfatórios para árvores de *E. grandis* que receberam aplicação de Na.

Além disso, a possibilidade de substituição parcial do K por Na 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, a importação do mineral representa 90% das quantidades utilizadas (HEFFER; PRUD'HOMME, 2008). Desta forma, a adubação potássica representa

um importante item de despesa no custo de produção das culturas florestais tropicais, evidenciando a importância dos estudos nessa área (FRANCO, 2014).

Por consequência, é necessária a compreensão do efeito da interação da disponibilidade hídrica e fertilização no crescimento e na qualidade da madeira das árvores, aplicando metodologias modernas e precisas, como a densitometria de raios X, espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e imagem hiperespectral (TOMAZELLO FILHO, 2006; TSUCHIKAWA, 2007; BELLON-MAUREL; DUBOIS, 2009; HEIN et al., 2009c; SETTE JUNIOR, 2010; MEDER; MEGLEN, 2012; NIAMKÉ et al., 2014).

O presente estudo visa contribuir no avanço da pesquisa sobre essa temática de interação da disponibilidade hídrica e fertilização, a qual é complexa e interdisciplinar. Embora estudos tenham apontado o efeito da fertilização na aclimação de plantas à seca, pesquisas em campo sobre árvores com mais de quatro anos que tratam da interação da fertilização com K e Na e da exclusão parcial de chuvas nunca foram feitas em áreas tropicais. É importante que o Brasil aumente a produção científica nessa questão para alcançar um maior espaço no debate mundial sobre as mudanças climáticas; para tanto, é necessário conhecer as consequências para saber como enfrentá-las previamente. Por isso, a hipótese do estudo é a de que a fertilização potássica e sódica pode minimizar os efeitos da baixa disponibilidade hídrica, tornando as plantações viáveis em regiões com períodos de seca. Os resultados obtidos permitirão um conhecimento maior sobre a vulnerabilidade do *E. grandis* às mudanças climáticas e traçar estratégias mais adequadas para dar subsídio a expansão de plantações florestais brasileiras em áreas sujeitas a períodos com déficit hídrico.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito da interação do déficit hídrico e da fertilização com K e Na no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* sob o contexto das mudanças climáticas.

Como objetivos específicos citam-se (i) determinação da densidade aparente do lenho pelos métodos de densitometria de raios X; (ii) determinação do perfil radial-longitudinal da densidade aparente por meio de modelo estatístico; (iii) predição da densidade básica do lenho com equipamento NIR; (iv) determinação das características anatômicas do lenho; (v) predição do teor de extrativos totais do lenho por meio da aquisição da imagem hiperespectral; (vi) avaliar a influência das variáveis climáticas nos parâmetros de qualidade do lenho estudados e (vii) discutir os resultados obtidos quanto a análise da interação da disponibilidade de K e Na e regime hídrico sobre o crescimento e variabilidade das propriedades anatômico-físico-químicas do lenho das árvores.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mudanças climáticas

De acordo com o último Relatório do IPCC publicado em 2014, o aquecimento global constitui uma realidade e está claro que as atividades antrópicas estão ligadas às mudanças climáticas. Segundo o Quinto Relatório, a humanidade deve agir imediatamente e em escala global para reverter o que for possível, porém a mesma já está sofrendo alguns desses impactos da mudança global, como aumento na frequência de eventos extremos, maior taxa de extinção de espécies, incêndios florestais, períodos de seca extrema etc. Neste Relatório, os cenários utilizados no Relatório de 2007 foram substituídos e simplificados em quatro cenários, chamados de “*Representative Concentration Pathways*”. De maneira geral, os cenários se referem à quantidade de energia absorvida pelos gases de efeito estufa (GEE).

Devido em grande parte ao crescimento econômico e populacional, a emissão de GEE tem aumentado desde a era pré-industrial. Esta maior concentração de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) tem sido apontado como a causa dominante do aquecimento global observado desde a metade do século 20 (IPCC, 2014). Em escala global, prevê-se para o período de 2016-2035 o aumento da temperatura média entre 0,3-0,7° C (cenário médio, em relação ao período 1986-2005). Já para o final do século 21, no período correspondente a 2081-2110, estima-se um aumento médio da temperatura entre 0,3-1,7° C no cenário mais otimista e de 2,6-4,8° C no mais pessimista (em relação ao período de 1850-1900).

Além disso, o Relatório prevê maior frequência de temperaturas quentes e extremas, menor frequência de temperaturas frias extremas e mudança na frequência e intensidade das chuvas (IPCC, 2014). Estas mudanças podem constituir uma ameaça direta às plantações florestais, principalmente nas regiões dos trópicos onde tais mudanças podem acontecer de forma mais acentuada (ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2011; REAY et al., 2012; IPCC, 2014).

Estudos com ênfase na quantificação destas mudanças climáticas estão cada vez mais frequentes (PINKARD, 2017). Urzedo et al. (2013) mostram que práticas silviculturais adequadas são de extrema importância para minimizar a emissão de GEE gerados pelo uso de fertilizantes minerais e/ou orgânicos. Os autores salientam que, apesar do N₂O e o CH₄ serem emitidos em menores quantidades que o CO₂, estes são 298 e 25 vezes mais potentes em causar o efeito estufa, respectivamente.

De maneira geral, no Brasil o aquecimento tem sido observado desde o início do século 20 ao longo de todo o território, especialmente nas estações outono/inverno. Os

pesquisadores apontam uma tendência de maior frequência de dias mais quentes no inverno (PBMC, 2018), sendo que o valor mais elevado de taxa de aquecimento foi observado na floresta Amazônica (SCOTT et al., 2018). Contudo, em relação às chuvas, a tendência não é muito clara; alguns estudos sugerem uma tendência de aumento na frequência de extremos nas regiões sudeste, sul e norte (MCTI/INPE/CPTEC, 2014). Ainda em estudo publicado pelo MCTI/INPE/CPTEC em 2007, é relatado que no futuro haverá na região Sudeste e Sul a probabilidade de aumento das chuvas entre 0,2-0,3 mm dia⁻¹ e da temperatura em 1,2°, 2,2° e 3,5° C em 2020, 2050 e 2080, respectivamente.

Em um contexto de mudanças climáticas no Brasil e implantação dos povoamentos florestais, um agravante desse cenário é o fato de que as plantações são, de maneira geral, estabelecidas em regiões de baixa fertilidade e submetidas a longos períodos de déficit hídrico, condição inerente a determinados locais (GAVA, 1997; GONÇALVES et al., 2004a). Neste sentido, o desafio atual das pesquisas é demonstrar como estas variações climáticas afetam a ecofisiologia das árvores e como controlar ou compensar tais variações. Por isso, caracterizar as mudanças observadas em povoamentos florestais sujeitas ao déficit hídrico pode constituir um passo importante para a seleção de genótipos, orientar práticas silviculturais diferenciadas e traçar novas estratégias que possibilitem a produção madeireira de forma economicamente viável em áreas sujeitas a esta condição.

Nos trabalhos apresentados por Weltzin, Loik e Schwinning (2003), Battie-Laclau (2013), Castro (2014) e Legoas (2015) estratégias como observação em longo prazo da floresta, caracterização do clima e testes de novas práticas silviculturais são formas de manejar a floresta e obter produções satisfatórias, mesmo em situação de experimentação de redução induzida da precipitação.

3.2 Plasticidade das árvores de eucalipto em um contexto de mudanças climáticas

Plasticidade fenotípica é a habilidade de um organismo de alterar suas condições morfofisiológicas em resposta às mudanças nas condições ambientais que ele vive (BRADSHAW, 1965). Em árvores sob condições de déficit hídrico, os resultados mais relatados na literatura são a diminuição da taxa de crescimento e do acúmulo de biomassa, podendo levar à mortalidade (ALLEN, 2009; CABRAL et al., 2010). Entretanto, as árvores do gênero *Eucalyptus* são capazes de desenvolver mecanismos de adaptação às situações de seca como maior crescimento do sistema radicular (CHRISTINA et al., 2017), rápido controle de abertura/fechamento dos estômatos e aumento da área foliar, visando melhorar a eficiência do uso da água para minimizar os efeitos do déficit hídrico no metabolismo celular da planta (LACLAU et al., 2005; ALMEIDA, 2009; ALMEIDA et al., 2010; SETTE JUNIOR, 2010; BATTIE-LACLAU, 2013).

As estratégias desenvolvidas pelas plantas para sobreviver ao déficit hídrico podem variar em periodicidade, frequência, intensidade e duração. As principais estratégias relatadas são as (i) plantas capazes de regular o metabolismo frente à condição de déficit hídrico, chamadas de “*drought escapers*” e (ii) plantas capazes de suportar a condição de déficit hídrico, por meio de mecanismos de resistência, evitação ou tolerância (“*drought resistants, drought tolerants e drought avoiders*”) (TARDIEU, 2005).

As árvores ditas capazes de regular o metabolismo frente à condição de déficit hídrico são aquelas que regulam a produção de hormônios relacionados com a fenologia das folhas através de um ciclo mais curto ou dormência, a fim de que o tempo de crescimento (sensível à falta de água) e o período de déficit hídrico coincidam o mínimo possível (SPERRY et al., 2002; TARDIEU, 2005).

As plantas resistentes à seca são aquelas que crescem em condições climáticas extremas, como as xerófitas. As árvores tolerantes suportam os períodos de seca mantendo a turgescência das células por meio 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 à planta suportar longos períodos de déficit hídrico sem que aconteça o comprometimento da sua integridade física (SPERRY et al., 2002).

As árvores capazes de evitar os problemas recorrentes da falta de água são aquelas capazes de manter elevado o potencial de hidratação dos tecidos, por meio do aumento da biomassa radicular, diminuição da área das folhas, senescência precoce, fechamento estomático, cutícula reforçada, aumento da resistência à cavitação e diminuição da taxa de crescimento em diâmetro do tronco. Todavia, essa capacidade de evitar é considerada rápida, uma vez 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 das anteriores, suportam a condição climática com um nível baixo de hidratação dos tecidos, mantendo a turgescência celular para aumentar a tolerância à desidratação. Além disso, são capazes de manter os estômatos abertos, com melhor eficiência no uso da água, onde o balanço de carbono permanece positivo, diminuindo as chances de consumir todos 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 retomada lenta a moderada do crescimento, muitas vezes logo após um período inicial de inibição. Isso explica porquê árvores que vivem em constante situação de déficit hídrico apresentam baixo crescimento, tamanho e senescência foliar diferenciada, além de reduzir a produção de flores e frutos, com o intuito de economizar energia e manter ativas as funções vitais e, claro, sobreviver ao déficit de água (BATTIE-LACLAU, 2013).

Blake e Tschaplinski (1992), Battie-Laclau (2013) e Christina et al. (2017) demonstram que o *E. grandis* tem especial capacidade de minimizar os efeitos do déficit hídrico. Os autores observaram que a espécie detém mecanismos que prontamente respondem à falta de água, citando-se redução da condutância estomática, da área foliar e da transpiração e aumento da eficiência de uso da água, mantendo (ainda que de forma reduzida) o crescimento em períodos de déficit hídrico. Reis et al. (2006) descrevem que as árvores de eucalipto são capazes de desenvolver mecanismos de adaptação climática, como maior crescimento radicular e consequente eficiência na absorção de água, considerada uma das adaptações mais importantes em uma situação de redução do recurso hídrico (BATTIE-LACLAU et al., 2014a; CHRISTINA et al., 2017).

Em situação de mudança do clima e seu consequente efeito negativo na produtividade das plantações florestais, torna-se uma questão estratégica a capacidade das árvores se adaptarem a esta nova condição climática. Por isso, as pesquisas sobre a resposta das plantas à deficiência hídrica, com a seleção de genótipos com tolerância e consequente introdução em programas de melhoramento genético são essenciais para que a produção florestal seja mantida, evitando prejuízos econômicos.

3.3 Efeito do déficit hídrico no crescimento das árvores

A água é o principal recurso que determina o padrão de distribuição das plantas na Terra. O metabolismo e os solutos envolvidos nas diversas reações de síntese de compostos nas plantas dependem da água para acontecerem. Além disso, a água constitui um meio de difusão e translocação de minerais e gases nos vegetais. Basicamente, cerca de 70% de cada célula das plantas é constituída por água, a qual exerce pressão nas paredes conferindo-a volume devido à turgescência (KRAMER; BOYER, 1995; SANTOS; CARLESSO, 1998).

O estado hídrico das plantas depende das condições do clima e da disponibilidade de água no solo. Hubbard et al. (2010) descrevem que estudos na área de fisiologia de plantas podem explicar a relação entre a eficiência de uso da água, biomassa produzida e volume de água utilizada, o que por sua vez permite calcular a tolerância à seca ou a capacidade de um determinado genótipo tem em lidar com o déficit hídrico.

Lisar et al. (2012) explicam que, dependendo da espécie, os estômatos podem fechar completamente sob condição de déficit hídrico moderado ou severo. Espécies consideradas tolerantes controlam a abertura estomática, permitindo por consequência, a fixação de carbono e melhora da eficiência no uso da água.

Na literatura que trata sobre o déficit hídrico, os autores criaram o conceito de gradiente ou níveis hídricos, definidos quantitativamente para facilitar os cálculos de

tolerância à falta de água. Tardieu (2005) conceitua o termo déficit hídrico para plantações florestais como sendo uma condição climática onde há desequilíbrio entre o potencial hídrico do solo e demanda de água pelas plantas.

Brando et al. (2008) e Allen (2009) simularam uma redução de 35 a 41% das chuvas por um período de quatro anos e verificaram uma diminuição de 41% da produção primária líquida aérea a partir do segundo ano. Os autores explicam que, em condições de déficit hídrico ou de seca prolongada, foi constatada a diminuição do crescimento e aumento da mortalidade das plantas. Os autores ressaltam que em um contexto de mudanças climáticas na Amazônia, onde haja elevada taxa de aquecimento e a diminuição da precipitação, estas circunstâncias poderiam levar a um aumento da respiração das plantas e o fechamento dos estômatos, podendo induzir um colapso nesse bioma.

Trabalhos sobre o efeito do déficit hídrico no crescimento inicial de eucalipto em ambiente controlado mostraram que houve uma redução do acúmulo da biomassa aérea e da área foliar, modificação na estrutura da árvore e adaptações morfofisiológicas (STAPE; RYAN; BINKLEY, 2004; CARTER; WHITE, 2009; CABRAL et al., 2011). Apesar disso, poucos estudos no âmbito fisiológico mostram o efeito do déficit hídrico severo e prolongado em experimentação de campo em árvores de eucalipto. Battie-Laclau (2013), Castro (2014) e Legoas (2015) avaliaram o crescimento das árvores de *E. grandis* sob condição de exclusão parcial de chuvas, com dois, três e quatro anos respectivamente, em uma mesma área experimental. Basicamente, todos os autores descreveram que as árvores com menor disponibilidade hídrica apresentaram menor crescimento em diâmetro do tronco, sendo que o efeito negativo do déficit hídrico foi evidenciado a partir do terceiro ano.

Durante a ocorrência de um estado de déficit hídrico, em um curto prazo as árvores apresentam mudanças na condutância estomática, uma vez que se trata de um processo muito sensível à variação hídrica no metabolismo. Já em médio prazo há alterações nos ajustes osmóticos por meio da acumulação de solutos, como o K (TAIZ; ZEIGER, 2009). Neste caso, é importante salientar que as folhas são capazes de realizar ajustes osmóticos para manter a turgidez em eventos de seca, permitindo a árvore continuar o crescimento e a abertura estomática por mais tempo, mesmo em uma condição adversa. Battie-Laclau (2013) demonstra a efetiva capacidade do *E. grandis* em controlar a perda de água ao meio-dia, fechando os estômatos neste período onde a demanda por evaporação é maior. A longo prazo, árvores afetadas pelo déficit hídrico podem alterar a estrutura do xilema para evitar a cavitação. A redução da atividade cambial é consequência da baixa produtividade da fotossíntese, principal fonte de energia para produção de xilema secundário (CARTER; WHITE, 2009; BATTIE-LACLAU, 2013).

3.4 Resposta do eucalipto à adubação potássica

A fim de atender as demandas atuais, as plantações de eucalipto apresentam, cada vez mais, a necessidade de expansão a novas áreas. Entretanto, Gava (1997) e Gonçalves et al. (2004a) destacam que as plantações de eucalipto no Brasil são estabelecidas, em geral, em regiões de baixa fertilidade, pobres em nutrientes devido à intemperização do solo e submetidas a períodos de déficit hídrico.

Para minimizar esta situação comum em regiões tropicais, a aplicação de fertilizantes minerais é indispensável para manter o balanço de nutrientes no sistema solo-planta e garantir a sustentabilidade da produção florestal (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).

O nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) constituem macronutrientes essenciais para o desenvolvimento das árvores. A deficiência destes nutrientes na planta pode causar, entre outros efeitos, a redução da área foliar e da assimilação fotossintética, mudanças na alocação dos compostos e redução da biomassa. Contudo, dentre estes três elementos, o K constitui-se em um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pelas plantas, superando o P e equiparando-se ao N (MALAVOLTA, 1980; PETTIGREW, 2008). No caso do desenvolvimento de árvores de eucalipto plantados comercialmente no Brasil, verifica-se uma estreita relação entre a taxa de crescimento, a taxa de acúmulo de biomassa e as quantidades de K presentes nos tecidos foliares e lenhosos (LACLAU et al., 2009). Bellote (1990) descreve que a quantidade de K exportada pelas árvores de *E. grandis* com sete anos é cerca de 300 kg ha⁻¹, distribuído entre o tronco, folhas e ramos (84, 10 e 6%, respectivamente).

Kafkafi (1990) explica que, em geral, toda planta acumula K como uma estratégia de segurança para garantir sua sobrevivência a um déficit hídrico repentino. Plantas com um teor de K adequado estão capacitadas a suportar longos períodos de baixa umidade do solo, uma vez que o K na planta afeta a facilidade que a mesma possui de extrair água do solo (JIN et al., 2011). Chaves et al. (2002) citam que vários experimentos mostraram que as respostas dos estômatos são muitas vezes mais diretamente relacionadas à umidade do solo do que à condição de água na folha, já que nestes trabalhos verificou-se que o fechamento dos estômatos ocorreu em resposta à migração de compostos químicos sintetizados nas raízes em condição de desidratação. A desidratação nas árvores pode estimular a síntese do ácido abscísico (ABA) o qual estimula, por sua vez, o fechamento dos estômatos. Isso ocorre porque as concentrações de ABA no xilema, provavelmente produzido na coifa das raízes, aumentaram com uma condição de ressecamento do solo.

Árvores com deficiência potássica apresentam fenótipo e sintomas fisiológicos típicos, como redução do crescimento da parte aérea, fechamento dos estômatos e murchamento das folhas, condições que levam à redução da fotossíntese e da regulação da transpiração (JIN et al., 2011).

A literatura é vasta quanto ao efeito da fertilização com NPK e seus efeitos sobre a produtividade de florestas de eucalipto. Contudo, estudos que visam conhecer o efeito isolado do K em espécies arbóreas são escassos (RÖMHELD; KIRKBY, 2010). Sabe-se que o íon K^+ é o único cátion monovalente essencial para as árvores, apresentando alta mobilidade, não faz parte de nenhum composto orgânico e constitui um dos elementos mais absorvidos (MALAVOLTA, 1980), concentrando-se no citoplasma das células e controlando os processos osmóticos, síntese de proteínas e transporte de solutos pelo floema (CAKMAK, 2005).

A resposta significativa do gênero *Eucalyptus* à disponibilidade de K tem sido estudada no Brasil e outros países, com destaque para as pesquisas de Silveira et al. (1995), Herbert (1996); Gava (1997), Faria et al. (2002), Gonçalves et al. (2008), Laclau et al. (2009), Almeida et al. (2010), Wright et al. (2011) e Christina et al. (2015). Silveira et al. (1995, 1998) mostram que o K foi um dos nutrientes com deficiência mais frequente em florestas brasileiras, destacando que a quantidade de K trocável é baixa em solos de regiões tropicais. Silveira (2000) em estudo nutricional de árvores, mostra que 40% do K foi encontrado no lenho de *Eucalyptus*, seguido pelas folhas com 25%. Battie-Laclau (2013) e Battie-Laclau et al. (2014b) mostraram que a aplicação de KCl aumentou em 45% a altura do *E. grandis*, até o terceiro ano. Já Castro (2014) descreve, para o mesmo experimento, que o uso de KCl incrementou até 2,6 vezes o volume do tronco em relação às árvores controle. Legoas (2015) mostrou que, independente do regime hídrico, a aplicação de K aumentou consideravelmente o diâmetro, altura e volume das árvores de *E. grandis*.

Ainda na mesma área experimental, Christina et al. (2015) mostraram que a produtividade primária bruta (PPB) média foi 28% menor sem a adição de K (controle), durante os três primeiros anos do plantio (com ou sem exclusão parcial de chuvas). Na condição sem K houve a redução da radiação ativa absorvida fotossinteticamente em 20% e da eficiência de uso da luz (para assimilação em carbono) em 10%, durante todo o período de crescimento. Com a adição de K, a condição de exclusão parcial de chuvas diminuiu o GPP em 25% e a eficiência de uso da luz (para assimilação em carbono) em 21%. O efeito da combinação da condição sem K e com exclusão parcial de chuvas foi menos severa do que a soma dos efeitos de deficiência em K e deficiência em água individualmente, levando à redução da biomassa do tronco e da produtividade primária bruta. A modelagem proposta mostrou que a fertilização com K e deficiência em água influenciaram, sobretudo, a absorção da radiação devido às mudanças no índice de área foliar e na altura das árvores.

As mudanças na PPB e na eficiência do uso da luz foram, entretanto, conduzidas por um conjunto mais complexo de parâmetros da árvore, especialmente aqueles que controlam a absorção de água pelas raízes e as capacidades fotossintéticas das folhas.

3.5 Efeito da fertilização com sódio em árvores de eucalipto

Devido ao aumento da salinidade causada por fatores antrópicos e pelas mudanças climáticas, a função e efeitos do Na nas plantas tem sido destacada recentemente (RENGASAMY, 2010; FAROOQ et al., 2015). Laclau et al. (2003) estimam que no Brasil a área total de solos salinos ricos em NaCl ultrapasse quatro milhões de hectares, o qual se estende não só em áreas costeiras, mas também em regiões semi-áridas, áridas e sub-úmidas. A possibilidade de expansão das áreas florestais para solos nestas condições exige estudos prévios quanto a possível intolerância e capacidade de desenvolvimento das árvores em um solo rico em Na.

Sabe-se que altas concentrações de sais no solo podem ser tóxicas para as plantas, principalmente por impedir a retirada de água do solo pelas raízes, causando problemas no balanço osmótico e iônico (MARSCHNER, 1995; MUNNS; TESTER, 2008). Além disso, os efeitos prejudiciais da salinidade do solo estão intimamente relacionados com altas concentrações de Na⁺ e deficiência em K⁺ (ZHANG; OLIVER; BUSSE, 2006). Poucas pesquisas explicam 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), Nabil e Coudret (2008) e Kronzucker e Britto (2011).

Entretanto, existem plantas que conseguem lidar com essa situação, desenvolvendo a capacidade de controle da captação de Na⁺ pelas raízes, transporte de Na⁺ pelo xilema e capacidade de extrusão do Na⁺ excedente. Neste sentido, pesquisas no intuito de conhecer melhor a tolerância do gênero *Eucalyptus* têm sido realizadas. Marschner (1995) em estudo sobre os efeitos do Na, caracterizou quatro comportamentos distintos em árvores de acordo com a resposta da aplicação deste elemento no crescimento. Associado a este estudo, Taiz e Zeiger (2009) mostram quais as funções metabólicas que necessitam da presença do Na para ocorrerem normalmente.

Marcar (1993, 2002) e Feikema et al. (2010) comprovaram a tolerância à salinidade em um estudo com eucalipto na Austrália. No Brasil, Almeida et al. (2010), Sette Junior (2010), Battie-Laclau (2013), Castro (2014), Franco (2014) e, mais recentemente, Legoas (2015) avaliando a fertilização sódica em *E. grandis* ao longo de quatro anos, concluíram que a nutrição com Na foi satisfatória, com valores de incremento em diâmetro do tronco e biomassa superiores às árvores controle e menores que as árvores que receberam KCl, porém com valores próximos. Estes resultados sugerem que o gênero *Eucalyptus* pode ser

tolerante a determinados níveis de Na, podendo se desenvolver e produzir biomassa. Apesar destes avanços, muitos aspectos sobre o papel do Na nas árvores ainda devem ser esclarecidos; pouco se conhece sobre o transporte interno do Na⁺ e como as plantas desenvolvem estratégias de sobrevivência à salinidade (KRONZUCKER; BRITTO, 2011).

3.6 Substituição do potássio pelo sódio

Fisiologicamente, o Na⁺ e o K⁺ compartilham várias funções nas plantas (SUBBARAO et al., 2003; RODRIGUES-NAVARRO; RUBIO, 2006). Subbarao, Chauhan e Johansen (2000) afirmam que o equilíbrio osmótico não constitui uma função específica do K⁺, podendo ser substituído por outros cátions como o íon Na⁺. Almeida (2009) explica que o Na assume funções semelhantes ao K no metabolismo vegetal, sendo ambos elementos alcalinos. Quando as concentrações de K são baixas, Kronzucker e Britto (2011) explicam que a função de regulação estomática por parte do Na é clara em árvores que receberam este fertilizante. Além disso, os mesmos autores observaram que em regiões com déficit hídrico, árvores com baixos teores de NPK conseguiram se desenvolver devido à presença de Na no solo.

Marschner (1995), Sette Junior (2010) e Gattward et al. (2012) explicam que, em termos fisiológicos, existe a possibilidade do Na substituir o K total ou parcialmente, visto que o Na constitui um soluto osmoticamente ativo nas plantas. Almeida et al. (2010), em estudo pioneiro no Brasil, constataram que as árvores de *E. grandis* que receberam o tratamento que combinava os fertilizantes K e Na apresentaram resultados satisfatórios quanto ao crescimento em diâmetro do tronco. Laclau (2001) cita a possibilidade de substituição parcial do K pelo Na com base no comportamento das árvores de *Eucalyptus* no Congo, as quais estão expostas à maior concentração de Na.

Estudos com *E. grandis* mostram um aumento da assimilação líquida de CO₂ nas folhas, redução da limitação da fotossíntese, maior área foliar e o aumento da máxima condutância estomática em árvores fertilizadas com Na em relação ao controle (ALMEIDA et al., 2010; BATTIE-LACLAU et al., 2014b). Contudo, neste mesmo estudo, quando comparada a fertilização de Na com K, as árvores que receberam Na assumem uma posição intermediária. Almeida et al. (2010), Battie-Laclau (2013), Battie-Laclau et al. (2014a; 2014b), Castro (2014), Franco (2014) e Legoas (2015) mostraram um efeito positivo da aplicação do Na no crescimento de árvores de *E. grandis* sujeito à solos pobres em K, sugerindo a substituição parcial dos elementos pela planta para realização das atividades metabólicas. Entretanto, é importante destacar que a substituição total não apresentou resultados tão satisfatórios; Castro (2014) aponta que árvores de eucalipto fertilizadas com

4,5 kmol ha⁻¹ de NaCl apresentaram 20 a 26% menos biomassa no tronco em relação às árvores fertilizadas com 4,5 kmol ha⁻¹ de KCl, sugerindo a utilização conjunta do Na e K.

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 de 2010) 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, conseqüentemente, os custos finais da madeira.

3.7 Interação do potássio e sódio com a disponibilidade hídrica

A fertilização com K é considerada importante para atenuar os efeitos da seca em plantações de eucalipto, proporcionando às árvores melhor regulação da atividade estomática, melhor transporte de água no xilema e aumento da capacidade fotossintética (BATTIE-LACLAU, 2013, MENDES et al., 2013). Da mesma forma, o efeito positivo, já relatado anteriormente, pela aplicação de Na nas funções osmorregulatórias e fotossintéticas em *E. grandis* em solos pobres em K, sugere que o Na pode também estar envolvido no ajuste fisiológico para lidar com a seca, de maneira similar ao K (BATTIE-LACLAU, 2013, BATTIE-LACLAU et al., 2014b).

Teixeira et al. (1995), Silva et al. (2004), Battie-Laclau (2013) e Christina et al. (2015) mostram que a adubação com K, em condição hídrica não limitante, aumentou expressivamente a produção da madeira e a eficiência da transpiração em árvores de eucalipto. Porém, em período de seca, a fertilização com K melhorou os mecanismos de adaptação à seca de *E. grandis*, destacando-se alta sensibilidade estomática, rápida recuperação da taxa fotossintética no início da estação chuvosa, redução no potencial osmótico e aumento da absorção da água nas camadas profundas do solo pelas raízes (CHRISTINA et al., 2017). Além disso, os autores destacam que os maiores valores de biomassa nas árvores de eucalipto fertilizadas com K deve-se, principalmente, ao aumento do índice de área foliar (LAI) e maior vida útil das folhas. Teixeira et al. (2008) destaca que para o eucalipto, a fertilização com KCl reduziu o consumo de água/unidade de área foliar e, em situação de menor disponibilidade hídrica, induziu um menor consumo de água.

Entretanto, as árvores de eucalipto de maiores dimensões que receberam KCl foram afetadas pela seca; Battie-Laclau et al. (2014a) concluiu que a fertilização com K induziu uma maior porcentagem de mortalidade, pelo alto valor do LAI e da condutância estomática de vapor de água demandando, por consequência, um maior consumo de água (CHRISTINA et al., 2015). Devido ao maior crescimento e maior demanda de água pelo

eucalipto, a adubação potássica acabou por agravar o déficit hídrico, tornando as árvores mais vulneráveis. Portanto, no contexto atual de mudanças climáticas com previsão de redução do regime pluviométrico, em regiões de risco severo de seca haverá necessidade da adaptação das práticas silviculturais para reduzir a demanda hídrica das plantações e, consequentemente, o risco de mortalidade (BATTIE-LACLAU, 2013).

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

3.8 Qualidade do lenho de eucalipto submetido ao déficit hídrico

O principal constituinte das células que compõem o xilema secundário é a água, a qual pode ser encontrada nas paredes celulares, no conteúdo protoplasmático das células e como água livre nas cavidades e espaços intercelulares. O fato da água ser o principal constituinte dos elementos que compõem a anatomia da madeira faz com que árvores sujeitas ao déficit hídrico apresentem diferentes respostas a esta condição (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2010). Drew et al. (2008, 2009) demonstraram que mudanças nas condições do clima, como períodos de seca ou inundação, podem alterar o desempenho fisiológico das árvores, muitas vezes causando alterações irreversíveis na estrutura da madeira.

A anatomia do lenho compreendendo basicamente os parâmetros comprimento e espessura das fibras e área, diâmetro tangencial e frequência dos vasos (mm^2), são os elementos mais suscetíveis às mudanças na disponibilidade hídrica (BAAS, 1973; BAAS; WERKER; FAHN, 1983; BARAJAS-MORALES, 1985; CARLQUIST; HOEKMAN, 1985; BASS; SCHWEINGRUBER, 1987; LINDORF, 1994; DE MICCO; ARONNE; BAAS, 2008; ROBERT et al., 2009; TREVIZOR, 2011; MCCULLOH et al., 2012; SCHOLZ et al., 2013; ZHAO, 2015). Trevizor (2011), Santini Junior (2013) e Trevizor (2016) estudando a estrutura anatômica de espécies amazônicas e da Patagônia argentina explicam que os elementos de vaso têm por função conduzir a água e nutrientes por toda a árvore, 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. Castro (2014) e Legoas (2015) observaram que árvores de *E. grandis* sujeitas a períodos de déficit hídrico e fertilizadas com K apresentaram vasos em menor quantidade e maiores em relação às árvores sem redução de chuvas e paredes de fibras menos 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 aumento da espessura da parede das células acontece devido à deposição de carboidratos, principalmente quando há diminuição do crescimento da árvore. Da mesma forma, Santini Junior (2013) observou que árvores que crescem em áreas de situação contrária, ou seja, com alta pluviosidade, apresentam as paredes das fibras mais finas e vasos em maior número e menor diâmetro. Oliveira et al. (2010) estudaram o comportamento de um híbrido de *E. 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. Wimmer, Downes e Evans (2002) e Drew et al. (2009) também observaram que a densidade e a espessura das paredes das fibras aumentaram em árvores sujeitas à limitação de água.

González et al. (2009), em estudo conduzido para verificar a influência do clima e do sítio nas propriedades da madeira, observaram que a densidade e a retratibilidade apresentaram maiores valores nas madeiras provenientes da região sujeita ao déficit 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 ocasiona, 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, menor densidade da madeira e vasos em maior número. Nos períodos definidos como desfavoráveis onde os recursos são escassos, o contrário acontece, ou seja, o lenho formado apresenta coloração mais escura, maior densidade e vasos em menor número (TROVATI; FERRAZ, 1984; TOMAZELLO FILHO, 1985; TOMAZELLO FILHO et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2012; CALLADO et al., 2013).

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

No Brasil, as pesquisas de campo com a exclusão artificial de 37% da precipitação evidenciaram efeito significativo na densidade básica do lenho de árvores de *E. grandis* de quatro anos (LEGOAS, 2014). Com a disponibilidade de água no solo ocorre o estímulo do crescimento do tronco das árvores de eucalipto, podendo afetar a formação do lenho tardio

(mais denso); assim a razão do lenho tardio/inicial aumenta ou diminui a densidade média total do lenho. Os resultados indicam que, de modo geral, a maior disponibilidade hídrica apresenta maior probabilidade de alterar as propriedades do lenho, em relação às demais práticas silviculturais (GONÇALVES et al., 2004b).

3.9 Periodicidade e crescimento em diâmetro do tronco de árvores de eucalipto e relação com as variáveis climáticas

O crescimento e desenvolvimento das árvores dependem das variáveis ambientais, as quais influenciam, dentre outros fatores, a velocidade de incremento do tronco ao longo do tempo (DREW; DOWNES, 2009). Basicamente, as células do câmbio são diretamente afetadas pelas condições do clima, reagindo às mudanças. Valenziano e Scaramuzzi (1967) em estudo com *E. camaldulensis* 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. Todos 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.

Castro (2014) destaca que as árvores de eucalipto sujeitas ao déficit hídrico severo apresentaram o menor valor de incremento do tronco (chegando a nulo), sendo que a condição inversa, ou seja, maior valor de incremento, foi observado no verão (final da estação chuvosa). Com isso, o autor construiu um padrão de crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto com dois períodos distintos de crescimento do tronco (i) baixo ou nulo no outono/inverno, pela limitação da precipitação e da temperatura, (com a interrupção da atividade cambial) e (ii) alto na primavera/verão pela retomada da atividade cambial em resposta à precipitação e à temperatura favorável.

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

Downes et al. (1999) explicam que a interação variáveis climáticas *versus* crescimento cambial é complexa, atua durante todas as estações do ano e tem uma estreita

relação com a fisiologia da árvore. Laclau et al. (2005), Sette Junior (2010) e Franco (2014) estudaram árvores de *Eucalyptus* com dendrômetros por um período de monitoramento maior que três anos e constataram que os períodos de máximo crescimento ocorrem nas estações mais chuvosas e os períodos de mínimo crescimento nas estações mais secas. Zweifel et al. (2014) afirmam ainda que a casca de árvores de *E. globulus* pode agir como uma camada passiva às flutuações do xilema, refletindo nas medições radiais do tronco.

3.10 Efeito da fertilização mineral nas propriedades do lenho de eucalipto

O efeito da aplicação de fertilizantes minerais e da taxa de crescimento nas propriedades da madeira ainda é um assunto controverso e com resultados difusos. Muitos autores afirmam terem observado correlações significativas entre a densidade da madeira e a taxa de crescimento das árvores devido ao uso de fertilizantes. Entretanto, outros autores disseram não terem observado correlação. A maioria da literatura nesta área tem por objetivo relatar o efeito de vários fertilizantes, como o NPK, na qualidade do lenho, sendo poucos os trabalhos que investigaram a ação de um único elemento sobre cada uma das propriedades da madeira.

Barrichelo e Shimoyama (1994) descrevem a importância de existir estudos neste assunto para árvores do gênero *Eucalyptus*. Os autores explicam que a atividade cambial, que é responsável pela formação do lenho, é controlada pela produção de hormônios nas gemas apicais e pela presença dos carboidratos produzidos nas folhas. Diante disso, deficiências nutricionais, como a de K, podem reduzir a biomassa aérea, acarretando a diminuição da produtividade fotossintética, comprometendo a atividade do câmbio.

Larson (1967), Jacob e Balloni (1978) e Andrade et al. (1994) explicam que a quantidade e tipo de fertilizante e o período do ano em que foi aplicado podem causar alterações na qualidade da madeira de eucalipto produzida. Kikuti e Namikawa (1990) e Raymond e Muneri (2000) afirmam que, em estudo com *E. saligna*, não houve mudanças nas propriedades do lenho causadas pela aplicação de fertilizantes.

Siddiqui (1972) estudou a influência da fertilização na ultraestrutura da parede celular e na composição química do lenho e 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*. Os resultados indicam que a fertilização pode provocar alterações na constituição química da parede celular, influenciando as propriedades da madeira (ZOBEL, 1992).

Estas mudanças ocasionadas no lenho podem tornar o uso de determinada madeira mais adequada para um determinado fim, em detrimento de outro. Lima (2005) concluiu que o aumento significativo do incremento das árvores fertilizadas, não implicou

necessariamente em mudanças das propriedades medidas em amostras de madeira. Deve-se lembrar ainda que o estudo do efeito da fertilização sobre a qualidade do lenho implica em considerar outros fatores como clima e fertilidade do solo (CHRISTINA et al., 2015).

A transição da madeira juvenil para adulta pode ser influenciada pela fertilização (LARSON, 1969). Garcia (1998) constatou que a fertilização influenciou nos resultados de densidade básica. Migliorini et al. (1988) concluíram que a densidade básica do lenho foi inversamente proporcional ao ritmo de crescimento das árvores em estudo conduzido em florestas de *E. grandis* de sete anos. Mello (1968) explica que a densidade básica, a espessura e o comprimento das fibras em árvores de *E. saligna* não sofreram efeito da aplicação de NPK. Vital (1990) cita muitos trabalhos que tiveram resultados conflitantes quanto à relação densidade básica e fertilização.

Fromm (2010) observou que a baixa concentração de K causou a diminuição do diâmetro tangencial dos vasos. Tomazello Filho (2006) explica que a fertilização causou o aumento do comprimento das fibras, contudo o autor não observou diferenças significativas nas dimensões dos vasos do lenho de *E. grandis* x *urophylla* sujeitas à tratamentos de fertilização e irrigação.

Sette Junior et al. (2009, 2010, 2014), Castro (2014), Freitas et al. (2015) e Legoas (2015) demonstraram que as dimensões de fibras e vasos de *E. grandis* foram significativamente afetadas pela fertilização com K e Na ao longo de quatro anos de experimentação; a frequência dos vasos foi maior em árvores de menor crescimento e a porcentagem de área ocupada pelos vasos foi maior no lenho das árvores de maior crescimento. Dunisch, Bauch e Muller (1998) explicam que a fertilização com K foi fundamental para diferenciação dos traqueídeos de *Picea abies*. Em estudo semelhante, Silveira (2000) verificou que a aplicação de K causou um aumento significativo no comprimento e na largura das fibras de quatro progênies da espécie *E. grandis*.

3.11 Propriedades do lenho

Algumas propriedades da madeira de fundamental importância para este trabalho serão explanadas a seguir.

3.11.1 Arquitetura dos vasos

Em escala global, dos polos em direção ao Equador, observa-se um gradiente de distribuição das chuvas, o qual impacta a diversidade, produtividade e estrutura das florestas (GENTRY, 1988; CLARK et al., 2001; ENGELBRECHT et al., 2006). Neste contexto, a disponibilidade de água exerce uma forte influência sobre a estrutura anatômica

das árvores, e por isso padrões diferenciados das estruturas de condução de água e metabólitos têm sido relacionados aos diversos tipos de clima.

As características anatômicas do xilema são resultado da demanda por sustentação, armazenamento e transporte de água pela árvore sob o aspecto de mudanças das condições climáticas (ZWEIFEL et al., 2006; OLANO et al., 2013). Galle et al. (2010) mostram que estas características anatômicas podem representar um reflexo das respostas fisiológicas da planta ocorrida depois de uma situação de estresse abiótico, como falta de água por exemplo.

O design hidráulico das árvores influencia o movimento da água das raízes até as folhas, assim diferentes arquiteturas hidráulicas podem causar consequentes diferenças na resposta da árvore à um período seco ou muito chuvoso. Sabe-se muito pouco sobre as vantagens e desvantagens da planta desenvolver (ou não) determinada característica anatômica e a provável contribuição dessa mudança para estratégias de adaptação ao clima e competição ecológica entre espécies (TYREE; EWERS, 1991; FONTI et al., 2010; CHRISTINA et al., 2017).

Pesquisas apontam que a arquitetura hidráulica tem um papel fundamental na estratégia adaptativa das árvores (CARLQUIST 1975, 1983, 1989; ZIMMERMANN 1978, 1983; BAAS; CARLQUIST, 1985; BAAS; SCHWEINGRUBER 1987; TYREE; SPERRY 1989; TYREE; EWERS 1991; TYREE; DAVIS; COCHARD, 1994; HACKE; SPERRY 2001; SPERRY, 2003; BAAS et al., 2004). Vários autores apontam mudanças ecológicas e filogenéticas no lenho das árvores e sugerem que tais mudanças são possíveis mecanismos evolutivos responsáveis por essa capacidade de adaptação às mudanças do ambiente (BAILEY; TUPPER 1918; CARLQUIST 1975, 1980; BAAS 1976, 1982; BAAS et al., 2004; EWERS; FISHER 1991) ou até mesmo no contexto das mudanças climáticas (ANDEREGG; MEINZER, 2015). De Micco, Aronne e Bass (2008) em estudo com árvores e arbustos mediterrâneos, explicam que, em geral, as árvores dessa região apresentam alta eficiência no transporte da água. Diversas espécies de arbustos apresentam xilema especializado na rápida condução da água (quando disponível) com vasos de placa de perfuração simples e diâmetro mais largo no lenho inicial. Além disso, apresentam vasos mais estreitos no lenho tardio e traqueídeos vasicêntricos como uma estratégia de segurança para os períodos de seca (BAAS; CARLQUIST, 1985; FAHN; WERKER; BAAS, 1986; CARLQUIST, 1989).

Scholander et al. (1965) descrevem, de forma experimental, a existência de uma pressão negativa no xilema de árvores; os autores ressaltam que as paredes lignificadas dos elementos de vaso ou traqueídeos conferem resistência à esta pressão. Contudo, o possível bloqueio da coluna de água e subsequente formação de bolhas pode acontecer, por exemplo, em situações de déficit hídrico, acarretando um fenômeno conhecido como cavitação ou embolia (ZIMMERMANN; BROWN, 1971).

A cavitação é considerada um dos principais fatores que levam a redução da produtividade das árvores, podendo ocasionar a morte da planta durante um período de seca (MCDOWEL et al., 2008). Nesta situação, há uma redução do fornecimento de água para as folhas, acarretando o decréscimo do potencial hídrico (MASRAHI, 2014). Na sequência, há um desencadeamento de embolia; o embolismo espalha-se de elemento para elemento por meio das placas de perfuração até que todo vaso torna-se inutilizável para transporte (HACKE; SPERRY, 2001). Neste caso, paredes celulares mais espessas, ou seja, tecidos com maiores densidades, podem evitar a cavitação. Além disso, as árvores lidam com a seca esperando condições climáticas mais favoráveis ao crescimento para reparar estas falhas, por meio do preenchimento dos vasos que sofreram cavitação ou produzindo novos (SPERRY et al., 2008).

Uma vez que a cavitação é inversamente influenciada pela funcionalidade do sistema hidráulico em condições de seca, a sobrevivência das árvores dos manguezais, por exemplo, constitui um caso de estudo particular. Robert et al. (2009) estudaram a arquitetura dos vasos de duas espécies de árvores de manguezais, *Avicennia marina* e *Rhizophora mucronata*. A densidade de vasos de ambas espécies e o agrupamento de vasos da *A. marina* são maiores em ambiente de maior salinidade. Neste contexto, os autores afirmam que estas espécies têm um sistema de transporte de água considerado eficiente para situações de seca.

Sob o ponto de vista funcional, características anatômicas que afetam a condutividade e, conseqüentemente, a vulnerabilidade à cavitação tem sido amplamente investigada (ZIMMERMANN 1982, 1983; EWERS 1985; SALLEO; LO GULLO 1993; LO GULLO et al., 1995; WAGNER et al., 1998; MARTÍNEZ-VILALTA et al., 2002; SPERRY 2003, HACKE et al., 2006; PITTERMANN et al., 2006; SPERRY HACKE; PITTERMANN, 2006). Do mesmo modo, estudos sobre a arquitetura dos vasos das diversas árvores distribuídas nos biomas em função do clima, mostram uma alta correlação da resistência à cavitação com a média anual de precipitação, principalmente em angiospermas perenes (MAHERALI; POCKMAN; JACKSON, 2004).

Particularmente, o estudo da influência do clima na anatomia do lenho de árvores de eucalipto é interessante, visto que a espécie apresenta rápida resposta às condições climáticas e ampla capacidade adaptativa (FRANKS; DRAKE; FROEND, 2007; CALLISTER et al., 2008). Searson et al. (2004) em pesquisa com *E. grandis* e *E. sideroxylon*, apontaram diferenças evidentes no diâmetro do vaso em resposta à limitação de água no sentido medula-casca, com um significativo aumento da parede das fibras, em contraste com uma menor frequência de vasos. Ainda, Fonti et al. (2010), em profuda revisão do assunto, descrevem essa mudança anatômica do lenho, devido às mudanças do clima, de acordo com os anéis de crescimento.

Entretanto, é importante esclarecer que a vulnerabilidade e a condutividade relativa são parâmetros baseados em conceitos hipotéticos sem uma base de cálculo hidráulico absoluto, mas sim baseado nos parâmetros anatômicos. Diante disso, a eficiência e segurança do sistema hidráulico das plantas depende não só dos vasos, como também da espessura da parede celular, das características das membranas das pontoações e a densidade da madeira (MCCULLOH; SPERRY 2005; SPERRY et al., 2006), além de outras características herdáveis e capacidade de plasticidade das espécies (AL-KHALIFAH et al., 2006).

A adaptação da anatomia da madeira sob uma condição de déficit hídrico é complexa e pode envolver a espessura da membrana e a porosidade das pontoações, comprimento, diâmetro e agrupamento de vasos e densidade da madeira (LENS et al., 2013). Estas estruturas anatômicas e físicas estão estritamente relacionadas com a capacidade de resistência do xilema à cavitação e aumento do suporte biomecânico (HACKE; SPERRY, 2001).

A dendrocronologia, como ciência da datação dos anéis de crescimento de árvores de climas sazonais, iniciou-se em 1901 por A. E. Douglass, ao estudar as correlações entre a largura dos anéis de *Pinus sp* e a periodicidade de secas em diversas regiões do Arizona, EUA (DOUGLASS, 1914). Eventos ambientais específicos que afetam a atividade cambial deixam impressões na anatomia da madeira (dentro do anel de crescimento). A dendrocronologia tem sido freqüentemente usada para reconstruir a distribuição temporal de eventos descontínuos com base nessas impressões (WIMMER, 2002). Estudos recentes descreveram essas impressões em relação ao efeito da seca (FONTI et al., 2010; VIEIRA et al., 2017).

Em regiões onde ocorrem períodos bem demarcados de seca, a largura dos anéis de crescimento está diretamente relacionada com o período de disponibilidade de água (DÉTIENNE, 1995). Em áreas de clima tropical, o limite dos anéis das diversas espécies é formado, em geral, durante a estação seca mais longa, expressando o ritmo da atividade cambial. Contudo, devido principalmente às grandes variações de temperatura e precipitações nas regiões tropicais, podem acontecer situações em que os anéis não são claramente marcados ou estão ausentes, acarretando maior dificuldade para a identificação e a datação desses anéis (DÉTIENNE, 1995).

A dificuldade enfrentada pelas plantas que crescem em situação de seca, referente à eficiência *versus* segurança do transporte de água, é um assunto muito citado entre pesquisadores da área. Árvores sujeitas à períodos de déficit hídrico apresentam, normalmente, características específicas na anatomia da madeira que permitem alta eficiência no transporte de água (quando a mesma está disponível), enquanto que podem manter a segurança da arquitetura hidráulica durante períodos de seca (DE MICCO,

ARONNE, BAAS, 2008). Contudo, diz-se que quanto maior a eficiência do xilema, maior a vulnerabilidade da planta à falha (WHEELER et al., 2005; EILMANN et al., 2011). Alta densidade, maior agrupamento e diminuição no diâmetro dos vasos têm sido mencionados como adaptação para evitar a redução da capacidade hidráulica depois da cavitação (BASS; WECKER; FAHN, 1983).

Segundo Steppe, Sterck e Deslauriers (2015), atualmente, os maiores desafios de pesquisas na área de arquitetura dos vasos são (i) quantificação dinâmica do crescimento diário (em carbono) no tronco; (ii) como essa dinâmica do carbono interage com a dinâmica da água pelo tronco (como o tronco coordena a reparação de embolismo e turgescência das células e, ao mesmo tempo, o crescimento do tronco) e (iii) entender como funciona os padrões de variação sazonal de crescimento do tronco. Os autores propõem, como alternativa de respostas destas questões, a combinação de metodologias de anatomia, ecofisiologia, dendrocronologia e ecologia para estudar a dinâmica do carbono e da água em uma mesma planta simultaneamente. Por consequência, este tipo de estudo pode gerar dados para construção de modelos de crescimento.

3.11.2 Compostos químicos da madeira: extrativos

As células do lenho das árvores são constituídas por macromoléculas de polissacarídeos (celulose, hemicelulose) e lignina. Outros constituintes de baixa massa molecular podem ser encontrados nos canais resiníferos, ductos gomíferos das células parenquimáticas, cerne e fora da parede celular e são denominados, de forma geral, de extrativos (SJÖSTRÖM, 1993). Assim, determinadas espécies podem ser caracterizadas em função da composição e quantidade de seus extrativos, que são encontrados também na casca, folhas, flores, frutos e sementes (SILVÉRIO, 2008).

No tronco das árvores, os extrativos se acumulam na região mais interna, chamada de cerne, a qual é fisiologicamente inativa e é constituída por células mortas (STEVANOVIC; PERRIN, 2009). Nesta região, basicamente, os compostos de reserva foram removidos e a deposição de produtos do metabolismo secundário no lume e na parede das suas células confere coloração mais escura à esta parte do lenho (HILLIS, 1962). Ainda, Hillis (1965) destaca que as principais características da formação do cerne em árvores de eucalipto são (i) perda do núcleo das células parenquimáticas, (ii) aumento do teor de extrativos e (iii) diminuição do teor de umidade e do pH devido à compostos ácidos dos extrativos.

Os extrativos da madeira compreendem uma ampla classe de compostos químicos, que podem ser removidos utilizando solventes orgânicos ou água (HILLIS, 1962; STEVANOVIC; PERRIN, 2009). A composição dos extrativos pode variar de forma significativa entre diferentes espécies de madeira e também dentro das diferentes partes da

árvore (HILLIS; BROWN, 1984). Larson (1969) destaca que até mesmo o uso de fertilizantes pode acarretar alterações nas características químicas da madeira. Franco (2014), em estudo com *E. grandis* sobre o teor de extrativos totais em árvores controle e fertilizadas com K e Na, observou maiores teores nas árvores controle, sugerindo as condições de crescimento lento (por não haver fertilizantes) favoreceu a maior produção de extrativos pela árvore. Já Sette Junior (2010) em estudo semelhante, descreveu a constituição química de *E. grandis* de acordo com os anéis de crescimento e observou que os teores de extrativos totais sofreram redução do anel 1 (mais próximo à medula) para o anel 4 (mais próximo da casca), na ordem de 63-70%, 47-60% e 37-70%, nos tratamentos controle, K e Na, respectivamente. Já Castro (2014) observou maiores valores de teor total de extrativos nas árvores fertilizadas com K em condição de exclusão parcial de chuvas, sugerindo que o maior crescimento causado pela fertilização induziu a uma condição maior de estresse na planta, provocando maior produção de extrativos para suportar a condição de água limitada.

Na indústria de papel e celulose, dependendo dos procedimentos que antecedem o processo de fabricação da polpa, como a época de colheita, a forma de transporte e a estocagem da madeira, a quantidade e composição dos extrativos na madeira podem mudar consideravelmente. Silvério (2008) faz uma revisão sobre os principais compostos presentes nos extrativos e como são suas estruturas moleculares.

Extrativos presentes na madeira de coníferas e folhosas causam problemas na produção em indústrias de papel e celulose (ALLEN, 1988). A acumulação de pequenas quantidades de extrativos da madeira nos maquinários pode resultar no desligamento das operações e, conseqüentemente, na redução da produção, maiores custos operacionais e aumento da incidência de defeitos de qualidade (HILLIS, 1962; HILLIS; SUMIMOTO, 1989).

Os grânulos que se acumulam nos equipamentos e as manchas de impureza na polpa celulósica são chamados de *pitch* e contêm quantidades consideráveis de compostos lipofílicos (MUTTON, 1962). Os extrativos lipofílicos da madeira, também conhecidos como resinas, são compostos principalmente de ácidos graxos, ácidos resínicos, ceras, álcoois, terpenos, esteróis, ésteres de esteróis e glicerídeos (SJÖSTRÖM, 1993) e apresentam comportamento químico diferente durante e após a polpação. Durante o processamento da madeira na indústria, os extrativos lipofílicos são difíceis de remover e, em madeiras resinosas, o problema de formação de *pitch* é ainda maior (GUTIÉRREZ et al., 1999).

Encontrar soluções para este problema começa com a identificação dos extrativos presentes na madeira que podem levar à formação do *pitch*. Há muitos estudos sobre a composição de extrativos de algumas madeiras de coníferas e folhosas comumente usadas na indústria de celulose e papel (HILLIS 1962; FENGEL; WEGENER, 1984; ROWE, 1989). Contudo, pouco se sabe ainda sobre a composição de extrativos da madeira de eucalipto, que é amplamente utilizado para fabricação de papel e celulose em indústrias de diversos

países. Gutiérrez et al. (1999) citam que, entre as diferentes espécies de *Eucalyptus*, o *E. globulus* é a matéria-prima economicamente mais importante para a produção de celulose e papel na Espanha. Estudos publicados sobre a composição química de extrativos da madeira de *E. globulus* referem-se principalmente à fração mais polar que contém fenóis e polifenóis (YAZAKI; HILLIS 1976; CHARRIER; MARQUES; HALUK, 1992) e, quanto à fração lipofílica cita-se a ocorrência de vários ácidos graxos, hidrocarbonetos e sitosterol livres e esterificados (SWAN; ÅKERBLOM, 1967).

Gutiérrez et al. (1999) e Barbosa, Maltha e Cruz (2005) fizeram a determinação química de extrativos lipofílicos da madeira de *E. globulus* e *E. grandis*, respectivamente, visando os resultados como um respaldo para indústria de polpação kraft. Compostos como esteróis, ésteres de esteróis, hidrocarbonetos e triglicerídeos foram identificados. O teor de extrativos totais em acetona foi de 1,52% e 1,62%, respectivamente. Tal identificação permitirá a indústria a encontrar soluções biotecnológicas ou fisicoquímicas efetivas para a remoção dos compostos responsáveis pela deposição de *pitch*.

As árvores sujeitas ao déficit hídrico podem produzir metabólitos secundários para protegê-las, por exemplo, da inibição do crescimento como uma resposta adaptativa à seca (LEVITT, 1980; RAMBAL, 1992; BUSSOTTI et al., 2002; KOZLOWSKI, 2003; BOVY et al., 2010). Entre todos os metabólitos secundários sintetizados pelas plantas, os compostos fenólicos, terpenos e flavonoides são os mais difundidos (WINKEL-SHIRLEY, 2002; TURTOLA et al., 2003; SHVALEVA et al., 2005; MAZID; KHAN, MOHAMMAD, 2011; LEPIKSON-NETO et al., 2013). A biossíntese destes compostos está associada a outras moléculas, como açúcares ou proteínas, e apresentam uma ampla função fisiológica. A relação entre a formação dos compostos e a capacidade de resistência da planta às doenças, pragas e estresse é relatada por vários autores (DICKO et al., 2005; TORRAS-CLAVERIA et al., 2012). Grace e Logan (2000) e Torras-Claveria et al. (2012) afirmam que a via fenilpropanoide, responsável pela síntese de um conjunto de metabólitos fenólicos é, geralmente, induzida por algum tipo de estresse e desempenha funções específicas de proteção à planta como dissipação alternativa de energia fotoquímica, melhorando a capacidade antioxidante da célula das folhas. Entretanto, poucos estudos determinaram através dos extrativos da madeira a composição e efeitos de metabólitos secundários produzidos no lenho das árvores. Neste sentido, Fukushima et al. (2010) ressaltam que este estudo é essencial para determinar com precisão a função de metabólitos secundários e elucidar os mecanismos finos de coordenação dos diversos processos biológicos nas diferentes partes da árvore.

Em termos de determinação do teor de extrativos totais (em solventes orgânicos ou água) em *Eucalyptus*, diversos autores podem ser citados, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Diferentes autores e os valores de teor de extrativos totais (em solventes orgânicos ou água) encontrados no gênero *Eucalyptus*

Autores	Espécies	Teor de extrativos totais em %
Trugilho, Lima e Mori (2003)	<i>E. grandis</i>	6,71
Colodette et al. (2004)	10 sp. do gênero <i>Eucalyptus</i>	1,30 - 2,70
Barbosa, Maltha e Cruz (2005)	<i>E. grandis</i>	1,62
Silva et al. (2005)	<i>E. grandis</i>	4
Franco (2014)	<i>E. grandis</i>	2,07 - 2,87
Sette Junior et al (2014)	<i>E. grandis</i>	2,80 - 3,90
Zanuncio et al. (2014)	6 sp. do gênero <i>Eucalyptus</i>	1,41 - 6,94
Trugilho et al. (2015)	4 clones e 5 sp. de <i>Eucalyptus</i>	5,71 - 7,14
Costa et al. (2017)	<i>E. camaldulensis</i>	0,79 - 5,08
Ferreira et al. (2017)	<i>E. urograndis</i>	2,65 - 3,14

3.12 Princípios da espectroscopia no infravermelho

A espectrometria de absorção molecular na região infravermelho (IR: *Infrared*) é uma ferramenta de análise qualitativa e quantitativa de diversos tipos de amostras. Ela mede a absorção de radiação infravermelha por ligações químicas em um material (TAIZ; ZEIGER, 2009). Esta técnica permite a aquisição dos espectros de diversas formas, tais como refletância difusa, refletância total atenuada, transmitância direta, entre outros. Seu uso é simples, rápido, direto e exige um preparo mínimo das amostras em análise. A região do IR refere-se à zona do espectro eletromagnético compreendido entre a região do visível e as micro-ondas e é dividida em três, sendo o infravermelho distante (FIR: *Far Infrared*), o infravermelho médio (MIR: *Middle Infrared*) e o infravermelho próximo (NIR: *Near Infrared*) (Figura 1) (SCHRIEVE; MELISH; ULLMAN, 1991). A Tabela 2 mostra, em resumo, a região do infravermelho, respectivo comprimento de onda e característica medida, conforme definição internacional da ASTM.

Figura 1. Composição do espectro eletromagnético

Fonte: Taiz e Zeiger (2009)

Em linhas gerais, um espectro de absorção IR é simplesmente um registro do número e tipos de movimentos das vibrações de moléculas possíveis para uma amostra em estudo. Cada molécula possui um espectro de absorção único, como se fosse uma “impressão digital” (BARBOSA, 2007; SANTOS, 2007). Quando se conhece a localização das bandas de absorção de cada grupo funcional, é possível fazer a caracterização da amostra e, quando conhecida a intensidade das bandas, a determinação da concentração dos seus constituintes.

Tabela 2. 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, adaptado de Milagres (2009)

Skoog, Holler e Crouch (2006) explicam que a radiação na região do IR apresenta maior comprimento de onda e por isso menor energia e, conseqüentemente, quando absorvidas por um sistema de moléculas são convertidas em energias vibracionais e rotacionais.

A natureza dos átomos e de suas ligações é relacionada com o conceito físico de absorção de luz. Estas ligações não são estáticas, mas vibram constantemente o que provoca 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). Por isso, quando uma luz monocromática atinge uma amostra, ela poderá ser refletida, absorvida ou transmitida. Porém, a molécula poderá absorver radiação apenas quando as vibrações de suas ligações moleculares acontecerem na mesma frequência de onda da radiação (VAN KEMPEN; JACKSON, 1996; BARBOSA, 2007).

Desta forma, apenas quando ocorre uma variação no momento de dipolo da molécula em decorrência dos diferentes estiramentos e deformações é que acontece a absorbância de energia para passar para um nível superior permitindo uma interação entre o campo eletromagnético da radiação IR e o sistema molecular (Figura 2). Por isso, diz-se que sistemas moleculares diatômicos homonucleares como O₂, N₂, H₂, etc., não são capazes de absorver radiação IR, uma vez que suas vibrações não ocasionam variação do momento de

dipolo da molécula (WORKMAN JR.; WEYER, 2008). Por outro lado, é importante observar que as moléculas diatômicas heteronucleares, as moléculas poliatômicas com vibrações não simétricas e grupos funcionais ligados a polímeros, o que engloba a maioria dos compostos orgânicos e, muitos dos inorgânicos como a água, são facilmente detectadas já que apenas os modos vibracionais que alteram o momento dipolar da molécula são exibidos por meio de um espectro (BURNS; CIURCZAK, 2008).

Figura 2. Esquema das diversas formas de vibração em uma molécula triatômica heteronuclear
 Fonte: Silva (2013) adaptado de Skoog, Holler e Crouch (2006)

O NIR é uma técnica onde há medição da intensidade de absorção da luz IR próxima, a qual depende da vibração das ligações moleculares em cada comprimento de onda, na faixa de 800-2500nm (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011) (Figura 3). O estudo em NIR analisa os harmônicos das vibrações moleculares e, estas vibrações resultantes das transições harmônicas, são responsáveis pela absorção nesta região. No NIR, as ligações covalentes das substâncias orgânicas absorvem a energia das vibrações e, essa absorção, é usada para avaliação do tipo e número de ligações moleculares nas amostras estudadas (BARBOSA, 2007). Em geral, verifica-se que as ocorrências espectrais na região NIR acontecem em ligações de moléculas em que há participação do hidrogênio, tornando a técnica aplicável para a determinação de compostos orgânicos que contém ligações como C-H, N-H, O-H, C=O ou S-H (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011). Isso acontece já que átomos de hidrogênio vibram com maior amplitude devido à baixa massa atômica. Workman Jr e Weyer (2008) explicam que as bandas de absorção

obtidas no NIR são, portanto, provenientes 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.

Figura 3. Espectros NIR de amostras de madeira de Eucalyptus

A absorção de luz com comprimento de onda específico e conhecido da região do NIR é medida pela diferença entre a quantidade de luz emitida pelo equipamento em NIR e a quantidade de luz refletida pela amostra. Por isso, como a amostra em análise apresenta constituições químicas e comprimento de onda específico (Tabela 3), cada material apresentará diferente absorção da luz e consequentemente diferente resposta (SIESLER et al., 2002).

Tabela 3. 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 sobreton do estiramento C-H
1400-1500	primeiro sobreton 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)

Deste modo, a técnica NIR sempre vai depender dos métodos laboratoriais de análise, uma vez que estes servem de referência para construção do modelo de calibração (PASQUINI, 2003). A calibração consiste, portanto, na etapa de correlacionar o espectro NIR com a propriedade investigada na amostra. Normalmente, utiliza-se a calibração multivariada quando o número de amostras e variáveis são elevadas e, uma matriz de dados é gerada para as variáveis dependentes e independentes para calcular sua correlação. Na etapa seguinte, efetua-se a validação, qual visa avaliar a eficiência do modelo, testando-o em um grupo de amostras independentes daquele utilizado na calibração (WORKMAN JR.; WEYER, 2008).

Tratando-se da análise NIR em madeiras, Tsuchikawa (2007), Tsuchikawa e Schwanninger (2013) e Tsuchikawa e Kobori (2015) são referências no assunto e descrevem com rigor a relação entre a absorbância e as propriedades químicas de diversas espécies de madeiras.

3.12.1 Aquisição de uma imagem hiperespectral e métodos de análise dos dados

As técnicas de imagens hiperespectrais na região do NIR (HI-NIR: *Near Infrared – Hyperspectral Images*) nos anos 1970 eram aplicadas a análises de sensoriamento remoto e, apenas a partir dos anos 1990 essas técnicas começaram a ser usadas na área de alimentos (BELLON-MAUREL; DUBOIS, 2009; AMIGO; BABAMORADI; ELCOROARISTIZABAL, 2015).

Atualmente, uma grande variedade de trabalhos é apresentada na literatura com aplicações das técnicas de HI-NIR para a avaliação, principalmente, de produtos farmacêuticos (AMIGO; RAVN, 2009; CRUZ et al., 2009; AMIGO, 2010; CRUZ; BLANCO, 2011; FRANCH-LAGE et al., 2011; BOLDRINI et al., 2012; PRATS-MONTALBÁN et al., 2012) e produtos alimentícios (GOWEN et al., 2008; BELLON-MAUREL; DUBOIS, 2009; TAGHIZADEH et al., 2010; AMIGO; MARTÍ; GOWEN, 2013; HUANG; LIU; NGADI, 2014; PU et al., 2017; BACA-BOCANEGRA et al., 2018).

Imagens hiperespectrais são medidas que incluem informações não apenas de alta qualidade, mas também em grande quantidade. Como a saída espectral de uma imagem fornece um conjunto maciço de dados, existe uma clara necessidade de identificar as ferramentas que são capazes de lidar com essas medidas e extrair qualquer conhecimento interpretável. Antes de iniciar a análise de uma imagem (assim como em uma análise NIR), normalmente duas perguntas principais devem ser feitas: (i) quais são as propriedades químicas e matemáticas da medição?; (ii) qual é o objetivo da análise? (WILLIAMS; DARDENNE; FLINN, 2017).

A resposta à primeira pergunta delimitará os potenciais métodos utilizados e também ajudará na concepção de novos algoritmos que possam levar em consideração as especificidades ligadas à natureza da imagem. Definir o objetivo da análise irá destacar o algoritmo específico a ser usado, levando em consideração a informação de entrada disponível e o resultado desejado (DE JUAN et al., 2009).

O uso de ferramentas quimiométricas na análise de imagens é crucial para aproveitamento das medições espectrais por completo; situação à qual se opõe à abordagem clássica, onde apenas são tomadas informações de toda a imagem para fornecer representações visíveis parciais dos espectros.

A análise de imagens é um campo que está em contínuo desenvolvimento em quimiometria e onde, embora algum conhecimento sólido já tenha sido construído, novas possibilidades de trabalho continuam a surgir. Nos últimos anos, muito esforço foi dedicado a explorar a informação espectral e espacial contida em uma imagem (conhecida sob a denominação geral de análise de imagem multivariada, MIA) e a atribuir os pixels de uma imagem a diferentes grupos, de acordo com a semelhança de suas características espectrais, ou seja, segmentação de imagem (DE JUAN et al., 2009).

Embora exista uma série de excelentes revisões e tutoriais e, as melhorias nas metodologias existentes continuam a aparecer, os tópicos menos explorados incluem o uso de métodos de regressão ou calibração para relacionar a informação da imagem com as propriedades em estudo, como as concentrações químicas (GELADI; GRAHN, 1996; TRAN; WEHRENS; BUYDENS, 2005; GRAHN; GELADI, 2007; KROOSHOF et al., 2009). Tal como na espectroscopia clássica, o estudo de conteúdos químicos é particularmente relevante nas imagens de NIR de alimentos e produtos farmacêuticos. Os métodos de resolução multivariada estão entre as ferramentas mais recentes incorporadas no campo da análise de imagens, e estas se mostraram mais facilmente adaptadas à natureza dessas medições. Na verdade, os métodos de resolução podem fornecer os espectros puros e os mapas de distribuição dos constituintes da imagem a partir de medições de imagem bruta (DE JUAN et al., 2009).

Imagens hiperespectrais representam um tipo de medida particular por conter informações espaciais e espectrais (e, portanto, químicas) da amostra em análise. A amostra é fisicamente preservada e compartimentada em pequenas superfícies ou áreas volumétricas, denominadas pixels ou voxels, respectivamente. Por isso, o menor elemento que compõe uma imagem digital é o pixel para imagens em duas dimensões ou o voxel para imagens tridimensionais. Porções pequenas da imagem estão determinadas ou por coordenadas espaciais – x e y, para os pixels ou x, y e z, para os voxels (PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011).

Cada um dos pixels da imagem da amostra é representado por um espectro. Informações sobre a composição química pode ser extraído por meio de calibração dos dados e de um exame dos espectros e da interpretação de suas bandas ou, ainda, pelo confronto com uma biblioteca de espectros. As informações sobre a distribuição dos constituintes são, conseqüentemente, obtidas pela variação espectral pixel a pixel (PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011).

É importante, portanto, levar em consideração a informação espectral e espacial contida em uma imagem, pois essa dualidade configura a singularidade desse tipo de medição em oposição a outras medidas espectroscópicas de amostras. Além disso, as ferramentas de análise de dados também devem ter em conta este carácter espacial/espectral para se extrair o máximo de informação dos dados brutos.

As imagens digitais são construídas pelas coordenadas espaciais e valores numéricos para cada pixel que representam a escala de cores usada. Quando a imagem está na escala de cinza, tem-se uma matriz de dados bidimensional, onde cada pixel está associado a um valor de intensidade na escala de cinza (Figura 4). Em imagens RGB (RGB: *Red, Green, Blue*) formadas a partir dos três canais de cores ditas vermelho, verde e azul tem-se uma matriz de dados tridimensional, formada a partir de três matrizes de dados conectadas, em que cada pixel terá três valores de intensidade, um para cada canal de cor em questão (PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011; SILVA, 2013).

A imagem HI-NIR tem um espectro de alta resolução e as imagens multiespectrais tem alguns comprimentos de onda associados a cada pixel da imagem (DE JUAN, 2009).

Figura 4. Esquema de uma matriz de dados de imagens HI-NIR

Fonte: Silva, 2013

A análise de imagens consiste em transformar a imagem em uma matriz de dados para que a mesma possa ser manipulada matematicamente. Para isso, realiza-se um desdobramento da matriz 3D (para imagens em RGB, multiespectrais e hiperespectrais) em uma matriz bidimensional. A Figura 5 mostra, esquematicamente, como acontece esse desdobramento. A partir deste momento, cada pixel será considerado uma amostra e os

valores de intensidade serão organizados em colunas, respeitando a ordem sugerida, como na Figura 5 por exemplo (PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011; SILVA, 2013).

Figura 5. Desdobramento das matrizes 3D de imagens HI-NIR
Fonte: Silva, 2013

Como mencionado anteriormente, as imagens HI-NIR apresentam vantagem com relação a obtenção dos espectros clássicos de uma determinada amostra, uma vez que as variações espectrais de pixel a pixel fornecem informações a respeito da distribuição espacial dos componentes na superfície da amostra em análise. Contudo, como nos conjuntos de dados espectroscópicos clássicos, os espectros da HI-NIR também obedecem à linearidade da lei de *Beer-Lambert*, e são representados pela Equação 1:

$$X = CS^t + E \quad (1)$$

Onde: X é a matriz de dados, C é a matriz de intensidade relativa de cada componente presente na amostra, S é a matriz que contém os espectros dos constituintes puros e E é a matriz de erros (associada àquelas informações que o modelo não consegue modelar).

Na etapa de reconstituição da imagem, é possível observar o mapa de distribuição dos compostos com as suas respectivas concentrações (PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011; SILVA, 2013).

Os instrumentos HI-NIR são, em geral, mais versáteis e robustos que os instrumentos que medem MIR ou espectro Raman. Entretanto, ao menos duas desvantagens são conhecidas (GRIFFITHS, 2009). A primeira desvantagem é que as absorções do *overtone* e combinações de bandas no espectro NIR são muito mais fracas do que os *overtone* correspondentes fundamentais os quais eles derivaram. Para medidas no modo de transmissão, a espessura ideal da amostra é aquela que produz um espectro de baixo ruído com bandas suficientemente fortes para permitir uma quantificação rápida. Para o NIR “convencional”, no comprimento de onda entre 1200 e 2450 nm, as absorções das

bandas mais fortes estão em uma ordem de magnitude menor que as mais fortes ligações moleculares as quais eles são derivados, o que resultou no fato de que as amostras devem ter pelo menos 100 μm de espessura – ou seja, neste caso tem-se problemas com a resolução espacial final da amostra (GRIFFITHS, 2009). Ainda, para os espectros NIR de curto comprimento de onda (950 - 1720 nm), onde as bandas de absorção são causadas por transições para o terceiro ou quarto estados vibratórios dos modos de alongamento C-H, N-H e O-H (junto com bandas de combinação fracas), a situação é ainda pior porque as bandas são tão fracas que a espessura da amostra deve ser aumentada para cerca de 500 μm , embora o limite de difração seja inferior a 2 μm . É pelo menos em parte por esta razão que o HI-NIR raramente é usado para medições com resolução espacial muito alta (GRIFFITHS, 2009; VIDAL; AMIGO, 2012).

A segunda desvantagem do HI-NIR é mais sutil, porém não menos importante, pois é evidente apenas para medidas de partículas em pó. A aplicação mais comum do HI-NIR é a caracterização de produtos farmacêuticos por espectrometria em reflectância difusa. Essas medidas têm uma limitação significativa em termos de sua resolução espacial causada pelo efeito da dispersão da luz. As medidas de deslocamento do fóton mostraram que em medições difusas de transmissão e reflexão, os fótons emergem de amostras em pó compactadas (por exemplo, comprimidos farmacêuticos) em um tempo que é muito maior do que seria esperado se não houvesse espalhamento (GRIFFITHS, 2009).

Ao considerar a diversidade de metodologias existentes (e em andamento) para análise de imagens, seria muito ambicioso tentar explicar tudo de uma só vez em uma revisão bibliográfica. Em vez disso, este trabalho concentra uma descrição geral das principais técnicas de análise de imagens HI-NIR, sendo a maioria delas iguais às análises de dados adquiridos em equipamento NIR.

Para a análise de imagens HI-NIR é necessário realizar pré-processamentos nos espectros. As clássicas técnicas de pré-tratamentos espectrais podem ser aplicadas, contudo um problema recorrente é o tamanho do conjunto de dados das imagens obtidas. Para uma redução do conjunto sem perda de informação relevante, utiliza-se ferramentas de redução da dimensionalidade da matriz de dados como Análise de Componentes Principais (PCA), seleção de características baseada em *wavelets*, entre outros (DE JUAN et al., 2009). Além disso, a PCA pode resolver o problema da alta correlação entre as intensidades de pixels vizinhos. Este é o método mais bem estabelecido para aplicação em conjuntos espectrais clássicos e apresenta grande efeito na análise de imagens (PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011; SILVA, 2013; FERREIRA, 2015).

Devido às sobreposições que os átomos podem sofrer, a interpretação da composição química da amostra torna-se muito mais complexa. Portanto, a técnica exige a necessidade de utilizar métodos estatísticos, incluídos na quimiometria, de modo a tratar os

espectros de uma forma multivariada (envolvendo várias regiões espectrais). Para o tratamento de imagens HI-NIR em RGB (ou em outros canais de cores), utiliza-se as técnicas de Análise Multivariada de Imagens (ESBENSEN; GELADI, 1989) a qual permite, entre outros, a classificação, segmentação e predição de dados obtidos da imagem (GELADI, 1989; SILVA, 2013).

Na PCA, apesar das novas componentes não conter respostas químicas, as imagens geradas são necessárias para tornar visual a distribuição de diferentes componentes na amostra. Com isso, para cada componente principal é possível reconstruir uma imagem de *scores*, possibilitando o controle da homogeneidade das amostras. As novas imagens irão conter as informações mais relevantes da amostra e a dimensionalidade do conjunto de dados será significativamente menor, uma vez que apenas algumas poucas componentes trazem informações pertinentes relacionadas com a característica química da amostra (DE JUAN et al., 2009). É na análise da PCA que é possível ter um gráfico de dispersão com a matriz desdobrada de uma imagem de *scores* de uma componente *versus* outra, fornecendo informações sobre *outliers* e diferentes classes no conjunto de dados em análise (GELADI et al., 1989; FERREIRA, 2015).

Na análise de imagens é empregada, também, a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS: *Partial Least Squares*) para calibrações. Portanto, uma vez que a PCA busca as variáveis que explicam a variabilidade dos dados, a técnica PLS constrói um modelo de projeção usando variáveis latentes (LV: *Latent Variables*), as quais podem ser interpretadas geometricamente como uma leve rotação das PCs de forma a aumentar a correlação entre os dois conjuntos de dados (BRUNS; FAIGLE, 1985; WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001). Desta forma, na análise PLS obtém-se as variáveis que apresentam a maior correlação entre a matriz X (matriz dos dados de medições) e Y (matriz das propriedades que se deseja avaliar) (DE JUAN et al., 2009; PRATS-MONTALBÁN; DE JUAN; FERRER, 2011; SILVA, 2013). A regressão PLS é um método de processamento de dados desenvolvido por Svante Wold e Herman Wold em 1983 (WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001). O método pode ser usado para analisar dados contendo muitas variáveis, com ruído, colineais e até incompletas em X e y (WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001).

Uma vez realizada a conclusão da seleção do conjunto de dados a ser trabalhado, é necessário fazer a calibração, a qual tem como objetivo selecionar os dados para gerar o modelo que mais representa a relação entre os dados obtidos pela técnica HI-NIR e os dados obtidos em laboratório (PASQUINI, 2003). Após a calibração do modelo para uma determinada propriedade em análise, a acurácia de calibração deve ser testada através da validação. A validação avalia a eficiência do modelo matemático aplicado para um dado conjunto de dados. Para isso, existe a validação independente (ou externa) e a validação cruzada (WORKMAN JR.; WEYER, 2008). A validação independente acontece quando um

segundo lote de amostras é analisado, ou seja, quando se tem dois conjuntos diferentes de amostras. Entretanto, para validar um modelo a partir de um lote externo, as amostras precisam ter características iguais às usadas na calibração. Aconselha-se utilizar esse tipo de validação quando se tem maiores quantidades de amostras (WORKMAN JR.; WEYER, 2008).

A validação cruzada é a avaliação da grandeza dos erros de previsão por meio da comparação dos valores das variáveis dependentes das amostras do conjunto de dados de calibração com as respectivas previsões, quando estas não fazem parte da construção do modelo de regressão. Neste caso, 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 e, portanto, este processo é repetido até que todas as amostras do conjunto de calibração passem pelo conjunto de predição (GELADI; KOWALSKI, 1986; WORKMAN JR.; WEYER, 2008) (Figura 6). Para selecionar o número ótimo de variáveis latentes, utiliza-se a validação cruzada para cada modelo PLS desenvolvido.

Para medir o ajuste da validação aos dados analisados, tem-se o cálculo do coeficiente de determinação (R^2) e da raiz quadrada do Erro Médio Quadrático de Previsão (RMSECV). O R^2 mostra qual a relação entre os valores obtidos em laboratório e os valores preditos nos modelos gerados com as mesmas amostras. O RMSECV é o erro da predição gerado na validação cruzada, retirando-se uma amostra de cada vez (ou um grupo de amostras). Na validação independente o erro da predição gerada é dado pelo RMSEP (RMSEP: *Root Mean Square Error of Prediction*) (SIESLER et al., 2002).

Figura 6. Organograma de etapas para validação do modelo

Antes de serem submetidos às técnicas de modelagem quimiométricas, os espectros IR precisam passar por correções chamadas de pré-processamento. É importante salientar que, uma vez aplicadas as técnicas de pré-processamento, os resultados do conjunto de dados podem mudar significativamente, tanto para melhor como para pior e é o conhecimento e a escolha apropriada da técnica que vai fornecer o melhor resultado final. As técnicas de pré-processamento podem atuar nas amostras (normalização, suavização, MSC, derivadas, SNV, etc.) ou nas variáveis (por exemplo centrar na média, autoescalonamento, etc.) (BURGER; GOWEN, 2011; FERREIRA, 2015). Cada pré-processamento vai apresentar um objetivo diferente, e a escolha da técnica deve estar de acordo com o tipo de correção que se deseja fazer nos dados, com o objetivo da análise e, por vezes, com o resultado da modelagem. Assim, técnicas usuais de processamento de dados como normalização, suavização, derivadas, correções de linha de base devem ser empregadas na análise da imagem para aumentar significativamente a qualidade do modelo final (DE JUAN et al., 2009).

Como exemplo de pré-tratamento, cita-se o *Standard Normal Variate* (SNV), a primeira e a segunda derivada de *Savitsky-Golay*. O efeito dos pré-tratamentos é, em geral, suavizar bandas sobrepostas e melhorar os sinais espectrais (SIESLER et al., 2002; PASQUINI, 2003).

As variações mais comuns em um conjunto de dados estão relacionadas ao espalhamento da luz para dados de reflectância. Para a correção de um problema como este, técnicas de correção como o SNV e Correção Multiplicativa de Espalhamento (MSC: *Multiplicative Scattering Correction*) são bastante utilizadas. As duas são similares e fornecem resultados muito parecidos, uma vez que o formato das equações que descrevem cada uma é semelhante (FEARN et al., 2009).

A Figura 7 mostra de forma resumida as principais etapas de análise de uma imagem HI-NIR.

Figura 7. Principais etapas de análise de imagens HI-NIR
Fonte: Adaptado de Roger (2017) (arquivo pessoal)

3.12.2 Transferência de calibração

Conforme descrito anteriormente, muitas são as técnicas de análise de imagens HI-NIR. Devido a diversidade de aplicações desse tipo de imagem, a cada estudo uma proposta (ou forma de trabalhar) surge. É importante deixar claro que não existe uma forma fixa de trabalhar; a cada conjunto de amostras a problemática se renova e as técnicas são aprimoradas. Esta questão fica mais relevante quando se estudam amostras orgânicas as quais não se conhece com precisão sua constituição. Normalmente, pesquisadores que trabalham com amostras orgânicas criam um banco de dados (ou também chamado de coleção) espectrais dessas amostras e suas respectivas características químicas obtidas em laboratório para posteriores consultas ou comparações com outras amostras.

Um banco de dados de calibração consiste na criação de um acervo digital de espectros (NIR, por exemplo) extraído de amostras em análise e associadas às variáveis físico-químicas de interesse medidas em laboratório. Essas variáveis são medidas usando amostras coletadas no mesmo equipamento onde os espectros foram extraídos. Considerando trabalhos onde os espectros NIR e os dados de laboratórios das amostras em análise já existiam, o uso da imagem HI-NIR poderia ser acrescentado na análise, uma vez que a possibilidade de fazer o mapeamento químico da amostra pode ser interessante.

Este banco de dados de calibração, no entanto, implica a coleta de muitas amostras para cada nova aquisição dos espectros HI-NIR. Além disso, a coleta de dados de campo, a preparação e as análises físico-químicas em laboratório são demoradas, exigem um alto rigor no preparo e condução, além de serem economicamente caras.

O uso de um banco de dados (ou coleção) de espectros e de dados laboratoriais certamente salvaria tempo e recursos aplicados. Entretanto, estes mesmos espectros devem ser aplicáveis entre diferentes equipamentos, ou seja, de um espectrômetro (NIR) para uma câmera hiperespectral (imagens HI-NIR).

Modelos de transferência consiste em transferir um modelo de calibração de uma dada condição para outra. Historicamente, é usado para transferência de uma modelo PLS a partir de um instrumento chamada “*master*” para outro “*slave*”. Neste caso, o termo “*master*” corresponde ao NIR e o “*slave*” ao HI-NIR.

Nouri et al. (2017) relatam sobre essa questão de transferência de calibração entre dois equipamentos diferentes; os autores apontam que apenas Schwanghart and Jarmer (2011) e Jarmer (2013) usaram modelos PLS construídos a partir de espectros de laboratório e espectros de campo, para prever diretamente propriedades biofísicas (propriedades de carbono orgânico no solo e plantações de cevada, respectivamente) em uma imagem HI-NIR em câmera acoplada em avião para sobrevoo. Os resultados de predição destes trabalhos foram caracterizados com boa correlação ($R^2_{\text{teste}} > 0,75$), porém

com forte viés e *slopes*. Este forte viés indica que há fatores de influência nos espectros adquiridos que refletem nos resultados e limitam a aplicabilidade desta abordagem direta de predição.

Muitos fatores podem influenciar a medição de espectros e a consequente transferência de calibração, podendo ser citadas (i) as propriedades dos instrumentos (resolução espectral, fonte de luz, temperatura, etc), (ii) condições experimentais (exposição à luz, temperatura do ambiente, etc) e (iii) características das amostras em estudo (tamanho, umidade, rugosidade, tamanho das partículas, etc). Todos esses fatores juntos afetam negativamente a robustez do modelo de calibração. Portanto, as diferenças entre dados de imagem e laboratório devem ser levadas em consideração. Usar métodos de transferência de calibração pode reduzir esses impactos (FEARN, 2001).

Vários estudos foram conduzidos para testar a viabilidade de uma transferência de calibração entre dois instrumentos (BERGMAN et al., 2006; IGNE et al., 2009). No entanto, em apenas alguns estudos têm verificado uma transferência de calibração bem-sucedida entre dois bancos de dados de calibração adquiridos em diferentes momentos e áreas (ROGER; CHAUCHARD; WILLIAMS, 2008; GUERRERO et al., 2010; WETTERLIND; STENBERG, 2010; GOGÉ et al., 2014).

Dentre os métodos de transferência de calibração desenvolvidos, pode-se citar “*Slope/bias Correction*” (FEARN, 2001), modelo “*Update*” (FEUDALE et al., 2002) ou “*Spiking*” (GUERRERO et al., 2010), modelo “*Repfile*” (SHENK; WESTERHAUS, 1991), métodos de Ortogonalização (ROGER; CHAUCHARD; BELLON-MAUREL, 2003; ANDREW; FEARN, 2004) e o modelo “*Piecewise Direct Standardization – PDS*” (BOUVERESSE; MASSART, 1996).

3.12.3 Uso do HI-NIR para determinação da qualidade do lenho

A descoberta de que a técnica de espectroscopia poderia ser usada em análise de propriedades de madeiras foi apresentada pela primeira vez na Conferência Internacional de Espectroscopia de Transformação de Fourier em 1993 (NYSTRÖM; HAGMAN, 1999). Muitos autores relatam que as madeiras de coníferas e folhosas podem ser caracterizadas no laboratório por equipamento NIR, onde os espectros revelam as características anatômicas, propriedade físicas, químicas ou até mesmo mecânicas (BIRKETT; GAMBINO, 1988; EASTY et al., 1990; SCHULTZ; BURS, 1990; HOFFMEYER; PEDERSEN, 1995; SCHIMLECK; MITCHELL, 1998; MEDER et al., 1999; RIALS; KELLEY; SO, 2002; TSUCHIKAWA, 2007; HEIN, 2008; HEIN; LIMA; CHAIX, 2009b; ANDRADE et al., 2010; CHAIX et al., 2010; HEIN; LIMA; CHAIX, 2010; SEGLA et al., 2017).

Em contrapartida, diversos fatores devem ser considerados quando se trata do desenvolvimento de métodos de estudo da imagem HI-NIR. Burguer e Geladi (2006) e Bellon-Maurel e Dubois (2009) consideram que, se o objetivo da aplicação do método é “compreensão das mudanças bioquímicas e fisiológicas”, então o método pode ser aplicado em madeiras, ou seja, um material heterogêneo. Os autores explicam que ao lidar com produtos homogêneos, os dispositivos de espectroscopia NIR são suficientes para fornecer uma boa estimativa do conteúdo químico. No entanto, com produtos heterogêneos a imagem HI-NIR é necessária para evitar a média entre regiões de diferentes concentrações, como no caso de madeiras onde a constituição química varia gradualmente nas posições radial e longitudinal das árvores e também por permitir isolar e analisar regiões específicas (em discos de madeira, por exemplo) com concentrações químicas diferenciadas.

Bellon-Maurel e Dubois (2009), em revisão sobre usos e aplicações de imagem HI-NIR em produtos alimentícios e na agricultura, explicam que em estudos com madeira a aquisição da imagem HI-NIR é importante para indústria de madeira serrada para localização de lenho de compressão. O primeiro método desenvolvido para detectar madeira de compressão remonta a 1941 usando imagens hiper e multiespectrais em IR (PILLOW, 1941; NYSTRÖM; HAGMAN, 1999; NOORDAM et al., 2005). Estes estudos sugerem que a técnica pode ser adequada para estimar propriedades da madeira em discos ou toras.

Assim, o mapeamento de madeira de compressão em madeira serrada é de interesse para fins de classificação e pesquisa, e para entender melhor os fatores que colaboram com a formação da madeira de compressão (HAGMAN, 1997; NYSTRÖM; HAGMAN, 1999; JONES et al., 2007; DUNCKER; SPIECKER, 2009; HIRVONEN et al., 2014; DEFOIRDT et al., 2017). A composição química da madeira de compressão difere daquela da madeira normal, uma vez que o teor de lignina é maior (BELLON-MAUREL; DUBOIS, 2009). A maioria dos trabalhos apresentam resultados satisfatórios ($R^2=0,92$) na validação independente para uso da técnica na detecção de madeira de compressão em coníferas como *Pinus radiata* e *Pinus taeda* (MORA; SCHIMLECK, 2010; MEDER; MEGLLEN, 2012).

Conhecendo o princípio da técnica, Mora e Schimleck (2010) e Mora et al. (2011) destacam a possibilidade de uso da imagem HI-NIR para estimar a densidade básica e a umidade da madeira em tempo real, permitindo a aquisição das informações espaciais e espectrais. O uso da imagem HI-NIR está expandindo rapidamente, porém ainda assim há poucos estudos com o emprego da técnica em madeiras ou produtos madeireiros (MORA et al., 2011; BOLDRINI et al., 2012; HADDADI et al., 2016).

Ma, Inagaki e Tsuchikawa (2017) descrevem que a densidade e o ângulo microfibrilar da madeira de *Cryptomeria japonica* foram mapeados com sucesso em uma resolução

espacial de 156 μm com câmera HI-NIR, facilitando a detecção de anel de crescimento anual e a avaliação da qualidade da madeira.

Thumm et al. (2010), Lestander et al. (2012), Lundqvist, Grahn e Wallbäcks (2014) (Figura 8) e Thumm et al. (2016) descrevem o uso da técnica para determinação da lignina em *Pinus radiata* e *Pinus sylvestris*. Fernandes et al. (2013) utilizaram a técnica para determinação da densidade aparente dentro de anéis de crescimento e Haddadi et al. (2015) citam o uso da técnica para estimar o teor de umidade em painéis de *Abies lasiocarpa*. Kobori et al. (2017) sugerem o uso da imagem HI-NIR na indústria de reciclagem para separação de resíduos de madeira. Já Agresti et al. (2013) propuseram a investigação da fotodegradação de madeiras de álamo por meio da aquisição da imagem HI-NIR.

Figura 8. Imagem HI-NIR de uma amostra de *Pinus sylvestris* para análise detalhada das variações químicas do lenho entre os anéis de crescimento, sendo (A) as três primeiras componentes principais (PCA); (B) concentração de lignina estimada com modelo preliminar

Fonte: Adaptado de Lundqvist, Grahn e Wallbäcks (2014)

Alguns autores pesquisaram esse assunto no âmbito da aplicação de estudo de distribuição de extrativos da madeira por meio da aquisição da imagem hiperespectral. So et al. (2004), Tsuchikawa e Kobori (2015) e Colares et al. (2016) relatam que a imagem HI-NIR é uma poderosa extensão das medidas NIR convencionais, proporcionando a distribuição espacial dos componentes químicos na área escaneada. As aplicações NIR na análise da madeira estão diretamente relacionadas à capacidade de fornecer informações químicas sobre os principais constituintes da amostra, destacando a celulose, a lignina e os extrativos. Devido à complexidade da madeira, as bandas de combinação são sobrepostas e difíceis de serem atribuídas. No entanto, a combinação de NIR e quimiometria pode permitir a extração da informação química presente nos dados. Em melhoramento genético de plantas, os resultados obtidos pela imagem HI-NIR podem propor melhorias genéticas da composição química das madeiras para refinar suas características visando uma aplicação específica. Portanto, a técnica pode ser considerada promissora para fornecer a composição

química em nível microscópico. Neste sentido, Colares et al. (2016) mostram a distribuição dos extrativos em amostras de madeira de mogno (*Swietenia macrophylla*), de acordo com os seus planos de orientação da madeira; as maiores concentrações de extrativos foram observadas nas linhas vasculares, enquanto que as menores concentrações foram observadas nos raios, variando de 1 a 12% nesse plano.

Bonifazi et al. (2015) utilizaram a imagem HI-NIR como um método não-invasivo para estudo da fotodegradação de madeiras de *Fagus*. As características químicas detectadas pela análise da imagem HI-NIR mostram que as mudanças na coloração das amostras de madeira estavam relacionadas com a mudança do teor de extrativos e sugerem que o método pode servir como teste de controle padrão para monitorar o estado de preservação de superfícies em madeira.

Lestander et al. (2012) propõem o uso da câmera hiperespectral em indústrias de papel e celulose. Os autores explicam que altos teores de extrativos na madeira ocasionam problemas para impregnação dos químicos na polpa celulósica. Ainda, nós na madeira tem um alto valor de densidade e de extrativos (aproximadamente 45% do peso seco) e sua presença nos cavacos prejudica consideravelmente a qualidade e o rendimento da polpa celulósica obtida. Em coníferas, os nós são formados com o lenho de compressão e, geralmente, constituem de 0,5 a 2% do volume do tronco. Desta forma, o trabalho mostra que a análise da imagem HI-NIR por meio de modelo PLS permite separar e retirar da linha de produção os cavacos com altos teores de extrativos.

Baca-Bocanegra et al. (2018), em trabalho inovador, propõem a avaliação de polifenóis extraíveis liberados pelo vinho pela imagem HI-NIR. A análise da imagem auxilia na triagem do conteúdo extraível, o qual é utilizado como subproduto. As calibrações funcionaram bem para regressão MPLS ("*Modified Partial Least Squares*") tornando capaz de prever o conteúdo polifenólico extraível de uma amostra com base em características espectrais. A imagem HI-NIR surge como uma estratégia atrativa para aumentar o valor do subproduto da tanoaria através da determinação rápida de moléculas bioativas extraíveis, como os polifenóis. Entretanto, os autores ressaltam que um estudo abrangente deve ser feito para avaliar outros fatores no desenvolvimento completo de modelos robustos para compostos químicos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, por meio do convênio entre o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e o Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento, CIRAD/França. A Estação Experimental está localizada a 23° 02' S e a 48° 38' O, com 857 m de altitude (Figura 9). O clima da região, segundo Köppen, é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), com precipitação média mensal dos meses mais secos (julho e agosto) entre 30 e 60 mm e média anual de 1360 mm. A temperatura média anual é de 19° C, com temperatura média mensal de 15° C entre julho e setembro e de 25° C entre outubro e março. A área experimental possui um relevo suavemente ondulado, sendo o solo do tipo Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média (200 g kg⁻¹ de argila), cuja litologia é composta por arenito, formação Marília, pertencendo ao Grupo Bauru (EMBRAPA, 1999).

Figura 9. Local de estudo na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP, do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP

4.2 Plantio e tratos culturais

O corte do último povoamento de *E. grandis* na área e, na sequência, o plantio deste experimento aconteceram três meses antes da implantação do mecanismo para redução das chuvas, procedimento que foi realizado em junho de 2010. Para garantir a indução severa em K, cerca de 50% dos resíduos que poderiam conter quantidades significativas de K foram retirados da área do experimento. 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 4. Os resultados mostraram que o teor médio de K e Na trocável no solo é de 0,02 cmol_c kg⁻¹ até cinco centímetros de profundidade e, inferior a 0,01 cmol_c kg⁻¹ entre cinco e 600 centímetros de profundidade, demonstrando deficiências severas dos nutrientes em todo o perfil do solo.

Tabela 4. Atributos químicos do solo da área experimental

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

Fonte: Maquère (2008)

O plantio do clone de *E. grandis* proveniente da Empresa Suzano Celulose e Papel foi feito no espaçamento 3 x 2 m, com covas feitas entre a linha de tocos.

As parcelas são compostas por 12 linhas com 12 plantas por linha (144 plantas). Três linhas externas compõe a bordadura dentro de cada parcela, resultando em uma unidade experimental de 36 plantas centrais. A fertilização básica realizada no plantio foi constituída por 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Super Fosfato Simples), 80 kg ha⁻¹ de N(NH₄(SO₄)₂) e 20 kg ha⁻¹ de FTE BR-12 (12 micronutrientes), distribuídos em covetas ao lado das mudas. Além disso, foi distribuído a lanço e sem incorporação 2000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico. A aplicação de P, micronutrientes e a calagem foram realizadas durante o plantio e a fertilização com N, potássica e sódica (4,5 kmol/ha na forma de KCl e NaCl, respectivamente), assim como a instalação das calhas para reduzir a chuva, foram

realizadas três meses após o plantio. Dessa maneira, as mudas já haviam crescido acima das calhas, o que não afetou o crescimento dos galhos laterais.

4.3 Delineamento experimental

O experimento apresenta seis tratamentos em três blocos, totalizando 18 parcelas em *split-plot*. Os tratamentos a serem estudados são (i) dois regimes hídricos (como fator principal): 100% das chuvas (+A) e 63% das chuvas sob dossel (-A, exclui 37% de chuva), com exclusão parcial e artificial por 1700 m² de lonas em polietileno (ii) duas doses de K: 0 kmol ha⁻¹ de K (controle) e 4,5 kmol ha⁻¹ de K, não limitante para o crescimento do eucalipto nessa área, conforme descrito por Almeida et al. (2010) e (iii) duas doses de Na: 0 kmol ha⁻¹ de Na (controle) e 4,5 kmol ha⁻¹ de Na, não limitante para o crescimento do eucalipto nessa área, conforme descrito por Almeida et al. (2010). Desta forma, para cada bloco foram sorteados os dois tratamentos de regime hídrico e, na sequência, os três tratamentos de fertilização, conforme esquematizado na Figura 10.

Figura 10. Croqui do delineamento experimental (split-plot) ilustrando os três blocos, com as 18 subparcelas contendo os seis tratamentos de fertilização e regimes hídricos

A exclusão parcial da chuva é feita por meio de uma calha de 37 cm de largura composta de polietileno transparente, a qual cobre 37% da superfície do solo (Figura 11B). As faixas de polietileno foram instaladas sobre estacas de 1,5 m a 0,30 m de altura, a fim de assegurar um declive suficiente para excluir a água da chuva e para reduzir o efeito das calhas sobre a superfície do solo. As folhas senescentes que caem sobre as calhas foram, semanalmente, reposicionadas nas respectivas parcelas. Além disso, as parcelas com redução parcial de chuva são dotadas lateralmente de trincheiras de 50 cm de profundidade para impedir o crescimento radicular lateral.

Figura 11. (A) vista geral do experimento, com destaque para o mecanismo de redução das chuvas (B)

A originalidade e ineditismo deste experimento em Itatinga/SP consistem na possibilidade de estudar as interações entre a disponibilidade de água e a fertilização com K e Na sobre os processos fisiológicos e a qualidade do lenho durante a rotação, em escala de ecossistema. Não existem outros dispositivos experimentais equivalentes no mundo, manipulando conjuntamente as disponibilidades em água e nutrientes em plantações florestais tropicais em razão do custo e da dificuldade de implantação.

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

Com base nos inventários florestais realizados a cada seis meses na área experimental, foram selecionadas três árvores por tratamento de fertilização e regime hídrico (seis tratamentos totais), por bloco (três blocos totais) e por distribuição de área basal (uma árvore/classe, em um total de nove classes), totalizando 54 árvores (com 60 meses, cinco anos) amostradas aleatoriamente. Foi feita a determinação da biomassa do tronco, galhos e folhas das árvores amostradas, bem como a cubagem rigorosa pelo método de *Smalian* para modelar as relações alométricas. Na sequência, as árvores foram cortadas, desramadas e seccionados cinco discos do lenho (5 cm de espessura) por posição de amostragem (seis posições ao longo do tronco: base, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura total) e transportados para o Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras do

Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. Dos discos do lenho foram confeccionados os corpos de prova para a determinação das características anatômicas, físicas e químicas do lenho.

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

4.5.1 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 12A). As seções transversais do lenho foram acondicionadas em câmara de climatização (20° C, 60% UR) até atingir 12% de umidade (Figura 12B) (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 12C). As amostras foram encaixadas em suporte metálico (Figura 12D) e colocadas no compartimento interno blindado do equipamento. A varredura da amostra foi feita no sentido medula-casca a cada 0,04 mm (25 leituras por 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. 2:

$$I/I_0 = e^{-\mu_l t} \quad (2)$$

Onde: I = intensidade do feixe de radiação após atravessar a amostra; I₀ = 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 I₀ 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. 3:

$$\mu_l = \mu_m \cdot \rho \quad (3)$$

Onde: μ_m = coeficiente de atenuação de massa da amostra (cm²/g); ρ = densidade (g/cm³)

O coeficiente de atenuação de massa (μ_m) varia em função da energia da radiação incidente e da composição da amostra, relação importante quando se trata do estudo do lenho de árvores, visto que a composição química é muito diversificada (por exemplo, celulose, hemicelulose, lignina, extrativos, cinzas e água) (FRANCO, 2014). A necessidade de conhecer a umidade da amostra é importante, uma vez que a água presente em cada um destes componentes químicos é elemento fundamental na acurácia da determinação da densidade (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 por meio da determinação do coeficiente de atenuação da massa do material que está sendo estudado (CHAGAS, 2013).

Figura 12. (A) corte das amostras em dupla serra circular paralela; (B) amostra casca-casca obtida; (C) densitômetro de raios X utilizado; (D) suporte metálico utilizado para encaixe das amostras dentro do equipamento

Fonte: Franco (2014)

Para a confecção da cartografia da variação da densidade aparente do lenho nas direções radial (medula-casca) e longitudinal (base-topo) do tronco das árvores foram utilizados os perfis radiais de densidade aparente das amostras do lenho da base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total. Utilizou-se o *software* R, versão 3.2.2, sendo o *script* inicial de criação baseado no trabalho de Franco (2014).

Propôs-se a cartografia da variação da densidade aparente para melhor compreensão do efeito dos tratamentos sobre toda a árvore. Para a interpolação dos dados

obtidos e geração dos mapas cartográficos, foi utilizado a Krigagem, considerada uma boa metodologia de interpolação de dados, a qual utiliza o dado tabular e sua posição geográfica para calcular as interpolações (LANDIM, 2006).

Além disso, 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 13ABC).

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 visual da variação radial da densidade e sua relação com a estrutura da anatomia da madeira (Figura 13D). A aquisição das imagens digitais das amostras de madeira foi realizada no Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeira da ESALQ/USP.

Figura 13. (A) vista geral do equipamento de raios X digital; (B) câmara de irradiação 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

Fonte: Franco (2014)

4.5.2 Densidade básica do lenho das árvores de eucalipto

O NIR foi calibrado com a densidade básica do lenho das árvores, de acordo com Hein, Lima e Chaix (2009), Hein et al. (2009c) e Franco (2014). Primeiramente, foram

adquiridos os espectros da madeira sólida (discos) em oito posições (quatro mais externas e quatro mais internas) (Figura 14A). Em seguida, foram obtidos os espectros das seções quadradas marcadas no disco correspondentes a 0 (bem em cima da medula), 25, 50, 75 e 100% do raio (dois raios, portanto tem-se duas repetições/disco) (Figura 14B). Na sequência, as seções quadradas foram individualizadas com auxílio de uma serra fita e foram adquiridos os espectros destas seções (Figura 14C). Em todos os casos, a aquisição dos espectros foi feita nos discos que correspondem à posição da base das árvores.

Convencionou-se que as seções quadradas fossem de 2 x 3 x 2 cm (comprimento x largura e espessura, respectivamente) para possibilitar tanto a leitura dos espectros com a fibra óptica como a leitura com a esfera de integração. O espectro utilizado para a geração do modelo de calibração foi proveniente da média dos espectros obtidos para cada disco e seção quadrada, a fim de obter um conjunto de dados representativo da variabilidade radial dos discos. A metodologia de amostragem espectral proposta neste trabalho foi construído com base nos estudos de variabilidade radial e longitudinal de densidade básica do lenho de árvores de *Eucalyptus*, conforme discutido por Pádua (2009). A confecção de amostras de seção quadrada de cada um dos discos amostrados gerou um total de 596 amostras analisadas.

Para aquisição dos espectros, os discos e respectivas seções quadradas de madeira de *E. grandis* foram mantidas previamente em sala climatizada (20° C, 65% UR) até atingir a umidade de equilíbrio para então efetuar-se a aquisição dos espectros. A aquisição espectral dos discos foi realizada com fibra óptica (ponto de 7 mm² de leitura espectral) e das seções quadradas com fibra e esfera de integração (ponto de 150 mm² de leitura espectral) no modo de reflexão difusa do NIR na região de 3500-12500 cm⁻¹ com uma resolução espectral de 8 cm⁻¹, utilizando o espectrômetro modelo MPA, Bruker, associado ao programa OPUS (versão 7). A Figura 14 ilustra como foi feita a aquisição dos espectros das amostras em cada etapa do processo de amostragem espectral.

Para o desenvolvimento do modelo de predição foi determinado, na sequência, a densidade básica pelo método da balança hidrostática (GLASS, ZELINKA, 2010). Para isso, as mesmas seções quadradas, utilizadas anteriormente, foram imersas em água até atingirem a completa saturação. Em seguida, foi obtido, nesta ordem, o peso úmido, imerso e seco em estufa (103±2° C) das amostras. Na sequência da determinação do volume saturado e da massa seca de cada amostra, foi calculada a densidade básica do lenho (g/cm³), conforme descrito por Trugilho (2009).

Figura 14. Esquema de aquisição dos espectros NIR; (A) oito pontos na madeira sólida em disco por meio de fibra óptica; (B) dois pontos de aquisição por quadrado por meio de fibra óptica; (C) um ponto de aquisição por meio da esfera de integração nas posições 0 (seção quadrada representada pelo n° 4), 25 (seção quadrada representada pelo n° 4), 50 (seção quadrada representada pelo n° 3 e 5), 75 (seção quadrada representada pelo n° 2 e 6) e 100% (seção quadrada representada pelo n° 1 e 7) do raio

Os resultados dos espectros NIR foram explorados pela PCA, como um método descritivo de análise. Os espectros obtidos pelo NIR e os dados de densidade básica obtidos em laboratório foram utilizados para desenvolver os modelos de predição, utilizando o método de análise de regressão PLS, com o auxílio do *software Unscrambler 9.7* (Camo, AS, Norway). Inicialmente, diferentes pré-tratamentos dos espectros foram aplicados, como SNV, primeira e segunda derivada e suas combinações. Os critérios para selecionar o melhor modelo de predição foram os valores obtidos para o R^2 da calibração, coeficiente de determinação da validação cruzada do modelo (R^2_{CV}), número de fatores PLS, erro padrão da calibração (SEC), erro padrão da validação cruzada (SECV) e a relação de desempenho do desvio (dada pela divisão entre o desvio-padrão e o erro de predição). A análise conjunta de todos estes parâmetros estatísticos permitiu concluir se o modelo gerado foi satisfatório.

4.6 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto

A caracterização anatômica do lenho das árvores de eucalipto foi feita por meio da amostragem radial (0, 50 e 100%) dos discos do DAP de três árvores/tratamento (totalizando 18 árvores). De cada posição radial pré-definida foram retirados corpos de prova de madeira de 2 x 2 x 2 cm.

4.6.1 Dimensões das fibras

A determinação das dimensões das fibras de cada posição radial foi realizada com a 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, 48h). Na sequência, as fibras 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 (IAWA COMMITTEE, 1989) com auxílio do *software* de análise de imagem *Image Pro Plus* (versão 6.1) (FRANCO, 2014) (Figura 15).

Figura 15. Avaliação da espessura e diâmetro do lume das fibras do lenho através do *software Image Pro Plus*

4.6.2 Dimensões dos vasos

A precipitação pluviométrica (mm), temperatura média, máxima e mínima (°C), e umidade relativa do ar (%) foram obtidas diariamente da estação meteorológica da Estação Experimental de Itatinga/SP (localizada a 800 m do local deste experimento) e estão descritas no trabalho de Legoas (2015). O autor descreve que no ano de 2014, a precipitação acumulada foi de 1181 mm, muito menor do que nos anos anteriores de 2011, 2012 e 2013 com 1470, 1452 e 1240 mm, respectivamente, e menor do que a média do estado de São Paulo (1384,5mm).

Portanto, a baixa precipitação pluviométrica do ano de 2014 pode ter afetado significativamente o desenvolvimento das árvores de eucalipto. Neste sentido, a fim de compreender melhor os efeitos da seca na anatomia da madeira, propôs-se para este estudo, a interpretação dos dados de arquitetura dos vasos, por anel de crescimento e com

base em parâmetros climáticos. Para esta avaliação da atividade cambial pela descrição das estruturas do xilema, comparou-se a anatomia do anel de crescimento referente à 2014 com os anéis anteriores e entre amostras dos diferentes tratamentos. Diante disso, a discussão desta análise explora as perspectivas funcionais das árvores de *E. grandis*, no intuito de ter um panorama geral sobre (i) como os tratamentos influenciaram a formação da madeira e (ii) se é possível observar tendências adaptativas na anatomia do lenho das árvores com e sem exclusão parcial de chuvas, tendo como base os dados de parâmetros anatômicos do eucalipto de cada ano observados e as condições climáticas. Toda a análise foi feita comparando-se resultados obtidos com o que já foi descrito por alguns autores sobre o tema (SHAO et al., 2008; FONTI et al., 2010; SECCHI; PAGLIARANI; ZWIENIECKI, 2017).

A arquitetura dos vasos foi estudada com o uso do *software* de análise de imagens *Image Pro Plus* (versão 6.1). Foram estudadas três amostras por tratamento (18 amostras no total), sendo as mesmas amostras utilizadas na análise das fibras, na posição do DAP. As amostras diametrais (dois raios) foram ultra polidas em lixa 80 a 4000 (em múltiplos de 20) e as imagens macroscópicas da madeira foram obtidas no microscópio de luz polarizada da *Zeiss*, modelo *Axio Scope.A1*, no aumento de 2,5x. Foi utilizada a função panorâmica de aquisição de imagens pelo microscópio, a qual obtém uma sequência de imagens da madeira no sentido medula-casca de forma contínua (em varredura) e com alta resolução.

A determinação dos anéis de crescimento em árvores de eucalipto não é evidente; muitos autores explicam que devido, principalmente, às grandes variações de temperatura e precipitações nas regiões tropicais, podem acontecer situações em que os anéis não são claramente marcados ou estão ausentes, acarretando maior dificuldade para a identificação e a datação desses anéis (FRITTS, 1976; SCHWEINGRUBER, 1988; FRITTS; SWETNAM, 1989; DÉTIENNE, 1995).

Portanto, para a marcação dos anéis nas amostras, utilizou-se um microscópio estereoscópico binocular no aumento de 40x e as imagens das amostras obtidas em equipamento de raios x digital. De acordo com padrões anatômicos observados, isto é, bandas de parênquima marginal e presença de agrupamento de vasos (IAWA COMMITTEE, 1989; VETTER, 2000), delimitou-se os anéis de crescimento referentes aos anos de 2011 a 2015, sendo que o quinto e último anel ainda estava em formação, uma vez que as amostras foram coletadas em maio de 2015 (Figura 16).

Foram identificados cada anel anual de crescimento e respectiva largura e caracterizados, por anel, o diâmetro tangencial, área ocupada e frequência dos vasos com uso das equações (4) e (5) e de acordo com o *IAWA Committe - List of Microscopic Features for Hardwood Identification* (1989).

$$\text{Frequência dos vasos} = (\text{n}^\circ \text{ de vasos}/\text{área do xilema}) \cdot 100 \quad (4)$$

$$\% \text{ de área de vasos} = (\text{área total de vasos}/\text{área do xilema}) \cdot 100 \quad (5)$$

Figura 16. Imagem macroscópica do raio 1 de uma amostra de *E. grandis*, fertilizada com Na em condição de exclusão parcial de chuvas, para estudo da arquitetura dos vasos, de acordo com a delimitação dos anéis de crescimento referentes aos anos de 2011 a 2015 (denominados de 1 a 5, nesta ordem)

4.7 Análises estatísticas

Foi utilizado o programa SAS para as análises estatísticas dos dados (SAS INSTITUTE, 1997), sendo medidos os *outliers* e a heterogeneidade de variância. As diferenças entre os tratamentos e os blocos foram testadas por meio da análise de variância, em blocos completamente casualizados para o dispositivo experimental em *split-plot*, quando os seis tratamentos foram comparados. A distribuição normal dos resíduos foi verificada por meio do teste *Kolmogorov-Smirnov*. Quando se detectaram diferenças entre tratamentos (5% de probabilidade), o teste *Student-Newman-Keuls* foi utilizado para comparar as médias dos tratamentos, conforme proposto por Battie-Laclau (2013).

A fim de tentar compreender melhor os efeitos da seca no lenho das árvores, propõe-se o estudo mais aprofundado do tecido lenhoso formado no ano de 2014, relatado anteriormente como um dos mais secos da série histórica do Sudeste. Para isso, visou-se realizar a identificação dos anéis de crescimento e analisar de forma integrada a densidade aparente, anatomia e química da madeira e os dados climatológicos do período (2011 a 2014). Essa correlação possibilitou a melhor compreensão da influência do clima e dos tratamentos sobre as árvores de *E. grandis*.

É importante salientar que todos os trabalhos que foram realizados na mesma área experimental, não só os que abordaram as propriedades do lenho, mas também acúmulo de biomassa nos compartimentos das árvores, emissão de CO₂ na superfície do solo, concentração de açúcares e composição isotópica da seiva elaborada e troca gasosa nas folhas (entre outros), foram importantes para interpretar e cruzar de forma indireta com os resultados obtidos no presente estudo. Estudos complementares, conduzidos *in situ*, sobre

os diferentes estados de crescimento do eucalipto, são indispensáveis para melhorar a compreensão da resposta morfológica e fisiológica da planta à deficiência hídrica. Esta informação é importante para determinar o potencial produtivo das áreas plantadas e conceber métodos silviculturais adaptados.

4.8 Imagem hiperespectral do lenho das árvores de eucalipto

4.8.1 Problemática da análise

Um trabalho que propõe o estudo da interação de diversos fatores em ambiente natural envolve muitas variáveis e, geralmente, a busca por respostas não é linear. Neste caso, o estudo da interação do déficit hídrico e da fertilização permite abordar uma série de questões por se tratar de um assunto interdisciplinar onde pode-se investigar desde as respostas diretas da planta às estas condições até a avaliação do impacto dessa interação.

Com o avanço da presente pesquisa, o grupo de pesquisadores envolvidos sugeriu um desafio inédito para área de investigação em madeiras; fazer um mapeamento dos diferentes compostos do lenho por meio da técnica analítica de espectroscopia no NIR a partir de um equipamento HI-NIR (SisuCHEMA, *Specim®*). Priorizou-se por começar o estudo dos extrativos da madeira, uma vez que, conforme descrito em literatura (LEVITT, 1980; RAMBAL, 1992; BUSSOTTI et al., 2002; KOZLOWSKI, 2003; BOVY et al., 2010; MAZID; KHAN, MOHAMMAD, 2011; LEPIKSON-NETO et al., 2013), a produção de extrativos pode estar relacionada com a condição de déficit hídrico.

A resposta sobre qual caminho técnico-científico tomar para desenvolver este tipo de análise não é evidente, posto que existem muitas alternativas e dificuldades. A primeira questão abordada aqui é que as amostras de madeira adquiridas neste experimento estão em discos referentes à posição DAP, ou seja, madeira sólida (chamada aqui de “*amostras finais*”). Destas amostras, fez-se a aquisição das imagens HI-NIR.

O estudo das amostras na forma de discos de madeira dificulta este tipo de estudo por diversas razões. Por se tratar de um equipamento o qual aplicam-se os princípios de óptica geométrica, as características físicas da amostra como densidade, porosidade e grau de homogeneidade influenciam de forma sistemática a profundidade de penetração da radiação NIR e, conseqüentemente, o espectro adquirido em toda a sua gama de comprimentos de onda (ZAVARIN; JONES; COOL, 1990; OSBORNE, 1993; BURNS; CIURCZAK, 2008).

Como primeira opção para realização da predição dos teores de extrativos da madeira congitou-se, ainda durante o processo de escolha de estratégia a ser usada para realizar esse desafio, fazer esta análise usando um modelo PLS construído a partir de

dados espectrais HI-NIR de amostras sólidas (com dados químicos de referência) obtidas de uma coleção de amostras independentes do presente trabalho e aplicá-lo diretamente sobre as “*amostras finais*”. A Figura 17 esquematiza esta opção de análise. Contudo, alguns autores que tentaram seguir este caminho (SCHWANGHART; JARMER, 2011; JARMER, 2013) obtiveram resultados com viés, porém com boa correlação, o que encoraja a equipe de pesquisa a testar este caminho “*direto*”.

Figura 17. Esquema do caminho direto para realização da predição dos teores de extrativos da madeira baseado na calibração das amostras HI-NIR com base em amostras

Ainda, uma segunda opção (Figura 18) foi proposta para melhorar o modelo de predição, uma vez que o *caminho direto* prevê o uso de um conjunto de dados de calibração limitado (apenas 50 amostras). Como a equipe de trabalho dispunha previamente de uma coleção de dados espectrais (Tabela 5) adquiridos em equipamento NIR (*Vector, Brucker*) de madeira (em pó e sólida) de diversas espécies de eucalipto e respectivos dados de laboratório de química, uma opção seria usar esta ampla base de dados para prever o teor de extrativos das “*amostras finais*”. Contudo, neste “*segundo caminho*”, a origem e a

condição física das amostras (pó e sólida) é diferente das amostras a serem analisadas (em disco) e, apesar da coleção de amostras em pó ser enorme (536 amostras), a mesma é fundamentada em diversas espécies de *Eucalyptus* o que leva a pensar que uma possível solução para resolver este desafio seria realizar a transferência de calibração entre os equipamentos NIR e HI-NIR. Portanto, nesta etapa do trabalho fica claro que a quantidade e a qualidade das amostras que se tinha para o estudo foram fatores decisivos para qual metodologia de trabalho seguir.

Figura 18. Esquema da transferência de calibração entre os equipamentos NIR (Vector, Brucker) e HI-NIR (SisuCHEMA, Specim®)

Desta maneira, no presente trabalho, estas duas opções foram testadas; o *caminho direto* (Figura 17) e a transferência de calibração (Figura 18) para que, em trabalhos futuros, os pesquisadores possam comparar métodos de predições. Não foram encontrados trabalhos que tratam da transferência de calibração para predição de compostos químicos da madeira, o que faz desse trabalho uma pesquisa inédita.

Tabela 5. Amostras que compõe a coleção utilizada para obtenção do modelo de transferência de calibração

Projeto	Laboratório que realizou as análises químicas para calibração dos modelos	Espécie	Origem das amostras utilizadas	Idade (em meses) das plantações durante a coleta da amostra	Nº de amostras analisadas Em pó
Biotech	Institut du Pin Bordeaux	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	Congo Pointe Noire	59	169
Cenibra	CIRAD Montpellier	<i>E. urograndis</i>	Brasil	72	29 (também em sólido)
Loudima_73	CIRAD Montpellier	<i>E. urophylla</i>	Congo Loudima	420	25
Massamba	CIRAD Montpellier	<i>E. camaldulensis</i>	Senegal	120	12
Plantar	CIRAD Montpellier	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	Brasil	78	24 (também em sólido)
R02_02	CIRAD Montpellier	<i>E. urograndis</i>	Congo Pointe Noire	60	09
R90_13	CIRAD Montpellier	<i>E. uropellita</i> , <i>E. urograndis</i>	Congo Pointe Noire	222	20
R91_02 (BRG)	CIRAD Montpellier	<i>E. urophylla</i>	Congo Pointe Noire	165	06
	INAPG Paris	<i>E. urophylla</i>	Congo Pointe Noire		60
R95_10	CIRAD Montpellier	<i>E. urograndis</i>	Congo Pointe Noire	141	08
Thèse Zo et Rado	CIRAD Montpellier	<i>E. robusta</i>	Madagascar	24 - 96	01
					64
Tree For Joule (avec R96_04)	CIRAD Montpellier	<i>E. urograndis</i>	Congo Pointe Noire	89	37
	CIRAD Montpellier				27
					02
					09
WUETREE	CIRAD Montpellier	<i>E. urograndis</i>	Congo	36	34
TOTAL					536

Nesta base de dados dispunha-se, então, de 536 amostras em pó de diversos gêneros de *Eucalyptus*, as quais foram adquiridas (previamente) os espectros NIR e, em seguida, determinado em laboratório o teor de extrativos (valor chamado de “y”). Destas 536 amostras, 90 também foram medidas em aparelho HI-NIR (Figura 19).

Como citado anteriormente, as “amostras finais” estão em estado sólido, não possuem determinação química em laboratório e, por isso, nada garante que um modelo de predição de amostras em pó possa ser adequado para se aplicar nas “amostras finais”. Assim, para fins de comparação e verificação da obtenção do melhor modelo, propôs-se também gerar um modelo com amostras sólidas. Utilizaram-se, então, 50 amostras de diversas espécies de eucalipto da coleção (Tabela 5), onde adquiriu-se os espectros em equipamento NIR, imagem HI-NIR e determinação química em laboratório, previamente e nesta ordem (Figura 19). As 90 e 50 amostras respectivamente foram escolhidas de acordo com análise prévia de PCA e abrangendo os valores extremos de teor de extrativos da coleção; ainda nesta etapa prévia, os *outliers* foram detectados e removidos do conjunto de dados.

Figura 19. Diagrama referente à organização e quantidade total de amostras usadas de acordo com cada equipamento utilizado para obtenção do modelo de transferência de calibração

As informações sobre a forma de determinação do teor de extrativos totais, lignina e celulose, preparação das amostras para aquisição de espectros NIR e respectiva manipulação espectral das amostras que compõem a coleção podem ser consultadas em Hein, Lima e Chaix (2010) e Denis et al. (2013).

O equipamento NIR utilizado funciona no modo de reflectância difusa, com esfera de integração (para aquisição de ponto de 150 mm² de leitura espectral), no intervalo de 800 a 2850 nm com transformada de Fourier e resolução espectral de 8 cm⁻¹ e ouro sinterizado como leitura padrão.

Para fins de organização das etapas de trabalho, diz-se que existem três estágios de desenvolvimento da problemática de transferência de calibração: (i) transferência de calibração (entre equipamentos) das amostras em pó do banco de dados (Figura 20); (ii) transferência de calibração (entre equipamentos) das amostras sólidas do banco de dados (Figura 21); (iii) uso do melhor modelo de transferência de calibração obtido na etapa (i) ou (ii) para predição química das “*amostras finais*” (em discos de madeira). O presente estudo vai tratar somente da etapa (i).

Figura 20. Fluxograma dos métodos, sendo (A) coleta da imagem HI-NIR das amostras de madeira em pó da coleção; (B) divisão do conjunto de dados para conduzir a calibração e o teste do modelo; (C) PLS e construção dos modelos de transferência. O conjunto de dados N_{im} está incluído em N_{pt} ; $N_{im, teste}$ e $N_{pt, teste}$ são compostas pelas mesmas amostras; $N_{im, std}$ e $N_{pt, std}$ são compostas pelas mesmas amostras

Fonte: Adaptado de Nouri et al. (2017)

Figura 21. Fluxograma dos métodos, sendo (A) coleta da imagem HI-NIR das amostras de madeira sólida da coleção; (B) divisão do conjunto de dados para conduzir a calibração e o teste do modelo; (C) PLS e construção dos modelos de transferência. O conjunto de dados N_{im} está incluído em N'_{pt} ; $N_{im, teste}$ e $N'_{pt, teste}$ são compostas pelas mesmas amostras sólida e pó, respectivamente; $N_{im, std}$ e $N'_{pt, std}$ são compostas pelas mesmas amostras sólida e pó, respectivamente

Fonte: Adaptado de Nouri et al. (2017)

4.8.2 Aquisição das imagens hiperespectrais

4.8.2.1 Preparação das amostras

As amostras de madeira em pó pertencentes à coleção foram fragmentadas utilizando um moinho *Retsch* (modelo SM100) na peneira de 4 x 4 mm.

As amostras sólidas pertencentes à coleção e, da mesma forma, as “*amostras finais*” consistem em amostras de 3 cm de espessura e bases paralelas. Todas receberam apenas um acabamento simples em lixa nº 80 em todas as faces. Todas as amostras foram acondicionadas em câmara de climatização (20° C, 60% UR) até atingir 12% de umidade para, em seguida, ser realizada a aquisição da imagem hiperespectral.

4.8.2.2 Sistema de aquisição da imagem hiperspectral

As imagens HI-NIR foram obtidas usando uma câmera estacional de imageamento químico (SisuCHEMA, SWIR, *Specim®*). O equipamento possui lente dianteira de 30 mm (campo de visão de 50-100 mm) e um sistema de varredura de linha, operando em um intervalo de comprimento de onda de 928 a 2524 nm com intervalos de 6 nm. A velocidade de escaneamento da amostra é de 40 mm/seg. Este intervalo de comprimento de onda foi segmentado em 256 canais espectrais, resultando em um cubo de imagem HI-NIR com 256 imagens (um pixel = um comprimento de onda). O tamanho do pixel (resolução espacial) foi definido para 625 x 625 µm. A integridade das amostras foi completamente preservada durante toda a aquisição do espectro. O próprio equipamento executa a leitura de referência da luz (branco chamado de *Spectralon*) e do preto (Figura 22).

Os dados HI-NIR foram transformados em valores de pseudo-absorbância usando um padrão de referência branco e referência interna escura. Para isso, foi aplicada uma função logarítmica na relação entre o espectro de reflectância total e o espectro da amostra, ambos corrigidos para a referência escura.

Figura 22. Esquema de funcionamento do equipamento HI-NIR utilizado, sendo a: fonte de radiação; b: bandeja móvel para amostra; c: amostra; d: fenda (*entrance line slit*); e: rede de difração de transmissão; f: detector bidimensional

Fonte: Grupo de Instrumentação e Automação da UNICAMP (arquivo pessoal)

As amostras de pó de madeira foram acomodadas na bandeja do instrumento em um suporte de *Teflon* microporoso de 10 x 20 cm (Figura 23A). As amostras sólidas foram colocadas diretamente sobre a bandeja do equipamento (Figura 23BC). Todas as imagens foram adquiridas no Departamento de Química Analítica, do Instituto de Química da UNICAMP.

Figura 23. Aquisição da imagem HI-NIR das (A) amostras em pó (4 mm); (B) amostras sólidas de 2 x 2 x 3 cm (comprimento, largura e espessura, nesta ordem); (C) “amostras finais” de 3 cm de espessura

4.8.3 Processamento e análise dos dados

Toda a análise dos dados foi desenvolvida no Instituto Nacional de Pesquisa em Ciência e Tecnologia para o Meio Ambiente e Agricultura, IRSTEa, e no Centro de

Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento, CIRAD, ambos em Montpellier, França.

4.8.3.1 Predição direta

Para a predição do teor de extrativos totais foi usado como pré-tratamento a derivada segunda de *Savitsky-Golay* em um modelo PLS, previamente construído a partir de dados espectrais HI-NIR das 50 amostras sólidas obtidas da coleção de amostras independentes deste trabalho. Este modelo foi aplicado sobre 18 amostras (três por tratamento – as mesmas amostras utilizadas para caracterização das fibras e vasos) para predição direta dos extrativos dos discos das “amostras finais”.

Uma programação específica para este trabalho foi criada para gerar as imagens no MatLab R2015a (*The Mathworks Inc., Natick, MA, USA*), utilizando o PLS_Toolbox 3.0. *Eigenvector Research, Inc.* Isso permitiu utilizar a função *improfile* que calcula o valor predito para cada pixel que passar por uma linha diametral traçada manualmente sobre a amostra (Figura 24). Foram traçadas 12 linhas diametrais por disco e, em seguida, calculado os valores médios, mínimos, máximos e os desvios-padrões.

Figura 24. Predição direta do teor de extrativos totais das “amostras finais” por meio do software MatLab R2015a

4.8.3.2 Criação da base de dados para calibração, teste e dados *standard*

A primeira base de dados (chamada de “*im*” por ser formada pelas imagens HI-NIR) (X_{im}, y_{im}) contém 90 amostras ($N_{im} = 90$), as quais os teores de extrativos totais medidos em

laboratório eram conhecidos (Figura 20AB). Tais teores foram classificados em ordem crescente e são chamados de “y”. Em seguida, a partir das 90 amostras, aplicou-se uma função que ordena e classifica as amostras de forma que, uma amostra entre três foi colocada no conjunto de teste (e as outras duas no conjunto de calibração). Este procedimento permite haver um conjunto de calibração “ $(X_{im}, y)_{im,cal}$ ” e um conjunto de teste “ $(X_{im}, y)_{im,teste}$ ” com 60 e 30 amostras, respectivamente, correspondendo à 2/3 e 1/3 do $N_{im} = 90$ amostras (Figura 20B). Este método assegura que ambos os conjuntos de calibração e teste tenham uma distribuição semelhante de valores de “y”. Para assegurar que as amostras foram igualmente representadas nos conjuntos de calibração e teste, a análise PCA foi realizada e não foi verificada a presença de grupos.

A segunda base de dados (chamada de “pt” por ser constituída pelas amostras da coleção com aquisição de espectros NIR em esfera de integração, permitindo a leitura de pontos) “ $(X_{pt}, y)_{pt}$ ” foi construída a partir de 536 amostras ($N_{pt} = 536$) da coleção as quais foram adquiridos os dados espectrais com equipamento NIR e quantificado em laboratório os teores de extrativos totais (Figura 20AB). Este banco de dados “ $(X_{pt}, y)_{pt}$ ” (assim como a imagem “im”) foi dividido em dois sub-grupos. As 30 amostras correspondentes ao “ $(X_{pt}, y)_{pt,teste}$ ” são as mesmas amostras do “ $(X_{im}, y)_{im,teste}$ ”, ou seja, sempre utilizou-se o mesmo grupo de teste para as duas bases de dados. Desta forma, os valores da resposta “y” foram idênticos em ambos os conjuntos de teste. As amostras restantes do conjunto de dados “ $(X_{pt}, y)_{pt}$ ” foram colocadas no conjunto de calibração “ $N_{pt,cal}$ ”, com 446 amostras e no conjunto de dados *standard* “ $N_{pt,std}$ ”, com 60 amostras totalizando 506 amostras (Figura 20B).

Os métodos de transferência testados neste estudo exigem um conjunto de amostras denominada *standard*, as quais foram medidas em ambos os instrumentos NIR e HI-NIR (Figura 20C). Este conjunto de dados *standard* é necessário quando não se consegue identificar as fontes de variação dos dados e, por isso, padroniza-se as respostas espectrais para aumentar a robustez do modelo.

Todos os métodos de transferência de calibração foram criados e desenvolvidos no MatLab R2015a (*The Mathworks Inc., Natick, MA, USA*), utilizando o PLS_Toolbox 3.0. *Eigenvector Research, Inc.*

4.8.3.3 Construção do modelo PLS

O modelo PLS chamado “ M_{im} ” foi construído usando o conjunto de dados “ $(X_{im}, y)_{im,cal}$ ” e testado no conjunto “ $(X_{im}, y)_{im,teste}$ ” (Figura 20C). O modelo chamado “ M_{pt} ” foi construído usando o conjunto “ $(X_{pt}, y)_{pt,cal}$ ” e testado no conjunto “ $(X_{pt}, y)_{pt,teste}$ ” (Figura 20C).

4.8.3.4 Métodos de transferência de calibração

Inicialmente e, apenas com o intuito de comparação, propôs-se dois modelos de predição sem transferência, considerados como “controle” para verificar se, efetivamente, os modelos de transferência de calibração melhorariam os resultados obtidos. O primeiro modelo preditivo sem transferência de calibração foi obtido aplicando diretamente a regressão PLS calibrado no equipamento NIR para um equipamento HI-NIR (chamado de modelo “PLS M_{pt} ”) (Figura 20). O segundo modelo (Figura 25) foi obtido aplicando a regressão PLS construído a partir de espectro NIR extraído de uma imagem HI-NIR, para uma imagem HI-NIR (chamado de modelo “PLS M_{im} ”).

Figura 25. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo “PLS M_{pt} ”. CV: validação cruzada

Foram testados quatro tipos de transferência de calibração: *Update*, *Reprofile*, *Piecewise Direct Standardization* (PDS) e *Transfer by Orthogonal Projection* (TOP). Estes modelos foram construídos usando o conjunto de dados “ $(X_{pt}, y)_{pt}$ ” e aplicando um dos quatro métodos de transferência selecionados (chamado de “ M_{tr} ”). Cada modelo “ M_{tr} ” foi testado no conjunto de dados “ $(X_{im}, y)_{im, teste}$ ”. Por fim, todos os resultados dos modelos obtidos usando esta abordagem foram comparados com os outros dois modelos preditivos sem transferência de calibração.

Modelo Update

O modelo *Update* (FEUDALE et al., 2002) consiste em atualizar o conjunto de dados da calibração “*master*”, adicionando amostras medidas no instrumento “*slave*”. Neste caso, todas as amostras *standard* foram adicionadas ao “ $(X_{pt}, y)_{pt, cal}$ ” e o modelo PLS foi recalibrado e testado no conjunto de dados “ $(X_{im}, y)_{im, teste}$ ” (Figura 26).

Figura 26. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração Update. CV: validação cruzada

Modelo Replib

O modelo *Replib* consiste em adicionar exemplos de perturbações espectrais observadas entre o “master” e o “slave”, associado a um valor nulo “y” ao conjunto de dados de calibração (SHENK; WESTERHAUS, 1991). Isso deve forçar a regressão para calcular um modelo em um espaço independente daquele que contém as perturbações. Neste caso, os espectros de diferença das amostras *standard* foram calculados por “ $D = N_{im, std} - N_{pt, std}$ ” e, então, estes espectros da diferença foram adicionados ao “ $(X_{pt}, y)_{pt, cal}$ ”. O modelo PLS foi então recalibrado e testado no conjunto de dados “ $(X_{im}, y)_{im, teste}$ ” (Figura 27).

Figura 27. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração Replib. CV: validação cruzada

Modelo PDS

O modelo PDS baseia-se no cálculo de uma função “f” que transforma o espectro “slave” x em um “master tal como” x^* (FEARN, 2001). Visa-se corrigir os trechos de mudanças ou incongruências entre os espectros obtidos dos equipamentos entre o “master” e o “slave” (BOUVERESSE; MASSART, 1996). Assumindo-se que a função “f” é linear, então tem-se que os espectros do equipamento “master” e “slave” são ligados por uma relação como “ $x^* = Fx + a + e$ ” onde F é uma matriz, a é um deslocamento e “e” é o residual. Entretanto, o cálculo do F está condicionado à vários problemas, uma vez que pertence a

um enorme espaço vetorial. Para abordar esta questão, o modelo PDS, que é uma versão simplificada do modelo “*direct standardization*”, foi proposta por Feudale et al. (2002). Supõe-se que as deformações espectrais são locais e que a matriz “F” é, portanto, próxima de uma matriz diagonal. Na prática, cada comprimento de onda do espectro “*slave*” depende do “*w*” mais próximo do comprimento de onda do espectro “*master*” (Figura 28). Por isso, o parâmetro de largura “*w*” deve ser ajustado. O valor “*w*” ideal foi escolhido ao mesmo tempo que o número de variáveis latentes do modelo PLS, por meio da validação cruzada.

Neste estudo, testaram-se dois caminhos para análise do modelo de transferência de calibração PDS; o primeiro tem como objetivo converter os espectros “*slave*” em espectros “*master*” (chamado de modelo “PDS HI-NIR”) e o segundo tem por objetivo o inverso (chamado de modelo “PDS NIR”).

Figura 28. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração PDS. CV: validação cruzada

Modelo TOP

Projeções ortogonais foram propostas para superar problemas de robustez (ROGER; CHAUCHARD; BELLON-MAUREL, 2003). Isso envolve a remoção do subespaço espectral impactado pelas perturbações do espaço de calibração. Tal como acontece com o método *Reprofile*, uma matriz D coleta as perturbações espectrais, que são calculadas como a diferença entre o espectro “*master standard*” e o espectro “*slave standard*”. Uma base P do espaço abrangido pela matriz D é identificada, por exemplo, pela Decomposição de Valor Singular (SVD). Esta base é então utilizada para projetar os espectros de calibração ortogonal para P, por meio da remoção do subespaço influenciado pelo espaço de calibração e, então, produzindo um modelo ortogonal às perturbações. No presente estudo, os espectros de diferença das amostras *standard* foram calculados por “ $D = X_{im, std} - X_{pt, std}$ ”. Uma SVD foi calculada em D, produzindo uma matriz P de espectro k. O conjunto de dados “ $(X_{pt}, y)_{pt, cal}$ ” foi então projetado de forma ortogonal em P por meio da função “ $X^* = (X_{pt})_{pt, cal} (I - P'P)$ ” (Figura 29). Em seguida, o modelo PLS foi recalibrado em X^* e testado. Com isso, o

parâmetro k precisa ser ajustado (variando de 1 a 10). O valor k ideal foi escolhido, ao mesmo tempo, que o número de variáveis latentes do modelo PLS, por meio da validação cruzada.

Figura 29. Esquema de organização dos conjuntos de dados usados para confecção do modelo de transferência de calibração TOP

4.8.3.5 Desempenho da predição

O desempenho dos modelos foi avaliado aplicando-os no conjunto de teste “(X_{im} , $y_{im, teste}$)” (30 amostras) e calculando-se o erro quadrático médio da predição (RMSEP), viés, inclinação da reta e o coeficiente de determinação (R^2) entre os valores preditos e observado, conforme descrito por Nouri et al. (2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas do lenho das árvores de eucalipto

5.1.1 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 60 meses (cinco anos), de acordo com os tratamentos, está apresentada na Tabela 6.

Os resultados mostram uma diferença significativa entre a densidade aparente média das árvores controle em relação às fertilizadas com K e Na na situação com e sem exclusão parcial da chuva. É possível observar que os valores médios de densidade aparente entre as árvores fertilizadas são muito semelhantes, sendo que nas árvores que tiveram exclusão parcial da chuva, a diferença é inferior a $0,002 \text{ g/cm}^3$. Esta pequena diferença manteve-se, mesmo com o avanço da idade das árvores, conforme observados nos trabalhos de Castro (2014) e Legoas (2015) na mesma área experimental com árvores de um, dois, três anos e quatro anos, respectivamente.

Além disso, observou-se que as árvores controle assumiram os maiores valores de densidade aparente em relação às árvores fertilizadas, independente da exclusão parcial da chuva. Mais uma vez, este resultado corrobora com o observado por Castro (2014) e Legoas (2015). Sette Junior (2010) e Franco (2014) estudaram árvores de *E. grandis* fertilizadas com K e Na com idade entre dois e oito anos, porém sem exclusão da chuva e obtiveram o mesmo comportamento para os dados de densidade aparente.

Os valores de densidade aparente mínima e máxima do lenho para todos os tratamentos variaram entre $0,320$ e $0,340 \text{ g/cm}^3$ e $0,860$ e $0,880 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Essa amplitude de variação da densidade aparente observada permite concluir que há alternância de faixas de crescimento no lenho das árvores estudadas (Tabela 6).

Tabela 6. Densidade aparente média, mínima e máxima (g/cm³) do lenho das árvores de eucalipto, com 60 meses, de acordo com o tratamento

Tratamento	Densidade Aparente (g/cm ³)		
	Média	Mínima	Máxima
C/+A	0,570 a (0,016)	0,386 a (0,027)	0,866 a (0,037)
Na/+A	0,539 b (0,020)	0,356 bc (0,020)	0,865 a (0,030)
K/+A	0,543 b (0,022)	0,323 b (0,040)	0,875 a (0,022)
C/-A	0,567 a (0,014)	0,370 ab (0,023)	0,881 a (0,018)
Na/-A	0,547 b (0,026)	0,348 bc (0,054)	0,879 a (0,013)
K/-A	0,545 b (0,020)	0,335 b (0,040)	0,881 a (0,031)

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 de todas as árvores de eucalipto obtida (0,550 g/cm³) é próximo ao obtido por Sette Junior et al. (2009), Castro (2014) e Legoas (2015) para árvores de *E. grandis*. Neste sentido, entende-se que os dados de densidade aparente apresentados estão de acordo com a literatura. Porém, é importante ressaltar que o material genético e as condições de sítio são fatores que ocasionam diferenças nestes valores. Além disso, árvores com diferentes idades apresentam maiores proporções de lenho juvenil em relação à madeira adulta, ocasionando estas diferenças (HILLS; BROWN, 1984).

É possível ainda inferir que, considerando que as árvores controle sem exclusão parcial de chuva já estão em uma condição de estresse pois receberam o mínimo de nutrientes para crescimento (e não receberam K e Na, tratamento C/+A) e no tratamento C/-A sofreram um “segundo” estresse com a exclusão parcial de chuvas, os valores de densidade aparente refletem a condição descrita por Searson et al. (2004), Drew e Downes (2009), Drew et al. (2009), Drew et al. (2011) e Rosner et al. (2014) onde, em situação desfavorável ao crescimento, as árvores podem apresentar espessamento da parede celular, refletindo nos altos valores de densidade.

A influência da fertilização com K e Na fica claro no presente estudo. Da mesma forma, Vital (1990), Bouvet et al. (1999), Mäkinen, Saranpää e Linder (2002), Tomazello Filho (2006), Sette Junior (2010), Castro (2014), Franco (2014) e Legoas (2015) observaram diferenças significativas ocasionadas pela fertilização na densidade aparente do lenho.

Os diferentes perfis radiais da densidade aparente do lenho sujeito aos seis tratamentos podem ser observados na Figura 30. A determinação de forma qualitativa da variação de densidade aparente no sentido casca-medula-casca pode ser observada pelos perfis radiais obtidos pelo equipamento de raios X digital (Figura 30-2), o qual permite destacar importantes respostas do ritmo de crescimento das árvores de *E. grandis*; é possível verificar duas regiões nitidamente demarcadas no lenho das árvores, sendo (i) a posição mais interna do lenho, onde pode-se observar maiores valores de densidade (região

caracterizada pelos picos e áreas de coloração mais próxima do branco – imagem 2) definida como medula (posição correspondente ao intervalo de -2 a 2 cm do raio) e (ii) as posições mais próximas da casca (diâmetro de 9,3, 9,2, 13,7, 9,0, 9,2 e 11,3 cm nos tratamentos C/+A, Na/+A, K/+A, C/-A, Na/-A e K/-A, respectivamente). Diante disso, pode-se dizer que as árvores estudadas se caracterizam como lenho juvenil em transição para adulto.

A variação dos valores de densidade aparente na região da medula é semelhante para todos os tratamentos; observa-se que a porção central do lenho é constituída por um tecido juvenil, friável e sem anéis de crescimento bem demarcados. Nesta região, foram encontrados valores de densidade aparente média igual a 0,530 g/cm³. Na região mais próxima da casca, as variações também são semelhantes entre os seis tratamentos, porém é possível observar alternâncias de valores de forma muito mais demarcada, caracterizando os anéis de crescimento, nítidos nas imagens obtidas pelo equipamento de raios X digital. Conforme alguns autores destacam, a presença de fibras com parede celular mais espessa, acúmulo de parênquima axial, diâmetro de lume reduzido, menor frequência (nº/mm²) dos vasos na posição radial, principalmente na região mais próxima da casca refletem nos maiores valores de densidade observados (TOMAZELLO FILHO, 2006; SETTE JUNIOR, 2010; FRANCO, 2014).

Este comportamento de variação radial dos perfis de densidade do lenho determinado pela densitometria de raios X, caracterizado por maiores valores na região da medula (0,420-0,540 g/cm³), redução e estabilização dos valores (0,520-0,700 g/cm³) e aumento em direção à casca (0,640-0,880 g/cm³) é um padrão observado por diversos autores como Alzate (2004), Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Tomazello Filho (2006), Tomazello Filho et al. (2008), Sette Junior (2010), Oliveira et al. (2012), Rodrigues (2013), Castro (2014), Franco (2014) e Legoas (2015). Além disso, é possível inferir que este aumento da densidade no sentido medula-casca evidencia que a atividade cambial é afetada pela sazonalidade do clima, acarretando mudanças na qualidade do lenho.

Fonseca e Lousada (2000), Tomazello Filho (2006), Tomazello Filho et al. (2008) e Sette Junior (2010) explicam que o maior valor da densidade aparente na medula pode acontecer devido à presença de amido e cristais nas células parenquimáticas, às variações de diâmetro, área e frequência dos vasos e presença de fibras de parede mais espessa, características anatômicas da madeira as quais influenciam a atenuação dos feixes de raios X.

Legoas (2015) realizou o estudo da densidade aparente média a cada cinco por cento do raio do lenho dos seis tratamentos na mesma área experimental quando as árvores tinham 48 meses. Os resultados indicaram um aumento característico na região correspondente à 85-100% do raio. Esta região correspondia, aproximadamente, ao tecido

formado nos dois últimos anos de crescimento do tronco e, nesse período, observou-se maior variação do valor da densidade do lenho nas árvores submetidas à exclusão parcial de chuvas indicando que, independente do tratamento de nutrição, o déficit hídrico resulta na maior variação e aumento dos valores observados para densidade aparente do lenho na região mais próxima da casca.

Figura 30. Variação radial da densidade aparente (g/cm^3) do lenho das árvores de eucalipto da classe de área basal média dos tratamentos C/+A, Na/+A, K/+A, C/-A, Na/-A e K/-A. 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. As amostras escolhidas para compor esta Figura são representativas da média geral de densidade aparente por tratamento

A variação da densidade aparente média do DAP do lenho das árvores de eucalipto aos 12, 24, 36, 48 e 60 meses mostra, em geral, um aumento dos valores, independente dos tratamentos (Figura 31). É possível verificar que os valores aumentam progressivamente até os 36 meses e, após essa idade, os aumentos são mais sutis. Foram utilizados os dados de Castro (2014) e Legoas (2015) que trabalharam na mesma área experimental, ambos com 48 árvores.

Figura 31. Variação da densidade aparente média do DAP do lenho das árvores de *E. grandis*, aos 12º, 24º, e 36º mês (CASTRO, 2014), 48º mês (LEGOAS, 2015) e 60º mês por tratamento

Segundo Tomazello Filho (2006), Tomazello Filho et al. (2008), Githiomi e Kariuki (2010) e Oliveira et al. (2012), a densidade aumenta conforme há aumento da idade devido, principalmente, a resposta do câmbio às alterações fisiológicas. A sazonalidade climática influencia na atividade cambial, produzindo anéis de crescimento onde alternam-se a presença de lenho inicial e tardio, sendo que a principal diferença está na espessura da parede celular, que é maior no lenho tardio. Além disso, a maior quantidade de lenho adulto está associada ao desenvolvimento do cerne e aumento na quantidade de extrativos (GOMINHO, 2001). Por isso, é possível inferir que a maior quantidade de lenho tardio é uma característica de árvores com maiores idades, apresentando maiores valores de densidade aparente média.

5.1.2 Densidade básica do lenho por espectroscopia NIR

Para determinação da densidade básica do lenho por meio do NIR, foram feitas análises multivariadas de regressão PLS, no comprimento de onda de 1100 a 2500 nm, onde os melhores resultados de calibração foram encontrados com os dados obtidos do pré-tratamento da primeira derivada, seguido pela validação cruzada. Para calibração, foram utilizadas as amostras de referência dos discos da base de todas as árvores.

A calibração e validação cruzada correspondente obtida pelo NIR para estimativa da densidade básica de todos os tratamentos pode ser verificada na Tabela 7. A densidade básica das 596 amostras estudadas apresentou média de valor predito igual a 0,450 g/cm³, sendo observada uma variação de 0,340 a 0,620 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 0,83 e 0,81, respectivamente, sendo que o número de fatores PLS e o RPD foram iguais a 6 e 2,36, nesta ordem. O RPD é uma maneira de avaliar a precisão da calibração realizada e de comparar modelos entre si e é descrita como a razão entre o desvio padrão dos valores de referência e o RMSECV (WILLIAMS; SOBERING, 1993). O erro padrão de calibração e de validação cruzada (RMSEC e RMSECV) foi igual a 0,021 e 0,022, respectivamente, conforme demonstrado pela Tabela 7.

Tabela 7. Calibração e validação cruzada correspondente obtida pelo NIR para estimativa da densidade básica ponderada de todos os tratamentos

Propriedade	R ² _c	R ² _{cv}	Fat PLS	SEC	SECV	Outliers	RPD
Densidade básica	0,83	0,81	6	0,021	0,022	3	2,36

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

De acordo com Williams e Sobering (1993) e Williams (2014) o valor do RPD é o principal parâmetro para identificar se o modelo é satisfatório ou não. Schimleck, Mora e Daniels (2003) afirmam que um RPD com valor maior que 1,5 é satisfatório para predições preliminares na área de ciências florestais. Schimleck e Evans (2004) consideram que, em trabalhos de melhoramento genético, é suficiente RPD igual a 2,5. Williams e Sobering (1993) resumem os valores satisfatórios de RPD, concluindo que valores entre 2 e 3 é suficiente para predições aproximadas, entre 3 e 5 satisfatória para predição e maior que 5 geram modelos para aplicação em análise de controle de qualidade de amostras.

Estopa (2017), Hein, Lima e Chaix (2009) e Viana et al. (2010) obtiveram valores semelhantes para a determinação da densidade básica de *Eucalyptus* pelo NIR. Gouvêa et

al. (2011) estudaram a densidade básica do eucalipto por meio de vários métodos não-destrutivos e obtiveram, para o NIR, R^2_c igual a 0,84, com dez fatores PLS e RPD variando entre 1,9 e 2,7. Inagaki et al. (2010) encontraram R^2_{cv} de 0,90 e RPD acima de três na determinação da densidade básica de *E. camaldulensis* de cinco anos de idade.

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 em laboratório para determinação da densidade básica em *E. grandis*, encontraram valores próximos ao valor médio predito de densidade básica (0,450 g/cm³). 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 e lignina 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 observado na Figura 31). Além disso, as condições do clima e a localização geográfica onde árvores se encontram também podem influenciar a densidade do lenho.

Oliveira et al. (2010) verificaram que houve aumento significativo da densidade básica de árvores cultivadas em região que ocorre precipitação reduzida 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 na condição de baixa disponibilidade hídrica. Árvores em situação de déficit hídrico apresentam um crescimento mais lento em relação à condição irrigada (LEGOAS, 2015), sendo que essa situação faz com que haja um espessamento da parede celular, refletindo nos maiores valores de densidade, conforme discutido no item 5.1.1.

A Figura 32 mostra a distribuição dos dados de todos os tratamentos, indicando que não houve a presença de grupos, ou seja, os dados distribuíram-se igualmente, atingindo toda a heterogeneidade das amostras. Além disso, a diferença de angulação entre a linha diagonal e a linha de tendência foi pequena, o que significa que a tendência de superestimação e subestimação dos dados foi baixa.

Figura 32. Relação entre valores de densidade básica (db – g/cm³) predita pelo NIR e valores referência para todos os tratamentos (em validação cruzada). A linha contínua mostra a tendência dos dados e a linha tracejada representa a relação ideal entre os dados (linha diagonal)

5.1.3 Cartografia da densidade aparente do lenho

A Figura 33 mostra o modelo 2D de variação da densidade aparente ao longo do tronco, realizado pela krigagem dos dados radiais das diferentes alturas (base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total) obtidos no equipamento de densitometria de raios X, para cada um dos tratamentos estudados.

A amplitude de variação radial da densidade aparente média é de 0,539 a 0,567 g/cm³ para os seis tratamentos. O padrão de variação da densidade aparente das árvores de *E.grandis* é menos consistente na direção longitudinal em relação ao radial observado no item 5.1.1; a Figura 30 permite a constatação da presença de menores valores de densidade na região próxima à medula (mais pronunciada no tratamento Na/+A) e maiores mais próximas da casca (mais acentuada no tratamento C/-A) em todos os tratamentos. Resultado semelhante é descrita por Ferreira (2013) e Franco (2014) para árvores do gênero *Eucalyptus*.

Na direção longitudinal, é possível verificar que a variação da densidade aparente foi maior nas árvores controle, seguida pelas árvores fertilizadas com K e Na. Além disso, a

densidade varia de forma mais pronunciada nas regiões correspondentes à base, DAP e 25% da altura total nos seis tratamentos. Nas posições 50, 75 e 100% essa variação também é observada, porém, de forma menos pronunciada. É possível observar ainda que, independente do tratamento, há um padrão de variação da densidade, a qual decresce até certo ponto e cresce daí até o topo da árvore, assim como observado por Franco (2014). Este padrão de variação da densidade na direção base-topo e medula-casca é descrito com detalhes por Panshin e Zeeuw (1970). Barrichelo, Brito e Migliorini (1983) afirmam ser este modelo o mais comum para árvores do gênero *Eucalyptus*. Hein (2011) obteve um modelo semelhante de variação da densidade estimada pelo NIR para *E. urophylla*, onde há decréscimo/estabilização da base-25%, seguido por um aumento na posição 25-75% e com decréscimo/estabilização na posição 75-100%.

As diferentes propriedades da madeira sempre estão inter-relacionadas. Por isso, este modelo é um reflexo das características anatômicas das árvores estudadas. Leite (2013) constatou a diminuição dos valores de vasos e fibras na direção base-topo da madeira de três espécies de eucalipto. Este resultado pode ser observado devido, principalmente, à maior proporção de tecido juvenil no topo, o que por sua vez reflete nos valores de densidade. Alzate, Tomazello Filho e Piedade (2005), Sette Junior (2010) e Sette Junior et al. (2012) explicam que as maiores densidades encontradas na base ocorrem devido às alterações do meristema do câmbio 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 diretamente relacionada com a sustentação do tronco, galhos e copa.

Esta variação da densidade aparente também está relacionada com as propriedades químicas da madeira. Arantes et al. (2011) explicam que os valores de densidade de *E. grandis* e *E. urophylla* com seis anos de idade são maiores conforme há aumento do teor de extrativos e lignina totais ao longo do tronco. Costa et al. (2017) observaram maiores teores de extrativos na região do cerne para dois clones de *E. camaldulensis* com 7,5 anos de idade. O aumento do teor de extrativos está diretamente relacionado com o processo de cernificação e aumento da idade das árvores.

A cartografia gerada permitiu visualizar como as propriedades da madeira respondem à fertilização, mas principalmente, ao fator disponibilidade de água; é possível afirmar que a exclusão parcial da chuva fez com que as árvores produzam um lenho menos homogêneo, ou seja, a variação de densidade aparente dentro da árvore é maior. Neste sentido, deve-se considerar que esta característica pode influenciar o uso final da madeira. Árvores menos homogêneas não são interessantes para a produção de papel, uma vez que pode haver aumento do uso de reagentes para retirar lignina e extrativos da polpa

celulósica. Por outro lado, árvores com maiores teores de lignina e extrativos apresentam, normalmente, maior poder calorífico, o que pode ser interessante para produção de carvão.

Figura 33. Modelo 2D de variação da densidade aparente ao longo do tronco, realizado pela krigagem dos dados radiais das diferentes alturas (base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura total) obtidos no equipamento de densitometria de raios X, para cada um dos tratamentos estudados

5.2 Características anatômicas do lenho das árvores de eucalipto

5.2.1 Dimensões das fibras

Os valores obtidos para as dimensões das fibras do lenho no DAP do tronco das árvores de eucalipto, com 60 meses, segundo os tratamentos, são apresentados na Tabela 8.

As maiores fibras foram encontradas no lenho das árvores fertilizadas com potássio, sem exclusão de chuva (K/+A) assumindo valor médio igual a 901,2 μm , sendo este tratamento estatisticamente diferente do tratamento controle com e sem exclusão de chuvas (900,1 e 854,3 μm , respectivamente) e estatisticamente igual ao tratamento Na, com valor igual a 883,7 e 827,8 μm , sem e com exclusão parcial da chuva respectivamente. Quanto à largura, os tratamentos com K e Na (+A e -A) foram estatisticamente iguais, sendo diferentes do controle. Da mesma forma, para a espessura da parede, o potássio e o sódio foram estatisticamente iguais na condição de exclusão parcial das chuvas, sendo estes diferentes do controle (+A e -A), o qual assumiu valores iguais a 3,5 e 3,3 μm , respectivamente. Já o diâmetro do lume das fibras do lenho assumiu o maior valor nas árvores fertilizadas com Na, em situação de exclusão parcial da chuva (15,1 μm).

Deve-se destacar que os maiores valores médios de largura da fibra e diâmetro do lume obtidos foram observados nas fibras do lenho das árvores que receberam a aplicação de Na, assim como descrito por Franco (2014). Diante do exposto, pode-se dizer que a aplicação de K e Na nas árvores induziu a formação de parede secundária com menores dimensões.

Tabela 8. Valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume (μm) das fibras do lenho das árvores de eucalipto, com 60 meses, por tratamento de fertilização

Tratamento	Comprimento	Largura	Espessura da parede	Diâmetro do lume
			μm	
C/+A	900,1 a (195,2)	21,2 a (3,9)	3,5 a (0,8)	14,7 a (4,4)
Na/+A	883,7 b (166,3)	20,4 b (3,9)	3,2 b (0,7)	14,1 b (3,3)
K/+A	901,2 b (193,9)	20,8 b (4,7)	3,5 a (0,9)	13,8 b (4,6)
C/-A	854,3 ab (177,0)	20,9 a (4,0)	3,3 a (0,7)	14,3 a (3,3)
Na/-A	827,8 b (198,8)	21,4 b (3,9)	3,2 b (0,5)	15,1 b (3,6)
K/-A	839,7 b (194,3)	19,9 b (3,6)	3,1 b (0,5)	13,7 c (3,1)

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

MacDonald e Hubert (2002) afirmam que, em geral, a dimensão e a qualidade das fibras são afetadas pelas práticas silviculturais e pela qualidade do sítio. Albino, Mori e Mendes (2012) relataram 1000 μm como valor médio de comprimento das fibras de *E.*

grandis com 18 anos. Trugilho et al. (2005), em estudo com clones do gênero *Eucalyptus* com quase seis anos, verificaram valor médio de comprimento das fibras igual a 926 μm . Sette Junior (2010), em estudo sobre o efeito da fertilização com K e Na no comprimento das fibras de *E. grandis* com quatro anos, obteve valores médios iguais a 886,8, 840,2 μm , respectivamente, sendo que as árvores do tratamento controle apresentaram valor médio igual a 870,9 μm . Sette Junior et al. (2014) detectaram efeito dos fertilizantes na dimensão das fibras no lenho de árvores de eucalipto. Em estudo semelhante, Franco (2014) obteve fibras mais longas no lenho das árvores de eucalipto de oito anos fertilizadas com K. Legoas (2015) em trabalho na mesma área experimental que o presente estudo, apresentou como valor médio de comprimento de fibra igual a 904,9 μm para as árvores fertilizadas com K e Na com quatro anos.

Tomazello Filho (2006) mostra que a variação de idade das árvores influencia os resultados obtidos, onde a presença de lenho juvenil, de transição ou adulto refletem nas dimensões das fibras. No presente estudo, as árvores controle tiveram o maior valor médio de espessura da parede; esta característica está de acordo com o valor de densidade aparente média encontrado (0,570 g/cm^3), sendo também o maior valor entre os tratamentos, assim como observado por Sette Junior (2010) e Franco (2014) em estudo sobre a influencia da fertilização com K e Na nas propriedades da madeira.

Com relação a largura das fibras e espessura da parede, Albino, Mori e Mendes (2012) observaram como largura e espessura da parede média das fibras de *E. grandis* de 18 anos valores iguais a 16,1 e 4,4 μm , respectivamente, ou seja, os valores encontrados são menores do que os encontrados no presente estudo. Legoas (2015) observou maiores valores de espessura de parede nas árvores controle com e sem exclusão parcial de chuvas e sugeriu que esses maiores valores podem ter uma relação direta com os altos valores de densidade encontradas nessas árvores e à um possível aumento do acúmulo de extrativos na parede celular, conforme sugeridos por diversos autores (HILLIS, 1962; HILLIS; BROWN, 1984). O autor observou ainda que, ao contrário das árvores controle, no lenho das árvores de eucalipto fertilizadas com Na as fibras tem, significativamente, menor espessura da parede em relação ao controle e ao K.

Os valores de diâmetro do lume foram, em geral, inferiores, aos relatados pela literatura, sendo que Trugilho et al. (2005) relatam valores que variam de 9,4 a 13,3 μm para árvores de *Eucalyptus*. Alzate (2004), em estudo com várias espécies de eucalipto, explica que a largura das fibras está inversamente relacionada com a densidade, assim como o diâmetro do lume está inversamente relacionado com a densidade a qual, por sua vez, está diretamente relacionada com a espessura da parede das fibras. Assim, quanto maior a quantidade de espaços vazios, menor será a densidade da madeira. Panshin e De Zeeuw

(1970) acrescentam que a idade cambial e a influência de fatores externos como a disponibilidade hídrica, provocam estas diferenças observadas nos resultados.

Quanto aos altos valores de desvio padrão encontrados para a o comprimento das fibras, Sette Junior (2010) explica que isto se deve, principalmente, aos efeitos aleatórios do resíduo, os quais são as principais fontes de variabilidade e representam entre 35,2 e 55,6% da variação total. Assim como descrito por Lousada (1999) e Sette Junior (2010), tais efeitos aleatórios que causam estas variações podem acontecer devido aos 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 ou do ritmo de crescimento das árvores.

Legoas (2015) verificou que a condição de exclusão parcial de chuvas não afeta significativamente as dimensões das fibras nas posições radiais 50 e 100%. No entanto, considerando o efeito da fertilização com K e Na no lenho a 50% do raio, destaca-se o efeito do Na na formação de fibras mais longas, largas, de maior lume e menos espessas, em relação aos tratamentos K e controle. Trabalhos que expliquem o efeito da redução da disponibilidade hídrica na dimensão das fibras do lenho são quase inexistentes. Deve-se citar as avaliações de Castro (2014) o qual mostra que, em geral, a menor disponibilidade hídrica não afeta a dimensão das fibras, corroborando com os resultados de Legoas (2015).

Sob o ponto de vista fisiológico da planta, Larson (1967) e Zobel e Van Buijtenem (1989) explicam que os parâmetros de fibra analisados mas, principalmente a espessura da parede das fibras, são variáveis que estão envolvidas nos processos de formação do lenho; as dimensões das fibras podem depender 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 da ultraestrutura da parede. Diante disso, maiores pressões de turgescência e concentração de auxinas induzem à formação de células de maiores dimensões na fase inicial de divisão celular do câmbio. Com isso, entende-se que a aplicação de fertilizantes influencia os resultados obtidos para as fibras, uma vez que a pressão de turgescência e a auxina podem ser alteradas. O K e o Na influenciam na maior ou menor pressão de turgescência e na formação de maior área foliar da copa das árvores, ou seja, área de elevada concentração de auxinas (ZOBEL; VAN BUIJTENEM, 1989).

Como consequência das árvores sintetizarem maiores quantidades de açúcares pela fotossíntese, cita-se um aumento da biosíntese de moléculas de celulose, as quais serão incorporadas como microfibrilas na parede secundária, aumentando a espessura da mesma (ZOBEL; VAN BUIJTENEM, 1989). Além disso, segundo Almeida (2009), diferenças no padrão de transpiração, que podem ocorrer devido aos tratamentos estão relacionadas,

sobretudo, às variações do controle estomático, à extensão do sistema radicular e à superfície foliar.

Contudo, é importante destacar que, mesmo com todos os resultados citados anteriormente, o efeito da fertilização nas características das fibras do lenho de árvores de eucalipto não tem mostrado um resultado unânime entre os autores, havendo aqueles que verificaram a existência de diferenças estatísticas nas dimensões das fibras do lenho de árvores fertilizadas e outros que dizem não terem verificado alguma influência significativa (CASTRO, 2014; FRANCO, 2014; LEGOAS, 2015).

A variação das dimensões das fibras nas três posições radiais estudadas (0, 50 e 100%) no DAP do tronco das árvores de *E. grandis* aos 60 meses é mostrada na Figura 34.

O comprimento das fibras (Figura 34A) apresenta uma tendência de aumento na direção radial, uma vez que os menores valores são observados na medula e os maiores valores observados na região mais próxima da casca. O tratamento K/-A assume o menor valor (679,4 μm) na posição 0% do raio e o tratamento C/-A o maior (777,2 μm) e são estatisticamente diferentes. O tratamento C/+A e K/+A assumem os maiores valores na posição 100% do raio, sendo 1076,3 e 1077,9 μm , respectivamente. Ainda na posição correspondente à 100% do raio, os tratamentos C/+A e K/+A são estatisticamente iguais e diferentes dos outros tratamentos.

A largura das fibras (Figura 34B) apresenta valores semelhantes entre os tratamentos na posição 0% (valores variam de 18,4 a 19,9 μm). A largura das fibras dos tratamentos K/+A, K/-A e C/+A na posição 50% assume valores ligeiramente maiores em relação à posição 100% do raio e são estatisticamente iguais entre si (em 50% do raio) e diferentes dos demais tratamentos. Na posição 100% do raio, C/-A e Na/-A são estatisticamente iguais e diferentes do restante.

O diâmetro do lume das fibras (Figura 34C), para todos os tratamentos, apresentou uma tendência de aumento na posição 50% do raio, seguido por uma queda nos tratamentos K/+A, K/-A e C/+A na posição 100% do raio (C/+A e K/+A estatisticamente iguais). Nas posições 50% do raio, o tratamento C/+A assumiu o maior valor (17,5 μm). Já na posição 100% do raio, os maiores valores aparecem nos tratamentos Na/-A, C/-A e Na/+A (16,6, 15,7 e 15,1 μm , nesta ordem).

Com relação à espessura da parede das fibras (Figura 34D) não houve diferença estatística entre os tratamentos na posição 0% do raio e verifica-se, apesar de existir algumas oscilações, uma tendência crescente na direção medula-casca para os seis tratamentos. Na região da medula todos os tratamentos assumem valores muito próximos, assim como na posição 50%, com exceção do tratamento C/-A que assume um valor menor (2,8 μm) na posição intermediária. Por fim, na posição mais próxima da casca as árvores

C/+A é estatisticamente diferente e assume o maior valor médio de espessura da parede (4,2 μm), seguido pelo K/+A (4,1 μm) e C/+A (3,9 μm).

Figura 34. (A) variação radial do comprimento, (B) largura, (C) diâmetro do lume e (D) espessura da parede (μm) das fibras do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 60 meses, nos seis tratamentos

Os trabalhos que tratam 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), Jorge (1994), Trugilho et al. (2005), Sette Junior (2007, 2010), Sette Junior et al. (2009), Albino, Mori e Mendes (2012), Castro (2014), Franco (2014) e Legoas (2015) que demonstram que há aumento do comprimento das fibras, na direção medula-casca. Sette Junior et al. (2009) relatam uma variação de 841-1059 μm em árvores de *E. grandis* com três anos. Já Legoas (2015) destaca que o comprimento das fibras de eucalipto com quatro anos fertilizadas com K e Na variaram, entre as posições 50 e 100% do raio, entre 831-1065 μm . Tomazello Filho (1987) explica que o comprimento da fibra aumenta com a idade da árvore e só estabiliza quando as células cambiais atingem o máximo comprimento, momento em que se inicia a formação do lenho adulto. Franco (2014) relata esse mesmo comportamento radial para fibras de *E. grandis* com oito anos.

Quanto à espessura da parede das fibras, Rocha et al. (2002), Alzate (2004), Sette Junior et al. (2009) e Sette Junior (2010) citam tanto o aumento quanto a redução dos valores na direção medula-casca. Legoas (2015) verificou que a variação da espessura da parede do lenho de eucalipto com quatro anos foi de 3,4 a 3,7 μm nas posições 50 e 100% do raio, respectivamente. Sette Junior et al. (2014) observaram valores semelhantes. Silva et al. (2007) observaram correlação positiva entre a espessura da parede e o aumento da idade das árvores.

Em relação ao diâmetro do lume e largura da fibra, de forma geral, resultados semelhantes foram observados por Rocha et al. (2002), Sette Junior et al. (2009), Sette Junior (2010) e Franco (2014).

5.2.2 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 60 meses, para os tratamentos estudados, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. 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 60 meses, por tratamento

Tratamento	Diâmetro tangencial	% de área	Frequência
	μm	%	$\text{n}^\circ/\text{mm}^2$
C/+A	96,6 a (12,8)	14,5 a (1,3)	17,2 a (2,3)
Na/+A	103,5 a (13,8)	14,7 a (1,8)	14,2 b (2,2)
K/+A	111,7 b (11,7)	14,7 a (2,2)	11,7 c (2,1)
C/-A	95,3 a (12,8)	13,3 b (1,2)	16,8 a (2,0)
Na/-A	101,4 a (14,1)	13,8 a (1,4)	13,5 b (1,5)
K/-A	110,6 b (13,8)	13,3 b (2,2)	11,8 b (1,7)

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

O diâmetro dos vasos foi estatisticamente maior no lenho das árvores fertilizadas com K sem (K/+A 111,7 μm) e com (K/-A 110,6 μm) condição de exclusão parcial de chuvas em relação aos outros tratamentos. O tratamento C/-A assume o menor valor médio de diâmetro tangencial de vasos (95,3 μm). Com relação à porcentagem de área ocupada pelos vasos, observou-se diferença estatística nos tratamentos C/-A e K/-A, porém observa-se uma pequena variação (de 13,3 a 14,7%) entre todos os tratamentos avaliados. A frequência de vasos assume maiores valores (17,2 e 16,8 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) nas árvores controle sem e com condição de exclusão parcial de chuvas, seguido das árvores fertilizadas com Na (14,2 e 13,5 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) e K (11,7 e 11,8 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$). Esses resultados deixam claro a relação

inversa entre a frequência e o diâmetro dos vasos. Legoas (2015) observou comportamento semelhante para as árvores da mesma área experimental, porém com quatro anos.

Sette Junior (2010) e Franco (2014) encontraram valores médios muito semelhantes para diâmetro tangencial (μm), % de área ocupada e frequência ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) dos vasos no lenho das árvores de *E. grandis* com 48 e 101 meses, respectivamente. Destaca-se que, nestes trabalhos, as árvores fertilizadas com K sempre apresentaram valor médio de diâmetro tangencial (μm) maior, em relação ao tratamento Na e controle.

Silva et al. (2007) e Albino, Mori e Mendes (2012) relatam valores superiores, para os três parâmetros de vasos, em árvores de eucalipto com idade entre 10 e 25 anos. Entretanto, Castro (2014), Sette Junior et al. (2014), Freitas et al. (2015) e Legoas (2015), em análise dos parâmetros de vaso de árvores na mesma área experimental que o presente estudo, observaram, em geral, valores menores. Isso se deve muito provavelmente ao fato das árvores serem mais jovens nestes estudos.

Com relação à condição de aplicação de fertilizantes nas árvores, Bamber, Horne e Graham-Higgs (1982) observaram que árvores de *E. grandis* de dois anos e meio apresentaram maiores diâmetros e menor frequência de vasos devido a aplicação de fertilizantes. Drew et al. (2009) e Lima et al. (2010) mostraram que árvores fertilizadas e com rápido crescimento apresentam poucos vasos e de grande diâmetro, em relação às árvores de baixo crescimento. Sette Junior et al. (2009) obtiveram resultados semelhantes para árvores de *E. grandis* de 24 meses fertilizadas com K e Na. Contudo, Tomazello Filho (2006) relata que não observou diferenças significativas nas variáveis relacionadas aos vasos em árvores de *E. grandis x urophylla* as quais receberam tratamentos de fertilização e irrigação.

Em geral, em relação à condição de exclusão parcial de chuvas, a literatura diz que no lenho de árvores de espécies de eucalipto, a limitação da água no solo acarreta na diminuição do diâmetro tangencial e aumento da frequência dos vasos (EWERS, 1985; BAAS; SCHWEINGRUBER 1987; ZHANG; DENG; BAAS, 1988; FEBRUARY, 1993; FEBRUARY et al., 1995; SEARSON et al., 2004). Os autores relatam que as árvores em condição de seca apresentaram duas estratégias principais para melhorar a eficiência do transporte da água, sendo (i) o aumento da área correspondente ao alburno e (ii) alteração das estruturas anatômicas dos elementos de vaso.

Baas (1976), Alves e Angyalossy-Alfonso (2000), Schuldt et al. (2011) e D'Orangeville et al. (2013) relatam que os vasos menores, mais agrupados e numerosos são formados no lenho das árvores sob condição de seca e que, a redução da precipitação pode acarretar em comprometimento da condutividade hídrica do lenho ou acarretar o embolismo.

Portanto, entende-se que, o aumento da frequência dos vasos e a diminuição do diâmetro tangencial dos mesmos, constitui-se em adaptação da planta em resposta ao déficit hídrico para compensar a perda da capacidade de transporte de água (SEARSON et

al., 2004). February et al. (1995) destacam que árvores de *E. grandis* apresentam rápidas respostas frente às condições climáticas adversas resultando em significativa redução do crescimento em regiões áridas e que, neste caso, a disponibilidade hídrica é um dos fatores mais importantes e que altera a estrutura anatômica do lenho, demonstrando a alta plasticidade da espécie.

O aumento do diâmetro tangencial dos vasos, sob o ponto de vista fisiológico, resulta em aumento significativo da condutividade hidráulica (ZIMMERMANN, 1983). Battie-Laclau (2013), na mesma área experimental que o presente estudo, observou que independente do regime hídrico, a fertilização com K induziu o dobro do valor do fluxo de seiva, em relação às árvores controle, resultando em uma maior eficiência hidráulica e maior consumo de água pelas árvores. Desta forma, pode-se entender que o lenho das árvores de eucalipto fertilizados com K e Na possui vasos de maior diâmetro tangencial, propiciando maior transporte ascendente de seiva mineral, significando em maior atividade fotossintética e produção de biomassa (LEGOAS, 2015). Além disso, o autor propôs o estudo da correlação dos parâmetros de vaso com a taxa de crescimento do DAP; observou-se que a correlação é forte e positiva do DAP com o diâmetro tangencial dos vasos e negativa do DAP com a frequência dos vasos, reforçando a hipótese sobre a mudança dos vasos como adaptação para atingir maior condutividade hidráulica do lenho das árvores e, assim, a alta taxa de crescimento.

A variação anual (de 2011 a maio de 2015) do diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho do tronco no DAP das árvores de eucalipto, aos 60 meses, nos seis tratamentos é mostrada na Figura 35.

A análise da arquitetura dos vasos por anel de crescimento permitiu identificar um padrão temporal da atividade cambial nas árvores de *E. grandis*. No ano de 2011, correspondente ao primeiro anel de crescimento, observa-se grande quantidade de vasos, de menor diâmetro tangencial. Ao longo dos anéis, essa condição se inverte em todos os tratamentos, ou seja, o diâmetro tangencial dos vasos aumenta e a frequência diminui, porém com menor ou maior intensidade dependendo dos tratamentos. O tecido formado no primeiro ano é homogêneo e de difícil distinção. Portanto, o equipamento de raios x digital foi essencial para demarcação, principalmente, do primeiro anel de crescimento.

Figura 35. Variação anual (A) do diâmetro tangencial (μm), (B) % de área ocupada e (C) frequência dos vasos ($\text{n}^\circ/\text{mm}^2$) do lenho no DAP das árvores de eucalipto, aos 60 meses, nos seis tratamentos. Os anos de 2011 a 2015 correspondem ao anel 1 a 5, nesta ordem

O diâmetro tangencial dos vasos (Figura 35A) mostra um leve aumento dos valores da medula para casca, ao longo dos anos, com destaque para os maiores e crescentes valores assumidos pelos tratamentos K/+A e K/-A (estatisticamente diferentes dos demais nos anéis 4 e 5). Por outro lado, os menores valores são observados no tratamento C/-A, sendo que o tratamento Na/+A e Na/-A assume valores intermediários, com queda acentuada no anel correspondente ao ano 2014 (103,3 μm), assim como acontece para C/+A (102,4 μm) e C/-A (101,4 μm).

A porcentagem de área ocupada pelos vasos (Figura 35B) apresentou uma tendência de aumento dos valores ao longo do tempo, com valores muito próximos entre os tratamentos. Os menores valores foram, em geral, assumidos pelos tratamentos com exclusão parcial de chuvas, com destaque para o tratamento C/-A (estatisticamente diferente dos demais no anel 3) nos três últimos anos, com valores variando de 12,9 a 15,2 μm .

A frequência dos vasos (Figura 35C) assume maiores valores no ano 1 (2011) e decresce ao longo do tempo, assumindo os menores valores no último ano analisado (2015). Todos os tratamentos no ano 1 são estatisticamente diferentes em relação aos anos seguintes. A queda dos valores é acentuada no ano 2 e suaviza nos anos seguintes. Os tratamentos C/+A e C/-A assumem os maiores valores, seguido pelos tratamentos Na/+A e Na/-A (11,7 e 10,9 vasos/ mm^2 , no ano 2015).

O padrão de variação radial e anual descrito é muito semelhante ao encontrado por 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), Albino, Mori e Mendes (2012), Franco (2014) e Carrillo et al. (2015). Franco (2014) verificou a variação dos parâmetros de vasos para árvores de *E. grandis* com 24, 48, 72 e 101 meses. Os resultados mostram aumento significativo do diâmetro tangencial (variação de 72,5 a 113,1 μm) e da porcentagem de área ocupada (variação de 11,01 a 14,27%) ao longo das idades estudadas, e ao mesmo tempo, diminuição da frequência ao longo do tempo (variação de 19,2 a 12,0 vasos/ mm^2). Castro (2014), Sette Junior et al. (2014) e Legoas (2015) reportaram a mesma tendência, ou seja, a fertilização com K e Na reduziu a frequência e aumentou o diâmetro dos vasos ao longo do raio.

Além disso, em todos estes trabalhos observa-se que a aplicação de K provoca um mecanismo de adaptação, promovendo mudanças significativas nos vasos, os quais apresentam maior condutividade hidráulica que por sua vez reflete nas altas taxas de crescimento dessas árvores (BATTIE-LACLAU, 2013; SETTE JUNIOR et al., 2014; LEGOAS, 2015).

Castro (2014) em estudo na mesma área experimental explica que a redução parcial de chuvas influenciou as características dos vasos no lenho somente após o segundo ano de idade. Além disso, a formação de vasos de menor diâmetro tangencial no lenho das árvores sob condição de redução parcial de chuvas é ressaltada também a partir do segundo ano, devido à menor quantidade de água no solo. Esta condição também foi observada por Schuldt et al. (2011) e Fonti et al. (2013).

5.2.3 Largura dos anéis de crescimento

Sabendo-se que no ano de 2014 a precipitação acumulada foi de 1181 mm, muito menor em relação aos anos de 2011, 2012 e 2013 (1470, 1452 e 1240 mm, respectivamente), especial atenção foi dada para os dados obtidos para o período. Apesar de não se observar grandes diferenças entre o ano de 2014 e os demais, em geral, os dados de frequência dos vasos são ligeiramente menores que o ano anterior e os valores de diâmetro tangencial e porcentagem de área são ligeiramente maiores que o ano anterior.

Estes parâmetros observados acima podem sugerir uma dificuldade das árvores em lidar com a condição de seca. Contudo, outros parâmetros de regulação da planta devem ser levados em consideração; investimento no crescimento das raízes em busca de água disponível (CHRISTINA et al., 2017), ajustes osmóticos nas folhas (CHRISTINA et al., 2014b), mudanças na atividade fisiológica de células parenquimáticas do xilema (DYE, 1996; REIS et al., 2006; SHAO et al., 2008; SECCHI; PAGLIARANI; ZWIENIECKI, 2017) podem estar envolvidos com a capacidade da árvore em manter o transporte de seiva e evitar problemas como o embolismo. Condição semelhante foi observado por Corcuera et al. (2006), Arend e Fromm (2007), Camarero, Sangüesa-Barreda e Vergarechea (2016) e Grossiord et al. (2017).

As variáveis associadas aos anéis de crescimento, como a largura do anel ou a densidade máxima de madeira, demonstraram estar fortemente influenciadas pelas condições ambientais, especialmente quando a temperatura ou precipitação limita o crescimento da árvore. Eles desempenham, portanto, um papel importante no estudo e na reconstrução das alterações climáticas (FONTI et al., 2010). Desta forma, a variabilidade anatômica do lenho ao longo de anéis de crescimento pode ser usada para elucidar como as árvores estão respondendo às condições climáticas do ambiente. Os valores médios da largura de anel anual de crescimento para cada tratamento podem ser observados na Figura 36.

Figura 36. Valores médios das larguras dos anéis de crescimento para cada tratamento, sendo 1 referente ao anel de crescimento formado no ano de 2011 e 5 referente ao ano de 2015, o ano de coleta das amostras

Observa-se que o primeiro anel de crescimento assume sempre os maiores valores em todos os tratamentos, com exceção do tratamento C/+A. Os dados de largura dos anéis de crescimento no sentido medula-casca das espécies mostram, em geral, uma redução gradativa dos valores de largura. Este modelo indica que o aporte hídrico, altas temperaturas, disponibilidade de nutrientes e luz e espaçamento nos meses iniciais do período de crescimento são algumas das condições favoráveis que refletem no rápido incremento inicial em diâmetro dos tratamentos (MARIA, 2002). Por outro lado, com o passar do tempo a redução na largura do anel decorre, provavelmente, devido ao aumento da competição entre as árvores e maior influência dos tratamentos (principalmente no caso do C/+A e C/-A).

Legoas (2015) observou maiores incrementos iniciais em diâmetro no tronco nas árvores correspondentes ao tratamento Na/+A, corroborando com os dados de largura do anel. Outro fator a ser destacado é a uniformidade da largura dos anéis de crescimento observados no tratamento C/+A. Isso pode indicar que árvores em condição de baixa disponibilidade de nutrientes, porém com disponibilidade de água satisfatória, podem manter maior homogeneidade no decorrer do crescimento.

Destaca-se que, no ano de 2014, observaram-se os menores valores de largura do anel de crescimento, principalmente nos tratamentos Na/+A, C/-A e K/-A, assumindo valores iguais a 3, 4,18 e 2,60 mm, respectivamente. Legoas (2015) observou que o incremento do DAP do tronco das árvores na mesma área experimental foi estreitamente relacionado à variação da precipitação e da temperatura mínima. O coeficiente de correlação positivo e altamente significativo ($p < 0,01$) assumiu maiores valores nos tratamentos K/+A e K/-A entre

as variáveis incremento corrente do diâmetro do tronco e a precipitação. Epron et al. (2012) e Christina et al. (2015) explicam que o efeito positivo do K na eficiência de transpiração durante o segundo ano de crescimento é resultado do aumento de alocação da biomassa na madeira de *Eucalyptus*. Estes resultados sugerem que a baixa precipitação acumulada no ano de 2014 pode ter influenciado no crescimento das árvores e, consequentemente refletiu nos menores valores de largura dos anéis em relação aos anos anteriores.

Muitos estudos dendroclimáticos (FRITTS, 1976; SCHWEINGRUBER, 1988; FRITTS; SWETNAM, 1989) mostraram que os anos secos são marcados por anéis estreitos. Woodward (1993) cita que a largura do anel de crescimento variou com o nível de déficit hídrico no solo.

Sette Junior (2010) cita que a precipitação explica mais de 50% da variação total do incremento em diâmetro do tronco de *E. grandis*. Franco (2014) também observou resultados positivos entre a precipitação e o incremento em diâmetro do tronco de *E. grandis* em série temporal de 2006 a 2012. Brien e Zuidema (2005) e Lobão (2011) estudaram a relação da precipitação e a largura dos anéis de crescimento de espécies tropicais e verificaram que o crescimento de *Cedrela odorata* é influenciado de forma positiva pelas chuvas do período de transição (maio e junho) da estação chuvosa para a seca. Andreacci, Botosso e Galvão (2014) analisaram a correlação entre precipitação e largura dos anéis de crescimento de *Cedrela fissilis* e verificaram que a diferença de disponibilidade de água durante os anos explica parte da variação do crescimento anual encontrado na espécie, sendo que outros fatores ambientais como espaçamento, disponibilidade de nutrientes e luz devem ser levados em consideração.

5.3 Aquisição da imagem HI-NIR

5.3.1. Predição direta do teor de extrativos totais das “amostras finais”

Os valores médios, mínimos, máximos preditos do teor de extrativos totais e os desvios-padrões das “amostras finais”, segundo os tratamentos, é apresentada na Tabela 10.

Em geral, as árvores sob condições de déficit hídrico apresentaram maiores valores. O tratamento Na/-A apresentou o maior valor médio predito de extrativos, seguido pelo tratamento K/-A. de forma oposta, o tratamento K/+A apresentou o menor valor médio predito (3,90%). Estes resultados permitem inferir que quando há redução da precipitação, os valores de extrativos são maiores e mais heterogêneos, conforme pode ser observado nos valores de desvio-padrão. Muito provavelmente, sob a condição de exclusão parcial de chuvas, as árvores produziram uma maior quantidade de metabólitos secundários que

contribuíram para as plantas suportarem a condição de pouca disponibilidade hídrica do ambiente.

Tabela 10. Valores médios, mínimos e máximos preditos (%) e desvio-padrão (%) dos teores de extrativos totais das “*amostras finais*” para cada tratamento

Tratamento	Valor predito do teor total de extrativos (%)			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-padrão
C/+A	4,13	1,45	10,01	1,21
Na/+A	3,95	1,73	9,41	0,95
K/+A	3,90	1,74	11,15	1,06
C/-A	4,39	1,26	11,95	1,59
Na/-A	5,01	2,15	15,22	2,49
K/-A	4,98	2,42	13,98	1,54

Não foram encontrados trabalhos que tratam da predição do teor de extrativos totais de *Eucalyptus* por meio da aquisição da imagem HI-NIR. Porém alguns autores trabalharam com a técnica para predição de propriedades químicas de outras espécies.

Lestander et al. (2012) neste tipo de estudo, porém com duas espécies de coníferas, descrevem que ao usar a imagem PCA era possível ver diferenças entre os tipos de madeira, contudo a diferença entre madeira juvenil e madura não era detectável. Os comprimentos de onda responsáveis pela separação foram, principalmente, de diferentes tipos de ligação à água. Os autores encontraram, ainda no resultado da PCA, alto conteúdo de extrativos (12,8% da superfície da madeira) em regiões de nó. Os *loadings* obtidos pela PCA mostraram claramente que extrativos com diferentes tipos de ligação C-H e C=O foram os responsáveis pela separação dos grupos observados na PCA. Os coeficientes de regressão para o modelo PLS gerado pelos autores mostraram que principalmente as ligações C-H no material estavam relacionadas ao alto teor de extrativos. O modelo PLS de imagem poderia ser usado para construir uma previsão para cada pixel, resultando em uma imagem de predição mostrando claramente onde se localizavam as partes de alto conteúdo de extrativos.

Colares et al. (2016) mostraram o mapeamento da concentração de extrativos e lignina para árvores de *Swietenia macrophylla*; as maiores concentrações foram verificadas nas linhas vasculares, enquanto que as menores foram nos raios. Os extrativos variaram de 1-16% de acordo com o plano de orientação.

Baca-Bocanegra et al. (2018) propõem a avaliação com imagem HI-NIR de polifenóis extraíveis liberados pelo vinho. Os autores obtiveram como resultado da validação independente do modelo desenvolvido, R^2 igual a 0,84 e SEP igual a 6,31 e concluíram que a imagem HI-NIR tem bom potencial para uma triagem rápida de conteúdo fenólico total extraível.

Levando-se em consideração os resultados de predição de extrativos por espectroscopia NIR e ainda, considerando que o valor médio de referência obtido em laboratório para as amostras da coleção em pó foi igual a 6,53% de extrativos totais, procedeu-se a comparação com outros trabalhos apenas a título de comparação com os resultados de predição da Tabela 10. Magalhães et al. (2003) em estudo da determinação de extrativos totais por meio do NIR de sete espécies de eucalipto, obtiveram 5% como valor médio de predição em 46 amostras analisadas.

Santos, Gomide e Sousa (2009), em trabalho de predição do teor de extrativos totais de amostras de clones de *Eucalyptus* provenientes do sul da Bahia, verificaram que os modelos multivariados para extrativos solúveis em álcool/tolueno mostraram resultados plenamente satisfatórios, com elevada correlação (92%), RMSEP de 0,20% e viés de -0,01 para 21 amostras analisadas. Os autores destacam ainda que, na validação independente realizada para o teor de extrativos, o RMSEP foi de 0,65% e o R^2 próximo de 0,80, podendo ser considerado bom, pois se aproxima do erro obtido em laboratório.

Alves et al. (2012) usaram 495 árvores de *E. globulus* de 16 anos para caracterização química por meio de equipamento NIR e obtiveram, no modelo final de predição do teor de extrativos totais, valor igual a 6% na validação independente.

Poke, Wright e Raymond (2004) em estudo de predição de conteúdo de extrativos em *E. globulus* obtiveram como valor de referência 3,22% e modelo final de predição com R^2 igual a 0,93. Já He e Hu (2013) em estudo semelhante obtiveram como valor de referência 2,57% de teor de extrativos totais e modelo de predição final com R^2 de 0,97.

Estopa et al. (2017), em trabalho de caracterização química da madeira de *E. benthamii* de quatro anos por meio do NIR, tinham 2,4% como valor médio de referência para teor de extrativos totais solúveis em acetona (variando entre 0,6 e 5,3%, com desvio-padrão igual a 0,7 e coeficiente de variação de 31,5%). Os autores obtiveram, como resultado do modelo, R^2 da calibração igual a 0,82, R^2 da validação cruzada igual a 0,80 e R^2 da validação independente igual a 0,65.

Os valores de teor de extrativos totais preditos nas árvores sob exclusão parcial de chuvas pode estar relacionado com a condição de estresse hídrico descrito por diversos autores. Dicko et al. (2005) observaram maiores conteúdos de extrativos em plantas sob diversos tipos de estresse em estudo com sorgo sobre o impacto de compostos fenólicos em resistência e susceptibilidade à estresses bióticos e abióticos. Da mesma forma, Kozlowski (2003) em extensa revisão sobre o a resposta adaptativa de plantas lenhosas às condições de estresse, mostra que em diversas espécies há mudanças em nível molecular quando as árvores estão sob estresse hídrico. Torras-Claveria et al. (2012) encontraram maiores níveis de fenilpropanoides em plantas de tabaco sob condições de estresse ou senescência.

Franco (2014) encontrou 2,07% como valor de referência para teor de extrativos totais em árvores de *E. grandis* fertilizadas com K. Ainda, a mesma autora encontrou 2,71% e 2,87% para as mesmas condições em árvores fertilizadas com Na e árvores controle, respectivamente. Trugilho, Lima e Mori (2003), em estudo conduzido com sete clones de *E. grandis*, encontraram uma variação de 4,87 a 7,74% no teor de extrativos totais determinados em laboratório. Diante de toda literatura abordada aqui, pode-se dizer que o método de predição direta funcionou na predição do teor de extrativos totais de árvores de *E. grandis* com cinco anos.

É importante ainda ressaltar que, apesar dos dados obtidos estarem dentro da faixa de valores encontrados na literatura, deve-se sempre levar em conta as diferenças de idade entre as árvores, visto que na madeira juvenil as características químicas estão sujeitas a grandes variações iniciais, principalmente em relação aos teores de extrativos em relação à madeira adulta, onde os valores tendem a ser mais estáveis (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; MORAIS, 2008; FRANCO, 2014).

5.3.2 Transferência de calibração

Os espectros das amostras em pó adquiridos pelo equipamento NIR e HI-NIR tem, em geral um aspecto semelhante. Observa-se que a inclinação dos espectros e a posição dos picos de absorbância são parecidos, com destaque para o pico referente à água (1400 e 1916nm) e celulose (1500 e 2080 nm). Entretanto, os espectros NIR tem maior absorbância que os espectros da imagem HI-NIR (Figura 37). Esta diferença significativa pode acontecer devido à intensidade da luz incidente (I_0) em ambos os sensores e, portanto, não é possível compensar de forma adequada as diferenças entre as propriedades do instrumento (resolução espacial, fontes de luz, temperatura, etc), condições experimentais (exposição à luz, temperatura do ambiente, etc). Além disso, essa diferença também pode ocorrer devido à condições da amostra (tamanho das partículas, umidade, etc) (NOURI et al., 2017).

Figura 37. Espectros obtidos das 90 amostras de madeira em pó da base de dados NIR (em vermelho); das 90 amostras de madeira em pó da base de dados HI-NIR (em azul) e das 90 amostras *standard* (em amarelo)

Os resultados obtidos com os modelos testados, considerando ou não a transferência de calibração entre os equipamentos para as amostras de madeira em pó, podem ser observados na Tabela 11. O valor médio de referência obtido em laboratório para o teor de extrativos totais foi de 6,53%, variando entre 2,30% (mínimo) e 21,45% (máximo). A Figura 38 mostra o número de VL usadas, o R^2 , viés, SEP e valor de inclinação da reta em relação à linha diagonal (*target line*) de cada um dos modelos com e sem transferência de calibração testados.

Os resultados de predição onde não foram realizadas as transferências de calibração mostraram, em geral, baixo desempenho. Aplicado aos dados espectrais obtidos da imagem HI-NIR, o modelo “PLS M_{pt} ”, construído com os espectros obtidos do equipamento NIR com 506 (Figura 38A) amostras gerou um modelo de predição com SEP de 2,11 e R^2 de 0,80 (Figura 38B), com o uso de quatro VL. Por outro lado, quando aplicado ao próprio equipamento NIR o resultado é bom, com SECV e SEP igual a 1,25 e R^2 igual a 0,92.

O modelo “PLS M_{im} ” (Figura 38C) apresentou SECV de 1,21 e SEP com valor de 1,77 (Figura 38D), menor que o observado para o modelo “ M_{pt} ”, e R^2 de 0,84, com o uso de três VL (Tabela 11).

Estes resultados preliminares estão de acordo com os obtidos por Jarmer (2013) e Nouri et al. (2017), os quais testaram a aplicação direta de dados de laboratório em dados de imagem HI-NIR e observaram resultados de predição com altos valores de viés.

Esta baixa performance pode estar relacionada com a influência de diversos fatores nos espectros de ambos os equipamentos e nas condições das partículas das amostras, assim como as condições e angulação da luz incidente de cada equipamento sobre a

amostra (GRIFFITHS, 2009). Esses fatores podem levar a diferenças espectrais entre o conjunto de dados usado para construir o modelo “*pt*” e aqueles do conjunto de dados de teste na imagem (“*im*”).

Tabela 11. Resultados obtidos com os modelos sem transferência de calibração (NIR e HI-NIR) e com transferência de calibração testados no conjunto de dados “*lab*” constituída pelas amostras da coleção e “*im*” formada pelas imagens HI-NIR

Modelos testados	VL	Pré-tratamento	Validação cruzada	Teste no conjunto de dados “lab”	Teste no conjunto de dados “im”
			SECV	SEP	SEP
ST					
NIR (M _{pt})	4	SNV_D2	1,25	1,25	2,11
HI-NIR (M _{im})	3	D1	1,21	1,96	1,77
CT					
Update	4	SNV_D2	1,29	1,24	2,01
Reprofile	6	D1	1,26	1,18	1,82
PDS (std NIR)	4	SNV_D1	1,29	1,16	1,97
PDS (std HI-NIR)	4	SNV_D2	1,25	-	2,63
TOP (k=3)	5	D2	1,41	-	1,53

ST: modelos testados sem transferência de calibração; CT: modelos testados com transferência de calibração; k: constante; VL: número de variáveis latentes; SNV: variação normal padrão (*Standard Normal Variate*); D1: derivada primeira; D2: derivada segunda; SECV: erro padrão da validação cruzada; SEP: erro padrão de predição (*Standard Error of Prediction*)

O modelo *Update* apresentou SECV de 1,29 e SEP de 2,01 (Tabela 11), maior que o modelo “M_{im}”. Este modelo, com o uso de quatro VL tem R² de 0,81. Contudo, este modelo não atinge o desempenho do modelo M_{pt} (Figura 38E).

O modelo *Reprofile* apresenta melhor desempenho em relação ao *Update*. O R² foi de 0,86 (Figura 38F), o SECV foi de 1,26 e o SEP de 1,82 (Tabela 11), o maior valor de erro obtido entre todos os modelos. O número de VL foi de seis.

Entre os modelos PDS testados, o que apresentou melhor desempenho foi o PDS NIR, ou seja, aquele que tinha como objetivo converter os espectros “*master*” obtido do equipamento NIR em espectros “*slave*” obtidos da câmera hiperespectral (Tabela 11). Apesar dos valores de SECV estarem próximos 1,29 para PDS NIR e 1,25 para PDS HI-NIR, o R² foi de 0,84 e 0,64 para o modelo PDS NIR e PDS HI-NIR, respectivamente. O SEP do modelo PDS NIR foi de 1,97 (Figura 38G), enquanto que o SEP do modelo PDS HI-NIR foi de 2,63 (Figura 38H). Em ambos, o número de VL foram quatro. Entretanto, ambos os modelos não atingem o desempenho do modelo “M_{lab}” e “M_{im}”. Observou-se que ambos os modelos PDS não causaram a remoção de características espectrais específicas dos espectros, porém, após o PDS NIR, o perfil espectral resultante está mais próximo dos espectros NIR do que os espectros da imagem HI-NIR, resultando em um menor SEP em relação ao PDS HI-NIR (Tabela 11).

O modelo TOP foi capaz de integrar e corrigir as diferenças entre os espectros dos dois equipamentos, removendo os subespaços abrangidos pelas diferenças entre os espectros *standard*. De forma direta, isto que dizer que este modelo corrige todas as linhas de base, sendo, portanto, o melhor modelo obtido. O SECV foi de 1,41 e o SEP de 1,53 (Tabela 11; Figura 38I), ou seja, o menor dentre todos os métodos de transferência de calibração. O pré-tratamento utilizado foi a derivada segunda e o R^2 da validação externa foi de 0,88.

Em relação aos pré-tratamentos utilizados, o SNV, SNV combinado com polinômio de segunda ordem (chamado de SNV_D2) e o polinômio de primeira ordem (chamado de D1) foram os que apresentaram melhores previsões para estimar os teores de extrativos (Tabela 11). Li et al. (2004), Chen et al. (2012) e Jamshidi et al. (2012) explicam que, neste caso, o SNV é normalmente aplicada a dados espectrais para corrigir efeitos de espalhamento da radiação centrando e escalonando cada espectro de forma individual. Já o uso da derivada de primeira e segunda ordem suavizam os espectros, o que permite capturar possíveis padrões nos dados (por exemplo, repetições sistemáticas de picos). A aplicação prática dessa técnica é muito frequente em espectros de reflectância difusa em que o tamanho de partícula das amostras e efeitos multiplicativos de sinais estão presentes.

De uma perspectiva quimiométrica, o modelo *Update* e *Reprofile* pode ser descrito como métodos de correção implícitos (GUJRAL; AMRHEIN; BONVIN, 2009). Em ambos os modelos, a regressão pode usar as amostras do conjunto de dados da calibração para tornar o espaço do modelo independente dos distúrbios espectrais. No entanto, métodos implícitos podem não funcionar se os dados adicionados à base de calibração fornecem informações insuficientes. Neste estudo, fica claro pelos resultados obtidos que o modelo *Update* penaliza a regressão, uma vez que o SEP é o maior observado entre os modelos testados.

Contudo, no modelo *Update*, o conjunto de dados usado na transferência de calibração permite atualizar o modelo e enriquecer o banco de dados, tornando-o suficientemente abrangente e melhorando seu desempenho.

Os modelos PDS e TOP podem ser descritos como métodos de correção explícitos (GUJRAL; AMRHEIN; BONVIN, 2009), uma vez que eles modificam os espectros antes aplicar a regressão linear. Desta forma, o ajuste incorreto afeta diretamente o modelo. Com o PDS, a correção é baseada em um modelo geométrico simples, o que pode ser insuficiente dependendo do conjunto de dados. Já o modelo TOP pode executar correções complexas, porém, se uma parte do espaço removido pela ortogonalização fosse útil para a predição (por exemplo, a linha de base), a correção poderia alterar o modelo. Portanto, os métodos implícitos agem mais suavemente do que métodos explícitos.

Ainda sobre o PDS, este modelo foi desenvolvido para compensar pequenos efeitos ópticos, como deslocamentos e estiramentos, os quais aparecem entre dois instrumentos diferentes (daí o nome da padronização óptica) (FEARN, 2001). Mesmo que o PDS tenha sido testado com sucesso em alguns problemas de transferência difíceis (IGNE et al., 2009; NOURI et al., 2017), o presente estudo pode ser considerado um caso muito complexo para o PDS, pois envolve um grande número de fatores de perturbação em relação às condições das amostras. Além disso, o PDS corrige os espectros para adaptá-los às condições específicas correspondentes a um único nível de fatores de influência (FEUDALE et al., 2002). No entanto, devido à complexidade dos fatores de influência neste estudo, não se verificou uma condição específica para a qual o PDS possa convergir.

O modelo TOP é baseado em um processo de ortogonalização que é efetivo para corrigir influências complexas (PIERNA; DARDENNE, 2008). O uso de mais amostras no conjunto de dados *standard* poderia remover um subespaço gerado pelas maiores interferências, corrigindo X em função da fonte de variação. No entanto, é provável que tal correção elimine dimensões úteis para a regressão, o que limita os desempenhos deste método de transferência. Assim sendo, no presente trabalho observa-se que estudar os espectros prejudiciais aos modelos e, da mesma os úteis, constitui a chave para melhor compressão em qual modelo de transferência funcionará melhor na predição do teor de extrativos das “*amostras finais*”.

Figura 38. (Continua)

Figura 38. Resultados da predição em validação externa obtidos com os modelos sem transferência de calibração, sendo (A) NIR (506) testado sobre o conjunto de dados “lab”; (B) NIR (506) testado sobre o conjunto de dados “im”; (C) HI-NIR (90) testado sobre o conjunto de dados “lab”; (D) HI-NIR (90) testado sobre o conjunto de dados “im” e os resultados da predição em validação externa obtidos com os modelos com transferência de calibração, sendo (E) *Update*; (F) *Repfile*; (G) PDS sentido NIR → HI-NIR; (H) PDS sentido HI-NIR → NIR; (I) TOP. LV: número de variáveis latentes; R^2 : coeficiente de determinação; *bias*: viés; σ : desvio padrão (ou SEP); *slope*: inclinação da reta em relação à linha diagonal (*target line*); *offset*: compensações de pixels

Alguns pontos devem ser destacados, em termos de efeito do método de transferência de calibração sobre as condições dos equipamentos utilizados. A reflectância do equipamento NIR é maior que na câmera hiperespectral, porém nenhum dos equipamentos tendem a zero (Figura 39), o que deixa claro o uso de metodologias de transferência de calibração. Ainda, por outro lado, sob o ponto de vista quimiométrico, fica claro os picos de absorção água e celulose, os quais são preservados nos dois equipamentos mesmo depois de aplicar os modelos de transferência. Além disso, essa última constatação indica que os equipamentos usam a técnica de espectroscopia de

maneira diferente para detectar a mesma composição química. Portanto, a Figura 39 mostra a diferença entre os espectros obtidos no NIR e na câmera hiperespectral de acordo com o comprimento de onda.

Esta diferença confirma que os parâmetros referentes ao equipamento como medições ópticas e uso de diferentes referências influenciam nos resultados finais. Além disso, o trajeto do fóton sobre a amostra também é diferente entre os dois equipamentos. Estas condições de diferença de equipamento e amostra também foram observadas por Nouri et al. (2017) para mapeamento do conteúdo de argila em uma área de 20 km².

Figura 39. Espectros da matriz “comprimento de onda versus a diferença” entre os espectros obtidos no NIR e no HI-NIR

Em resumo, os resultados desta primeira etapa do trabalho de predição do teor de extrativos totais (considerados ainda preliminares) indicam que (i) o modelo baseado no equipamento NIR e testado nos espectros das amostras *standard* da câmera hiperespectral sem transferência de calibração resultam em predições com baixo desempenho, quando comparado com o resultado do teste sobre os espectros das amostras *standard* oriundos do próprio equipamento NIR (conforme esperado); (ii) os métodos de transferência de calibração testados melhoraram significativamente a qualidade da predição, usando o conjunto de dados de teste, principalmente o TOP. As performances dos modelos transferidos (M_{tr}) são melhores que as obtidas com o modelo de laboratório (M_{pt}) sem transferência de calibração. Isso indica que os fatores que influenciam as duas condições de

medição dos equipamentos criam distorções espectrais que podem ser parcialmente compensadas usando as técnicas de transferência propostas.

Deve-se levar em conta o fato de que, para testar essa nova abordagem, a equipe de trabalho desfrutar de um amplo de banco de dados espectrais de *Eucalyptus* constitui uma vantagem para realização do trabalho. Porém, fatores como as condições físicas das amostras e a as diferenças de funcionamento dos equipamentos deixam claro a complexidade de se trabalhar com estes conjuntos de dados espectrais. Contudo, ainda assim o modelo TOP mostrou-se efetivo para a transferência de calibração das amostras em pó, o que permite que as etapas de trabalho sejam avançadas.

5.4 Análise integrada dos dados

O estudo das propriedades físicas, anatômicas e químicas da madeira para explicar as respostas das árvores às variações do clima se mostrou eficiente conforme pôde ser observado nos itens dos resultados. As análises retrospectivas das mudanças induzidas na madeira durante o processo de adaptação das variações sazonais do clima puderam ser verificadas e quantificadas. O estudo da influência da interação dos fertilizantes K e Na e o déficit hídrico na qualidade da madeira mostrou alterações adaptativas do lenho para suportar as condições impostas pelo ambiente.

Levando-se em consideração os resultados apresentados para as propriedades do lenho, observou-se que os tratamentos K/+A e C/-A mostraram, de maneira geral, resultados extremos e opostos. Por isso, propôs-se a criação das Figuras 40 e 41, as quais ilustram de forma integrada os dados de densidade aparente (g/cm^3), diâmetro tangencial dos vasos (μm) e predição da distribuição da porcentagem de teores de extrativos totais ao longo do raio no DAP destes dois tratamentos especificamente.

Altos valores de incremento em diâmetro do tronco das árvores foram observados nas árvores em boas condições de crescimento e desenvolvimento, como no tratamento K/+A (Figura 40). Consequentemente, os resultados parecem indicar padrões de distribuição de compostos químicos, densidade e parâmetros anatômicos do lenho, de acordo com as condições de crescimento controladas tanto pela precipitação quanto pela fertilização. A formação do lenho mais homogêneo implica diretamente sobre a qualidade da madeira para uso final, por isso da importância desse tipo de resultado.

As árvores sob o tratamento C/-A (Figura 41) mostraram um perfil radial bastante heterogêneo de densidade aparente e de composição química dos extrativos totais. A região correspondente à área do anel de crescimento de 2014 mostra valores maiores e contínuos de % de extrativos totais preditos. Estes resultados corroboram com o relatado na literatura e enfatiza que o *Eucalyptus* é sensível às variações climáticas citando-se, principalmente, a

precipitação. Da mesma, Moulin et al. (2015) observaram o aumento do valor médio do teor de extrativo em regiões não irrigadas de eucalipto. Nabais et al. (2018) verificaram correlação positiva entre a densidade da madeira e o déficit hídrico em diversas espécies de *Eucalyptus*.

Conhecer os fatores climáticos que limitam a atividade cambial é fundamental para prever o potencial das árvores para responder às mudanças climáticas. Explorar a área do xilema, por exemplo, com o estudo da largura do anel de crescimento, variação interanual de micro densidade e flutuações da densidade intra-anual é fundamental para conhecer os fatores climáticos que restringem a atividade cambial de uma espécie.

Arzac et al. (2018) estudaram a influência da variação de disponibilidade de água no crescimento e densidade de *Pinus pinaster*. Os autores explicam que o crescimento secundário foi influenciado, principalmente, pela disponibilidade de água, respondendo 64,7% da variância de crescimento da madeira. A densidade mínima média foi influenciada negativamente pela disponibilidade de água e durante o início do período de crescimento, enquanto que a densidade máxima foi influenciada positivamente à disponibilidade de água durante dois períodos distintos, o inverno do período anterior e início da formação de madeira tardia. A plasticidade cambial, ou seja, a capacidade de ajustar a taxa de xilogênese e de parar e retomar a atividade cambial para explorar períodos climáticas favoráveis, foi fundamental para que *P. pinaster* incrementassem o crescimento em diâmetro do tronco. No entanto, o efeito da disponibilidade de água em todas as áreas analisadas indica que períodos com precipitações reduzidas e o aumento da evapotranspiração, conforme previsto pelos modelos de mudanças climáticas, impactarão negativamente o crescimento secundário de *P. pinaster* ao longo de todo o seu alcance ambiental.

Searson et al. (2004) observaram que a densidade da madeira de *Eucalyptus* aumentou entre 4 e 13% nas plantas sujeitas ao déficit hídrico. Contudo, esse aumento se deve à presença de extrativos na parede celular que, uma vez retirados, o aumento da densidade passou a ser de, no máximo 9% e, significativo apenas para *E. grandis*. Além disso, a limitação de água reduziu significativamente o diâmetro do lume, porém essa redução foi, muito provavelmente, equilibrada pela maior frequência de vasos. Com isso, a porcentagem de área ocupada pelos vasos não apresentou diferença significativa. Os autores relatam ainda que, nas árvores que não estavam sob condição de déficit hídrico, a densidade aparente do lenho assumiu uma relação negativa com o diâmetro do lume.

Figura 40. Resultados da densidade aparente (g/cm^3) em preto; predição direta da % de extrativos totais em vermelho e demarcação dos anéis de crescimento, a partir do ano 2011, em árvores de *E. grandis* no tratamento K/+A

Figura 41. Resultados da densidade aparente (g/cm^3) em preto; predição direta da % de extrativos totais em vermelho e demarcação dos anéis de crescimento, a partir do ano 2011, em árvores de *E. grandis* no tratamento C/-A

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, é possível afirmar que:

- a densidade aparente do lenho das árvores controle aumentou com a redução da disponibilidade hídrica. As árvores fertilizadas com K e Na assumiram valores médios estatisticamente iguais e diferentes do controle;
- a cartografia da densidade aparente do lenho mostrou um modelo de variação característico da espécie, onde há aumento da densidade do lenho na direção medula-casca, conforme descrito pela literatura para o gênero;
- o modelo de predição da densidade básica obtido pelo NIR obtido foi satisfatório e adequado;
- foram verificadas modificações na estrutura anatômica do lenho do tronco das árvores de *E. grandis*, principalmente pela fertilização com K e Na. As fibras mais longas foram encontradas no tratamento K/+A e as de maior espessura de parede no tratamento controle (C/+A);
- as árvores controle sob condição de déficit hídrico apresentaram o menor valor médio de diâmetro tangencial e, o inverso, acontece nas árvores fertilizadas com K e sem exclusão parcial, sugerindo uma mudança adaptativa dos vasos frente às condições do ambiente;
- existe uma relação direta e positiva entre a densidade aparente e as propriedades anatômicas do lenho, principalmente com a espessura da parede da fibra;
- as análises da qualidade do lenho propostas pelo presente trabalho são capazes de detectar e quantificar as mudanças causadas pelos tratamentos e direcionar melhor o uso final da madeira;
- em termos de propriedades do lenho, as diferenças de valores encontrados entre os tratamentos K e Na é, em geral, pequena, sugerindo a possibilidade da substituição parcial do K pelo Na;
- em áreas com condição de déficit hídrico e fertilização semelhantes, os resultados aqui obtidos permitem inferir que as plantações de *E. grandis* podem se desenvolver sem perdas

produtivas de madeira. Contudo, os resultados deste e de outros estudos feitos na mesma área experimental sugerem que, em um contexto de mudanças climáticas, os níveis recomendados de nutrientes em florestas plantadas devem ser revisados para melhorar a tolerância da árvore em condição de seca;

- a predição do teor de extrativos totais na madeira, com o uso da imagem HI-NIR, funcionou e os resultados de transferência de calibração com o modelo TOP encorajam a continuação do trabalho com a base de calibração completa. Os resultados de predição já obtidos demonstram a possibilidade de obter um modelo robusto que permitirá, no futuro, a construção de um modelo que pode ser aplicado à várias espécies de eucalipto para predizer não só teor de extrativos, mas também lignina e celulose;

- a análise conjunta dos dados permite concluir que há aumento da densidade do lenho das árvores em relação a sua idade. As variações de densidade observadas estão relacionadas com o aumento da espessura da parede celular, diminuição da largura das células, a estrutura anatômica de fibras e vasos e composição química, como deposição de extrativos na parede das células;

7. RECOMENDAÇÕES

Como recomendações são sugeridas futuras pesquisas que poderiam ser realizadas com base nos resultados obtidos no presente estudo. As futuras análises podem ampliar os conhecimentos sobre a influência da interação do déficit hídrico e a fertilização que ocorrem na área experimental. Portanto, sugere-se:

- concluir todas as etapas de transferência de calibração sugeridas pelos pesquisadores para obtenção do melhor modelo robusto para as amostras estudadas;
- fazer previsões para lignina e celulose com o modelo final gerado com a previsão dos dados de teor de extrativos totais, com a imagem HI-NIR;
- acrescentar todas as posições coletadas restantes (DAP, 25, 50, 75 e 100%) ao modelo obtido para densidade básica e proceder a validação independente;
- identificar a variabilidade dos extrativos em cada anel de crescimento e correlacionar com o clima e com a interação da fertilização e déficit hídrico;
- fazer um mapeamento longitudinal dos compostos químicos para conhecer a variação ao longo do tronco e correlacionar com os dados obtidos na cartografia da densidade aparente;
- correlacionar a atividade do câmbio e a formação da madeira com a fenologia, clima e dinâmica da população (dendroecologia);
- usar modelos ecofisiológicos para aprimorar os conhecimentos sobre a variação do crescimento das árvores de eucalipto em função das condições edafoclimáticas;
- propor metodologias de estudo dos níveis bioquímicos e moleculares para compreender, efetivamente, o papel do K e Na no desenvolvimento das árvores e os mecanismos de resistência das plantas em condições de água limitada.

REFERÊNCIAS

- AGRESTI, G.; BONIFAZI, G.; CALIENNO, L.; CAPOBIANCO, G.; LOMONACO, A.; PELOSI, C.; PICCHIO, R.; SERRANTI, S. Surface investigation of photo-degraded wood by colour monitoring, infrared spectroscopy, and hyperspectral imaging. **Journal of Spectroscopy**, v. 2013, n. 4, 2013. 13 pp.
- 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.
- AL-KHALIFAH, N.S.; KHAN, P.R.; AL-ABDULKADER, A.M.; NASROUN, T. Impact of water stress on the sapwood anatomy and functional morphology of *Calligonum comosum*, **IAWA Journal**, Leiden, v. 27, p. 299-312, 2006.
- ALLEN, C.D. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon? **Unasylva**, Rome, v. 60, p. 43-49, 2009.
- ALLEN, L.H. Pitch control during the production of aspen kraft pulp. **Pulp Paper Can.**, v. 89, n. 10, p. 87-91, 1988.
- 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.M.M.; SIMÕES, R.F.S.; SANTOS, C.A.; POTTS, B.M.; RODRIGUES, J.; SCHWANNINGER, M. Determination of *Eucalyptus globulus* wood extractives content by near infrared-based partial least squares regression models: comparison between extraction procedures. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 20, p. 275-285, 2012.
- ALVES, E.S.; ANGYALOSSY-ALFONSO, V. Ecological trends in the wood anatomy of some Brazilian species. 1. Growth rings and vessels. **IAWA Journal**, Leiden, v. 20, n. 1, p. 3-30, 2000.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em 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.
- AMIGO, J.M. Practical issues of hyperspectral imaging analysis of solid dosage forms. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, Heidelberg, v. 398, p. 93-109, 2010. doi: 10.1007/s00216-010-3828-z
- _____; RAVN, C. Direct quantification and distribution assessment of major and minor components in pharmaceutical tablets by NIR-chemical imaging. **European journal of pharmaceutical sciences : official journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences**, v. 37, n. 2, p. 76–82, 2009.
- _____; BABAMORADI, H.; ELCOROARISTIZABAL, S. Hyperspectral image analysis. A tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v. 896, p. 34-51, 2015.
- _____; MARTÍ, I.; GOWEN, A. Hyperspectral imaging and chemometrics: A perfect combination for the analysis of food structure, composition and quality. (Cap. 9). In: MARINI, F. (Ed.). **Data Handling in Science and Technology**, Vol. 28. Elsevier, 2013, pp. 343-370.
- ANDEREGG, W.R.L.; MEINZER, F.C. Wood Anatomy and Plant Hydraulics in a Changing Climate. In: HACKE, U.G. (Ed.). **Functional and Ecological Xylem Anatomy**. Springer, Cham., p. 235-253, 2015.
- 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.
- 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.
- ANDREACCI, F.; BOTOSSO, P.C.; GALVÃO, F. Sinais climáticos em anéis de crescimento de *Cedrela fissilis* em diferentes tipologias de florestas ombrófilas do sul do Brasil. **Revista Floresta**, v. 44, n. 2, p. 323-332, 2014.
- ANDREW, A.; FEARN, T. Transfer by orthogonal projection: making near-infrared calibrations robust to between-instrument variation. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**, v. 72, n. 1, p. 51–56, 2004.
- 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.
- AREND, M.; FROMM, J. Seasonal change in the drought response of wood cell development in poplar. **Tree Physiology**, v. 27, p. 985-992, 2007.

- 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.
- ARZAC, A.; ROZAS, V. ; ROZENBERG, P. ; OLANO, J.M. Water availability controls *Pinus pinaster* xylem growth and density: A multi-proxy approach along its environmental range. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 250-251, p. 171-180, mar. 2018.
- ATKINSON, N.J.; DEW, T.P.; ORFILA, C.; URWIN, P.E. Influence of combined biotic and abiotic stress on nutritional quality parameters in tomato (*Solanum lycopersicum*). **Journal of Agriculture Food Chemistry**, Washington, v. 59, n. 17, p. 9673-9682, 2011.
- BAAS, P. The wood anatomical range in *Ilex* (Aquifoliaceae) and its ecological and phylogenetic significance. **Blumea**, Leiden, v. 21, p. 193-258, 1973.
- _____. Some functional and adaptive aspects of vessel member morphology. In: BAAS, P.; BOLTON, A.J.; CALTING, D.M. (Eds.). **Wood structure in biological and technological research**. Leiden Botanical Series n. 3. Leiden University Press, The Hague, p 157–181, 1976.
- _____. Systematic, phylogenetic and ecological wood anatomy. history and perspectives. In: BAAS, P. (Ed.). **New perspectives in wood anatomy**. Nijhoff/Junk, The Hague, p 23–58, 1982.
- _____; CARLQUIST, S. A comparison of the ecological wood anatomy of the floras of Southern California and Israel. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 6, n. 5, p. 349–353, 1985.
- _____; 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.
- _____; EWERS, F.W.; DAVIS, S.D.; WHEELER, E.A. Evolution of xylem physiology. In: HEMSLEY, A.; POOLE, I. (Eds.). **The evolution of plant physiology**. Elsevier, Amsterdam, pp 273–295, 2004.
- BACA-BOCANEGRA, B.; NOGALES-BUENO, J.; HERNÁNDEZ-HIERRO, J.M.; HEREDIA, F.J. Evaluation of extractable polyphenols released to wine from cooperage byproduct by near infrared hyperspectral imaging. **Food Chemistry**, v. 244, p. 206-212, 2018.
- BAILEY, I.W.; TUPPER, W.W. Size variation in tracheary cells. I. A comparison between the secondary xylem of vascular crypto-gams, gymnosperms and angiosperms. **Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences**, Boston, v. 54, p. 149–204, 1918.
- BAMBER, R.K.; FLOYD, A.G.; HUMPHREYS, F.R. Wood properties of flooded gum. **Australian Forestry**, Canberra, v. 33, n. 1, p. 3-12, 1969.

- _____; HORNE, R.; GRAHAM-HIGGS, A. Effect of fast growth on the wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Australian Forest Research**, Canberra, v. 12, n. 2, p. 163-167, 1982.
- 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.
- _____; MALTHA, C.R.A.; CRUZ, M.P. Composição química de extrativos lipofílicos e polares de madeira de *Eucalyptus grandis*. **Ciência & Engenharia**, v. 15, n. 2, p. 13-20, 2005.
- BARRICHELO, L.E.G.; 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.
- 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.
- _____; LACLAU, J.-P.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M.R. ALMEIDA.; ARENQUE, B. C.; DE CASSIA PICCOLO, M.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J.-P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 70–81, Jan. 2014b.

- _____; LACLAU, J.-P.; DOMEQ, J.-C.; CHRISTINA, M.; BOUILLET, J.-P.; DE CASSIA PICCOLO, M.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; MOREIRA, R. M. e.; KRUSCHE, A. V.; BOUVET, J.-M; NOUVELLON, Y. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. **New Phytologist**, Cambridge, v. 203, n. 2, p. 401–413, Jul. 2014a.
- _____; LACLAU, J.-P.; PICCOLO, M.C.; ARENQUE, B.C.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M.R.A.; JORDAN-MEILLE, L.; BUCKERIDGE, M.S.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J.; BOUILLET, J.-P. Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 371, p. 19-35, 2013.
- BELLON-MAUREL, V.; DUBOIS, J. Near-infrared hyperspectral imaging in food and agricultural science. In: SALZER, R.; SIESLER, H.W. (Eds.). **Infrared and Raman Spectroscopic Imaging**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2009.
- 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 Fraiburg, Fraiburg, 1990.
- BERGMAN, E.L.; BRAGE, H.; JOSEFSON, M.; SVENSSON, O.; SPARÉN, A. Transfer of NIR calibrations for pharmaceutical formulations between different instruments. **J. Pharm.Biomed. Anal**, v. 41, n. 1, p. 89-98, 2006.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R.L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J.L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, dez. 2017.
- 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.
- 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.
- BOLDRINI, B.; KESSLER, W.; REBNER, K.; KESSLER, R.W. Hyperspectral imaging: a review of best practice, performance and pitfalls for in-line and on-line applications. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 20, p. 483-508, 2012.
- BONIFAZI, G.; CALIENNO, L.; CAPOBIANCO, G.; MONACO, A.L.; PELOSI, A.; PICCHIO, R.; SERRANTI, S. Modeling color and chemical changes on normal and red heart beech wood by reflectance spectrophotometry, Fourier Transform Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging. **Polymer Degradation and Stability**, v.113, p. 10-21, 2015.

- BOUVERESSE, E.; MASSART, D.L. Improvement of the piecewise direct standardisation procedure for the transfer of NIR spectra for multivariate calibration. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 32, p. 201-213, 1996.
- 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.
- BOVY, A.G.; GÓMEZ-ROLDÁN, V.; HALL, R.D. Strategies to optimize the flavonoid content of tomato fruit. In: SANTOS-BUELGA, C.; ESCRIBANO-BAILON, M.T.; LATTANZIO, V. (Eds.). **Recent Advances in Polyphenol Research**. Vol. 2. Chichester: Wiley-Blackwell, 2010. 352 p.
- BRADSHAW, A.D. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. In: CASPARI, E.W.; THODAY, J.M. (Eds.). **Advances in genetics**. Vol. 13. New York: Academic Press, 1965. 377 p.
- BRANDO, P.M.; NEPSTAD, D.C.; DAVIDSON, E.A.; TRUMBORE, S.E.; RAY, D.; CAMARGO, P. Drought effects on litter fall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a through fall reduction experiment. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**. London, v. 363, n. 1498, p. 1839-1848, May. 2008.
- BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* ao nível do DAP: análise preliminar. **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.
- BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. The use of tree rings in tropical forest management: projecting timber yields of four Bolivian tree species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, p. 256 - 26, 2006.
- BRUNS, R.; FAIGLE, J. F. G. Quimiometria. **Química Nova**, p. 84–99, 1985.
- BURGER, J.; GELADI, P. Hyperspectral NIR imaging for calibration and prediction: a comparison between image and spectrometer data for studying organic and biological samples. **Analyst**, v. 131, n. 10, p. 1152-1160, 2006.
- BURGER, J.; GOWEN, A. Data handling in hyperspectral image analysis. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 108, p. 13-22, 2011.
- BURNS, D.A.; CIURCZAK, E.W. (Ed.). **Handbook of near-infrared analysis**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 826 p. (Practical Spectroscopy, 35).

- BUSSOTTI, F.; BETTINI, D.; GROSSONI, P.; MANSUINO, S.; NIBBI, R.; SODA, C.; TANI, C. Structural and functional traits of *Quercus ilex* in response to water availability. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 47, p. 11-23, 2002.
- 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.
- 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.
- CAMARERO, J.J.; SANGÜESA-BARREDA, G.; VERGARECHEA, M. Prior height, growth, and wood anatomy differently predispose to drought-induced dieback in two Mediterranean oak species. **Annals of Forest Science**, v. 73, p. 341-351, 2016.
- CARLQUIST, S. **Ecological strategies of xylem evolution**. University of California Press, Berkeley, 1975.
- _____. Further concepts in ecological wood anatomy, with comments on recent work in wood anatomy and evolution. **Aliso**, Claremont, v. 9, p. 499–553, 1980.
- _____. Wood anatomy of Onagraceae: further species; root anatomy; significance of vestured pits and allied structures in dycotyledons. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, St. Louis, v. 69, p. 755–769, 1983.
- _____. Adaptive wood anatomy of chaparral shrubs. In: KEELY, J.E. (Ed.). **The California chaparral: paradigms re-examined**. Los Angeles Country Museum of Natural History Contributions, Los Angeles, pp 25–35, 1989.
- _____.; HOEKMAN, D.A. Ecological wood anatomy of the woody southern Californian flora. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 6, n. 4, p. 319-347, 1985.
- CARRILLO, I.; AGUAYO, M. G.; VALENZUELA, S.; MENDONÇA, R. T.; ELISSETCHE, J. P. Variations in wood anatomy and fiber biometry of *Eucalyptus globulus* genotypes with different wood density, **Wood Research**, Kyoto, v. 60, n. 1, p. 1-10, 2015.

- CARTER, J.L.; WHITE, D.A. Plasticity in the Huber value contributes to homeostasis in leaf water relations of a mallee Eucalypt with variation to groundwater depth. **Tree Physiology**, Victoria, v. 29, n. 11, p. 1407-1418, Set. 2009.
- CASTRO, V.R. **Efeitos do potássio, sódio e da disponibilidade hídrica no crescimento e qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. 2014, 142f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- CATCHPOOLE, S.J.; DOWNES, G.; READ, S.M. The effect of salt on wood and fibre formation in eucalypts: A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation. **Rural Industries Research & Development Corporation**, Canberra, 2000. 55 p.
- 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.
- CHAIX, G.; KOKUTSE, A.-D.; RATOVOBOAHANGY, B.; GUIBAL, D.; RANDRIANJAFY, H.; RAKOTONDRAOELINA, H.; BRANCHERIAU, L.; RAKOTOVOLOLONALIMANANA, H.; HEIN, P.R.G.; RAMANANANTOANDRO, T. Prediction of radial and tangential shrinkages by near-infrared spectroscopy: An example for *Tectona grandis* from Togo and for *Liquidambar styraciflua* from Madagascar. **Cerne**, v. 16, suplemento, p. 66-73, 2010.
- CHANG, K.-Y. ; XU, L. ; STARR, G. ; U, K.T.P. A drought indicator reflecting ecosystem responses to water availability: The Normalized Ecosystem Drought Index. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 250-251, p. 102-117, mar. 2018.
- CHAVES, M.M.; PEREIRA, J.S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M.L.; RICARDO, C.P.P.; OSÓRIO, M.L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, London, v.89, n.7, p.907-916, 2002.
- CHARRIER, B.; MARQUES, M.; HALUK, J.P. HPLC analysis of gallic and ellagic acids in European Oakwood (*Quercus robur* L.) and Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*). **Holzforschung**, v. 46, p. 87–89, 1992.
- CHEN, Y.; XIE, M.; ZHANG, H.; WANG, Y., NIE, S.; LI, C. Quantification of total polysaccharides and triterpenoids in *Ganoderma lucidum* and *Ganoderma atrum* by near infrared spectroscopy and chemometrics. **Food chemistry**, v.135, p. 268-275, 2012.
- CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P. ; STAPE, J.L.; BOUILLET, J.-P. ; LAMBAIS, G.R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, p. 509-519, 2017.

- _____; LE MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.-P.; JOURDAN, C.; GONÇALVES, J.L. DE M.; LACLAU, J.-P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2022-2039, 2015.
- _____; le MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; VEZY, R.; BORDON, B.; BATTIE-LACLAU, P.; GONÇALVES, J.L.M.; DELGADO-ROJAS, J.S.; BOUILLET, J.-P.; LACLAU, J.-P. Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. **Forest Ecology and Management**, 2018. (in press).
- CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T.J.; COCHARD, H.; DELZON, S.; HASKAR, R.; BUCCI, S.J.; FIELD, T.S.; GLEASON, S.M.; HACKE, U.G. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, London, v. 491, p. 752–755, 2012.
- CLARK, D.A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D.W.; CHAMBERS, J.Q.; THOMLINSON, J.R.; NI, J.; HOLLAND, E.A. Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. **Ecological Applications**, Washington DC, v. 11, p. 371–384, 2001.
- 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).
- COLARES, C.J.G.; PASTORE, T.C.M.; CORADIN, V.T.R.; MARQUES, L.F.; MOREIRA, A.C.O.; ALEXANDRINO, G.L.; POPPI, R.J.; BRAGA, J.W.B. Near infrared hyperspectral imaging and MCR-ALS applied for mapping chemical composition of the wood specie *Swietenia macrophylla* King (Mahogany) at microscopic level. **Microchemical Journal**, v. 124, p. 356-363, 2016.
- 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.
- CORCUERA, L.; CAMARERO, J.J.; SISÓ, S.; GIL-PELEGRÍN, E. Radial-growth and wood-anatomical changes in overaged *Quercus pyrenaica* coppice stands: functional responses in a new Mediterranean landscape. **Trees**, v. 20, n. 1, p. 91-98, 2006.
- COSTA, A.C.S.; LEAL, C.S.; SANTOS, L.C.; CARVALHO, A.M.M.L.; OLIVEIRA, A.C.; PEREIRA, B.L.C. Propriedades da madeira de cerne e alburno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2017.

- 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, J.; BLANCO, M. Content uniformity studies in tablets by NIR-Cl. **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis**, v. 56, n. 2, p. 408–412, 2011.
- _____; BAUTISTA, M.; AMIGO, J. M.; BLANCO, M. Nir-chemical imaging study of acetylsalicylic acid in commercial tablets. **Talanta**, v. 80, n. 2, p. 473–478, 2009.
- DE MICCO, V.; ARONNE, G.; BASS, P. Wood anatomy and hydraulic architecture of stems and twigs of some Mediterranean trees and shrubs along a mesic-xeric gradient. **Trees**, Heidelberg, v. 22, p. 643-655, abr. 2008.
- DEFOIRDT, N.; SEN, A.; DHAENE, J.; DE MIL, T.; PEREIRA, H.; VAN ACKER, J.; VAN DEN BULCKE, J. A generic platform for hyperspectral mapping of wood. **Wood Science Technology**, v. 51, p. 887-907, 2017.
- DENIS, M.; FAVREAU, B.; UENO, S.; CAMUS-KULANDAIVELU, L.; CHAIX, G.; GION, J.-M.; NOURRIER-MOUNTOU, S.; POLIDORI, J.; BOUVET, J.-M. Genetic variation of wood chemical traits and association with underlying genes in *Eucalyptus urophylla*. **Tree Genetics & Genomes**, v. 9, p. 927-942, 2013.
- DÉTIENNE, P. Nature et périodicité des cernes dans quelques bois guyanais. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent sur Marne, n. 243, p. 65-75, 1995.
- DICKO, M.H.; GRUPPEN, H.; BARRO, C.; TRAORE, A.S.; van BERKEL, W.J.H.; VORAGEN, A.G.J. Impact of phenolic compounds and related enzymes in sorghum varieties for resistance and susceptibility to biotic and abiotic stresses. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 31, n. 11, p. 2671-2688, nov. 2005.
- D'ORANGEVILLE, L.; CÔTÉ, B.; HOULE, D.; MORIN, H. The effects of throughfall exclusion on xylogenesis of balsam fir. **Tree Physiology**, Oxford, v. 33, p. 516-526, 2013.
- DOUGLASS, A.E. Method of estimating rainfall by growth of trees. (Chap. XI). In: HUNTINGTON, E. **The climatic factor**. Carnegie Inst. Wash. Pub., v. 192, p. 104- 109, 1914.
- DOWNES, G.; 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.
- 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.

- _____; DOWNES, G.M.; EVANS, R. Short-term growth responses and associated wood densities fluctuations in variously irrigated *Eucalyptus globulus*. **Trees**, Heidelberg, v. 25, p. 153-161, 2011.
- _____; 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.
- DUNCKER, P.; SPIECKER, H. Detection and classification of Norway spruce compression wood in reflected light by means of hyperspectral image analysis. **IAWA Journal**, Leiden, v. 30, p. 59, 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.
- EILMANN, B.; ZWEIFEL, R.; BUCHMANN, N.; GRAF-PANNATIER, E.; RIGLING, A. Drought alters timing, quantity, and quality of wood formation in Scots pine. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, p. 2763–2771, 2011.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- ENGELBRECHT, B.M.J.; DALLING, J.W.; PEARSON, T.R.H.; WOLF, R.L.; GALVEZ, D.A.; KOEHLER, T.; TYREE, M.T.; KURSAR, T.A. Short dry spells in the wet season increase mortality of tropical pioneer seedlings. **Oecologia**, Heidelberg, v. 148, p. 258–269, 2006.
- 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.
- ESBENSEN, K.; GELADI, P. Strategy of multivariate image analysis (MIA). **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 7, n. 1-2, p. 67–86, 1989.

- ESTOPA, R.A. **Fenotipagem via NIR e predição genômica em *Eucalyptus benthamii***. 2017. 104 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- _____; MILAGRES, R.F.; GOMES, F.J.B.; AMARAL, C.A.S. Caracterização química da madeira de *Eucalyptus benthamii* por meio de espectroscopia NIR. **O Papel**, v. 78, n. 2, p. 75-81, 2017.
- EWERS, F.W. Xylem structure and water conduction in conifer trees, dicot trees, and lianas. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 6, p. 309–317, 1985.
- _____; FISHER, J.B. Why vines have narrow stems: histological trends in Bauhinia. **Oecologia**, Heidelberg, v. 88, p. 233–237, 1991.
- FAHN, A.; WERKER, E.; BAAS, P. **Wood anatomy and identification of trees and shrubs from Israel and adjacent regions**. Jerusalem: The Israel Academy of Sciences and Humanities, 1986. 221p.
- 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.; HUSSAIN, M.; WAKEEL, A.; SIDDIQUE, K.H.M. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. **Agron. Sustain.Dev.**, v. 35, p. 461-481, 2015.
- FEARN, T. Standardization and calibration transfer for near infrared instruments: A review. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 9, p. 229-244, 2001.
- _____; RICCIOLI, C.; GARRIDO-VARO, A.; GUERRERO-GINEL, J. E. On the geometry of SNV and MSC. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 96, n. 1, p. 22–26, 2009.
- FEBRUARY, E. C. Sensitivity of xylem vessel size and frequency to rainfall and temperature: implications for paleontology. **Paleontologia Africana**, v. 30, p. 91-95, 1993.
- _____; STOCK, W.D.; BOND, W.J.; Le ROUX, D.J. Relationships between Water Availability and Selected Vessel Characteristics in Eucalyptus Grandis and Two Hybrids. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 16, n. 3, p. 269 – 276, 1995.
- FEIKEMA, P.M.; MORRIS, J.D.; BEVERLY, C.R.; COLLOPY, J.J.; BAKER, T.G.; LANE, P.N.J. Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3PG+forest growth model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 5, p. 663-678. 2010.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Walter de Gruyter, Berlin, 1984. 613 p.

- FERNANDES, A.; LOUSADA, J.; MORAIS, J.; XAVIER, J.; PEREIRA, J.; MELO-PINTO, P. Measurement of intra-ring wood density by means of imaging VIS/NIR spectroscopy (hyperspectral imaging). **Holzforschung**, Berlin, v. 67, p. 59-65, 2013.
- 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, M.M.C. **Quimiometria: Conceitos, métodos e aplicações**. Editora Unicamp, 2015. 496 p.
- FERREIRA, M.C.; DOS SANTOS, R.C.; CASTRO, R.V.O.; CARNEIRO, A.C.O.; DA SILVA, G.G.C.; CASTRO, A.F.N.M.; COSTA, S.E.L.; PIMENTA, A.S. Biomass and energy production at short rotation eucalyptus clonal plantations deployed in Rio Grande do Norte. **Rev. Árvore**, v. 41, n. 5, 2017.
- FEUDALE, R.N.; WOODY, N.A.; TAN, H.; MYLES, A.J.; BROWN, S.D.; FERRÉ, J. Transfer of multivariate calibration models: A review. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 64, p. 181-192, 2002.
- 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).
- FONTI, P.; HELLER, O.; CHERUBINI, P.; RIGLING, A.; AREND, M. Wood anatomical responses of oak saplings exposed to air warming and soil drought. **Plant Biology**, Palo Alto, v. 15, p. 210-219, 2013.
- _____; VON ARX, G.; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; EILMANN, B.; SASS-KLAASSEN, U.; GÄRTNER, H.; ECKSTEIN, D. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. **New Phytologist**, v. 185, p. 42-53, 2010.
- FRANCH-LAGE, F.; AMIGO, J.M.; SKIBSTED, E.; MASPOCH, S.; COELLO, J. Fast assessment of the surface distribution of API and excipients in tablets using NIR-hyperspectral imaging. **International Journal of Pharmaceutics**, Amsterdam, v. 411, p. 27-35, 2011.
- FRANCO, M.P. **Efeito da substituição do potássio pelo sódio em árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, visando a expansão das plantações florestais sob condições de estresse hídrico**. 2014. 153p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

- _____; LACLAU, J.-P.; SETTE JUNIOR, C.; FILHO, M.T.; CHAIX, G. Impact of alternative fertilization with sodium on growth and wood quality of *Eucalyptus grandis* plantations in Brazil. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 24., 2014, Salt Lake City. **Abstracts...**The International Forestry Review, v.16, n. 5, 2014. 578p. ISSN: 2053-7778.
- 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.
- FREITAS, P.C.; SETTE JR, C.R.; CASTRO, V.R.; CHAIX, G.; LACLAU, J.P.; TOMAZELLO FILHO, M. Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 405-416, Abr. 2015
- FRITTS, H.C. **Tree rings and climate**. Academic Press, London, 1976.
- _____; SWETNAM, T. W. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. **Advances in ecological research**, v. 19, p. 111-188, 1989.
- FROMM, J. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. **Tree Physiology**, Victoria, v. 30. p. 1140–1147, 2010.
- FUKUSHIMA, A.; KUSANO, M.; REDESTIG, H.; ARITA, M.; SAITO, K. Integrated omics approaches in plant systems biology. **Current Opinion in Chemical Biology**, Amsterdam, v. 13, p. 532-538, 2010.
- GALLE, A.; ESPER, J.; FELLER, U.; RIBAS-CARBO, M.; FONTI, P. Responses of wood anatomy and carbon isotope composition of *Quercus pubescens* saplings subjected to two consecutive years of summer drought. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 76, p. 809-809, 2010.
- 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.
- 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.
- 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.
- GELADI, P. Analysis of Multi-Way Data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 7, p. 11–30, 1989.

- _____; GRAHN, H. **Multivariate Image Analysis in Chemistry and Related Areas: Chemometric Image Analysis**. John Wiley & Sons, Ltd , Chichester, UK, 1996. 227 p.
- _____; KOWALSKI, B. R. Partial least-squares regression: a tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v. 185, p. 1–17, 1986.
- _____; ISAKSSON, H.; LINDQVIST, L.; WOLD, S.; ESBENSEN, K. Principal component analysis of multivariate images. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 5, n. 3, p. 209–220, 1989.
- GENTRY, A.H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, St. Louis, v. 75, p. 1–34, 1988.
- GITHIOMI, J.K.; KARIUKI, J.G. Wood basic density of *Eucalyptus grandis* from plantations in central Rift Valley, Kenya: Variation with age, height level and between sapwood and heartwood. **Journal of Tropical Forest Science**, vol. 22, n. 3, p. 281-286, jul. 2010.
- GLASS, S.; ZELINKA, S.L. Moisture relations and physical properties of wood. In: ROSS, R. (Ed.). **Wood handbook**. Centennial Edition. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. chap. 4, 19 p. FPL-GTR-190.
- GOGÉ, F.; GOMEZ, C.; JOLIVET, C.; JOFFRE, R. Which strategy is best to predict soil properties of a local site from a national Vis–NIR database? **Geoderma**, v. 213, p.1-9, 2014.
- GOMINHO, J.; FIGUEIRA, J.; RODRIGUES, J.; PEREIRA, H. Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid *Eucalyptus grandis* x *urophylla*. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 33, n. 1, p. 3-8, Jan. 2001.
- 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, J.L.M.; 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.
- _____; 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.
- _____; 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.

- _____; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6–27, 2013.
- 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.
- GOWEN, A.A.; O'DONNELL, C.P.; TAGHIZADEH, M.; CULLEN, P.J.; FRIAS, J.M.; DOWNEY, G. Hyperspectral imaging combined with principal component analysis for bruise damage detection on white mushrooms (*Agaricus bisporus*). **Journal of Chemometrics**, v. 22, p. 259-267, 2008.
- GRACE, S.C.; LOGAN, B.A. Energy dissipation and radical scavenging by the plant phenylpropanoid pathway. **Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences**, London, v. 355, n. 1402, p. 1499-1510, 2000.
- GRAHN, H.F.; GELADI, P. **Techniques and Applications of Hyperspectral Image Analysis**. John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- 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.
- GRIFFITHS, P.R. Infrared and Raman instrumentation for mapping and imaging. In: SALZER, R.; SIESLER, H.W. (Eds.). **Infrared and Raman Spectroscopic Imaging**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2009.
- GROSSIORD, C.; SEVANTO, S.; BORREGO, I.; CHAN, A.M.; COLLINS, A.D.; DICKMAN, L.T.; HUDSON, P.J.; McBRANCH, N.; MICHALETZ, S.T.; POCKMAN, W.T.; RYAN, M.; VILAGROSA, A.; McDOWELL, N.G. Tree water dynamics in a drying and warming world. **Plant, Cell and Environment**, v. 40, p. 1861-1873, 2017.
- GUERRERO, C.; ZORNOZA, R.; GÓMEZ, I.; MATAIX-BENEYTO, J. Spiking of NIR regional models using samples from target sites: effect of model size on prediction accuracy. **Geoderma**, v. 158, n. 1, p. 66–77, 2010.
- GUJRAL, P.; AMRHEIN, M.; BONVIN, D. Drift correction in multivariate calibration models using on-line reference measurements. **Anal. Chim. Acta**, v. 642, n. 1, p. 27-36, 2009.
- GUTIÉRREZ, A.; del RÍO, J.C.; GONZÁLEZ-VILA, F.J.; MARTÍN, F. Chemical composition of lipophilic extractives from *Eucalyptus globulus* Labill. wood. **Holzforschung**, v. 53, p. 481-486, 1999.

- HACKE, U.G.; SPERRY, J.S. Functional and ecological xylem anatomy. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, Amsterdam, v. 4, p. 97-115, 2001.
- HADDADI, A.; LEBLON, B.; PIROUZ, Z.; NADER, J.; GROVES, K. Prediction of wood properties for thawed and frozen logs of quaking aspen, balsam poplar, and black spruce from near-infrared hyperspectral images. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 50, p. 221-243, 2016.
- _____; BURGER, J.; LEBLON, B.; PIROUZ, Z.; GROEVES, K.; NADER, J. Using near-infrared hyperspectral images on subalpine fir board. Part 1: Moisture content estimation. **Wood Material Science & Engineering**, London, v. 10, n. 1, p. 27-40, 2015.
- HAGMAN, O. Multivariate prediction of wood surface features using an imaging spectrograph. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Heidelberg, v. 55, n. 6, p. 377-382, 1997.
- 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.
- HE, W.; HU, H. Prediction of hot-water-soluble extractive, pentosan and cellulose content of various wood species using FT-NIR spectroscopy. **Bioresource Technology**, Essex, v. 140, p. 299-305, 2013.
- HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. World agriculture and fertilizer demand, global fertilizer supply and trade 2008-2009. In: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION ENLARGED COUNCIL MEETING, 34., 2008, Ho Chi Minh. **Summary Report...** Paris: IFA, 2008. 10 p.
- 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) – Université 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.
- _____; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforschung**, v. 64, p. 45-54, 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. 2009b.

- _____; 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. 2009c.
- 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.
- HILLIS, W.E. (Ed.) **Wood Extractives and Their Significance to the Pulp and Paper Industries**. Academic Press, 1962. 532 p.
- _____. Biological aspects of heartwood formation. In. **IUFRO Meeting**: Section 41, Melbourne, Australia, 1965. 11 p.
- _____; BROWN, A.G. **Eucalyptus for wood production**. Sydney: Academic Press, 1984. 434 p.
- _____; SUMIMOTO, M. Effect of extractives on pulping. In: ROWE, J.W. (Ed.). **Natural Products of Woody Plants II**. Springer-Verlag, Berlin, p. 880–920, 1989.
- HIRVONEN, T.; ORAVA, J.; PENTTINEN, N.; LUOSTARINEN, K.; HAUTA-KASARI, M.; SORJONEN, M.; PEIPONEN, K.-E. Spectral image database for observing the quality of Nordic sawn timbers. **Wood Science Technology**, v. 48, p. 995-1003, 2014.
- HOFFMEYER, P.; PEDERSEN, J.G. Evaluation of density and strength of Norway spruce wood by near infrared reflectance spectroscopy. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 53, n. 3, p. 165-170, 1995.
- HUANG, H.; LIU, L.; NGADI, M.O. Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety. **Sensors**, v. 14, n. 4, p. 7248-7276, 2014.
- _____; SPERRY, J.S.; WHEELER, J.K.; CASTRO, L. Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency. **Tree Physiology**, Victoria, v. 26, n. 6, p. 689–701, 2006.
- 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.
- IAG/USP - INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS. **Boletim climatológico trimestral da estação meteorológica do IAG/USP - DJF 2013/2014**. Verão. São Paulo: IAG/USP, 2014. 31 p. Seção técnica de serviços meteorológicos.
- IAWA COMMITTEE - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY. **List of microscopic features for wood identification**. IAWA Bulletin, Oakland, v. 10, n. 3, p. 226-332, 1989.
- IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7. ed. Brasília: IBRAM, 2012. 68 p.

- IGNE, B.; ROGER, J.-M.; ROUSSEL, S.; BELLON-MAUREL, V.; HURBURGH, C.R. Improving the transfer of near infrared prediction models by orthogonal methods. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**, v. 99, n. 1, p. 57–65, 2009.
- 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.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório 2017**. 80 p. Disponível em : <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em : 25 fev. 2018.
- IPCC - 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.
- _____. **Climate Change 2014: Synthesis report**. Approved summary for policymakers. Geneva, 2014.
- 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.
- JAMSHIDI, B.; MINAEI, S.; MOHAJERANI, E.; GHASSEMIAN, H. Reflectance Vis/NIR spectroscopy for non destructive taste characterization of Valencia oranges. **Computers and electronics in agriculture**, v.85, p. 64-69, 2012.
- JARMER, T. Spectroscopy and hyperspectral imagery for monitoring summer barley. **Int. J. Remote Sens**, v. 34, n. 17, p. 6067–6078, 2013.
- JIAN JU, L.; 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.
- JIN, S.H.; HUANG, J.Q.; LI, X.Q.; ZHENG, B.S.; WANG, Z.J.; LIU, G.H.; CHEN, M. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. **Tree Physiology**, Amsterdam, v.31, n.10, p. 1142-1151, 2011.
- 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.
- JONES, P.D.; SCHIMLECK, L.R.; SO, C.L.; CLARK, A.; DANIELS, R.F. High resolution scanning of radial strips cut from increment cores by near infrared spectroscopy. **IAWA Journal**, Leiden, v. 28, p. 473 – 484, 2007.

- 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.
- DE JUAN, A.; MAEDER, M.; HANCEWICZ, T.; DUPONCHEL, L.; TAULER, R. Chemometric tools for image analysis. In: SALZER, R.; SIESLER, H.W. (Eds.). **Infrared and Raman Spectroscopic Imaging**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2009.
- KAFKAFI, U. The functions of plant K in overcoming environmental stress situations. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 22., 1990, Soligorsk. **Development of K-fertilizer recommendations**. Soligorsk: International Potash Institute, 1990. P. 65-77.
- 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.
- KOBORI, H.; HIGA, S.; TSUCHIKAWA, S.; KOJIMA, Y.; SUZUKI, S. Segregating wood wastes by repetitive principal component analysis of near infrared spectra. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 25, n. 3, p. 180-187, 2017.
- KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of woodscience and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 592 p.
- KOZLOWSKI, T.T. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. **The Botanical Review**, Lancaster, v. 68, n. 2, p. 270-334, sep. 2003.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press, 1995. 495 p.
- KRONZUCKER, H.J.; BRITTO, D.T. Sodium transport in plants: a critical review. **New Phytologist**, London, v. 189, p. 54-81, 2011.
- KROOSHOF, P.W.T.; POSTMA, G.J.; MELSEN, W.J.; BUYDENS, L.M.C. Evaluation of spectroscopic images. In: SALZER, R. (Ed.). **Biomedical Imaging: Principles and Applications**. John Wiley & Sons Ltd, p. 1-29, 2009. (in press).
- LACHENBRUCH, B.; MCCULLOH, K.A. Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. **New Phytologist**, London, v. 204, n. 4, p. 747-764, 2014.
- LACLAU, J.-P. **Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'*Eucalyptus*: effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais; conséquences pour La gestion des plantations industrielles**. 2001. 146 p. Thèse (Doctorat en Sciences Forestières) – Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2001.
- _____; 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.

- _____; 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.
- LANDIM, P.M.B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e didática**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.
- LARSON, P.R. Silvicultural control of the characteristics of wood used for furnish. In: FOREST BIOLOGY CONFERENCE, 4., 1967, Quebec. **Proceedings...** Quebec: Tappi, 1967. p.143-151.
- LARSON, P.R. **Wood formation and the concept of wood quality**. New Haven: Yale University, School of Forestry 1969. 54 p. (Bulletin, 74).
- LEGOAS, R.C. **Efeito do potássio e do sódio no crescimento e nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* sob duas condições de regime hídrico**. 2015. 138p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- 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. resinifera* 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.
- LENS, F.; TIXIER, A.; COCHARD, H.; SPERRY, J.S.; JANSEN, S.; HERBETTE, S. Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. **Current Opinion in Plant Biology**, Amsterdam, v. 16, p. 287–292, 2013.
- LEPIKSON-NETO, J.; ALVES, A.; SIMÕES, R.; DECKMANN, A.C.; CAMARGO, E.L.O.; SALAZAR, M.M.; RIO, M.C.S.; NASCIMENTO, L.C. do; PEREIRA, G.A.G.; RODRIGUES, J.C. Flavonoid supplementation reduces the extractive content and increases the syringyl/guaiacyl ration in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* hybrid trees. **BioResources**, Raleigh, v. 8, n. 2, p. 1747-1757, 2013.

- LESTANDER, T.A.; GELADI, P.; LARSSON, S.H.; THYREL, M. Near infrared image analysis for online identification and separation of wood chips with elevated levels of extractives. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 20, p. 591-599, 2012.
- LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stresses**. Vol. 1. 2nd Ed. New York: Academic Press, 1980. 607 p.
- LI, B.Y.; HU, Y.; LIANG, Y.Z.; XIE, P.S.; DU, Y.P. Quality evaluation of finger prints of herbal medicine with chromatographic data. **Analytica Chimica Acta**, v. 514, n. 1, p. 69-77, 2004.
- 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.
- LIMA, I.L. do; LONGUI, E.L.; SANTINI JUNIOR, L.; GARCIA, J.N.; FLORSHEIM, S.M.B. Effect of fertilization on cell size in wood of *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 465-472, out./dez. 2010.
- 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.
- LISAR, S.Y.S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M.M.; HASEGAWA, H. Water stress in plants: causes, effects and responses. In: RAHMAN, I.M.M.; HASEGAWA, H. (Ed.). **Water stress**. Oxford: In Tech, 2012. p.300.
- LO GULLO, M.A.; SALLEO, S.; PIACERI, E.C.; ROSSO, R. Relations between vulnerability to xylem embolism and xylem conduit dimensions in young trees of *Quercus cerris*. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 18, p. 661–669, 1995.
- LOBÃO, M. S. **Dendrocronologia, fenologia, atividade cambial e qualidade do lenho de árvores de *Cedrela odorata* L., *Cedrela fissilis* Vell. e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* Hub. Ex Ducke, no estado do Acre, Brasil**. 209 f. Tese (Doutorado em Ciências, Área de concentração em Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.
- LOUSADA, J.L.P.C. **Variação fenotípica e genética em características estruturais na madeira de *Pinus pinaster* Ait.** 1999. 293 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 1999.
- LUNDQVIST, S.-O.; GRAHN, T.; WALLBÄCKS, L. Imaging NIR spectroscopy for investigation of wood and applications on wood materials. In: SANDAK, J.; SANDAK, A. (Eds.). **Workshop: Application of NIR spectroscopy for wood science and technology research**. Book of abstracts. The Italian Society for Near Infrared Spectroscopy – SISNIR, 2014, p. 33-36.

- MA, T.; INAGAKI, T.; TSUCHIKAWA, S. High spatial resolution and non-destructive evaluation of wood density and microfibril angle by NIR hyperspectral imaging. **NIR news**, v. 28, n. 5, p. 7-12, 2017.
- MACDONALD, E.; HUBERT, J. A review of the effects of silviculture on timber quality of *Sitka spruce*. **Forestry**, Oxford, v. 75, n. 2, p. 107–138, Fev. 2002.
- MACFARLANE, C.; ADAMS, M.A. Delta13C of wood in growth-rings indicates cambial activity of drought-stressed trees of *Eucalyptus globulus*. **Functional Ecology**, Oxford, v. 12, n. 4, p.655-664, Ago. 1998.
- MAGALHÃES, W.L.E.; PEREIRA, J.C.D.; BOLZON MUNIZ, G.I.; KLOCK, U.; SILVA, J. R.M. da. Determinação de propriedades de madeira através do infravermelho próximo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8., 2003, São Paulo. Benefícios, produtos e serviços da floresta: oportunidades e desafios do século XXI. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura: Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 2003.
- MAHERALI, H. POCKMAN, W.T.; JACKSON, R.B. Adaptive variation in the vulnerability of wood plants to xylem cavitation. **Ecology**, Washington DC, v. 85, n. 8, p. 2184-2199, 2004.
- 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. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Ceres, 1980. 251 p.
- 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.
- MARIA, V.R.B. **Estudo da periodicidade do crescimento, fenologia e relação com a atividade cambial de espécies arbóreas tropicais de florestas estacionais semidecíduais**. 2002. 145p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

- 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.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J.; PRAT, E.; OLIVERAS, I.; PIÑOL, J. Xylem hydraulic properties of roots and stems of nine Mediterranean woody species. **Oecologia**, Heidelberg, v. 133, p. 19–29, 2002.
- MASRAHI, Y.S. Ecological significance of wood anatomy in two lianas from arid southwestern Saudi Arabia. **Saudi Journal of Biological Sciences**, Amsterdam, v. 21, n. 4, p. 334-341, 2014.
- MAZID, M.; KHAN, T.A.; MOHAMMAD, F. Role of secondary metabolites in defense mechanisms of plants. **Biology and Medicine**, Beaverton, v. 3, n. 2, p. 232-249, 2011. Special Issue.
- McCULLOH, K.A.; SPERRY, J.S. Patterns in hydraulic architecture and their implications for transport efficiency. **Tree Physiology**, Victoria, v. 25, p. 257–267, 2005.
- _____; JOHNSON, D.M.; MEINZER, F.C.; VOELKER, S.L.; LACHENBRUCH, B.; DOMECH, J.-C. Hydraulic architecture of two species differing in wood density: opposing strategies in co-occurring tropical pioneer trees. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 35, p. 116-125, 2012.
- MCDOWELL, N.; POCKMAN, W.T.; ALLEN, C.D.; et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytologist**, Lancaster, v. 178, p. 719–739, 2008.
- MCTI/INPE/CPTEC. Déficit pluviométrico na maior parte das regiões norte e sudeste do Brasil no último trimestre. **Boletim de informações climáticas do CPTEC/INPE**. INFOCLIMA, Cachoeira Paulista, v. 21, n. 10, out. 2014.
- MEDER, R.; MEGLEN, R.R. Near infrared spectroscopic and hyperspectral imaging of compression wood of *Pinus radiata* D. Don. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 18, 2012.
- MEDER, R.; GALLAGHER, S.; MACKIE, K.L.; BÖHLER, H.; MEGLEN, R.R. Rapid determination of the chemical composition and density of *Pinus radiata* by PLS modelling of transmission and diffuse reflectance FTIR spectra. **Holzforschung**, v. 53, n. 3, p. 261-266, 1999.
- 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.
- MENDES, H.S.J.; PAULA, N.F.; SCARPINATTI, E.A.; PAULA, R.C. Respostas fisiológicas de genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* à disponibilidade hídrica e adubação potássica. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 603-611, Dec. 2013.
- 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.
- MORA, C.R.; SCHIMLECK, L.R. Kernel regression methods for the prediction of wood properties of *Pinus taeda* using near infrared spectroscopy. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 44, p. 561-578, 2010.
- _____; SCHIMLECK, L.R.; YOON, S-C.; THAI, C.N. Determination of basic density and moisture content of loblolly pine wood disks using a near infrared hyperspectral imaging system. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 19, p. 401-409, 2011.
- 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.
- MORGAN, J.M. Osmoregulation and water stress in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 35, p. 299-319, 1984.
- MOULIN, J.C.; ARANTES, M.D.C; VIDAURRE, G.B.; PAES, J.B.; CARNEIRO, A.C.O. Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 199-208, 2015.
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 59, p. 651-681, 2008.
- MUTTON, D.B. Wood resins. In: HILLIS, W.E. (Ed.). **Wood Extractives.** Academic Press, New York, p. 331-363, 1962.
- NABAIS, C.; HANSEN, J.K.; DAVID-SCHWARTZ, R.; KLISZ, M.; LÓPEZ, R.; ROZENBERG, P. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us? **Forest Ecology and Management**, v. 408, p. 148-156, jan. 2018.

- 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.
- NAIDOO, S.; ZBOŇÁK, A.; AHMED, F. The effect of moisture availability on wood density and vessel characteristics of *Eucalyptus grandis* in the warm temperate region of South Africa. In: "Wood structure and Properties '06", 2006, Sielnica. **Anais...** Sielnica: IUFRO symposium, Set. 2006, p. 1-8.
- _____; ZBOŇÁK, A.; PAMMENTER, N. W.; AHMED, F. Assessing the effects of water availability and soil characteristics on selected wood properties of *E. grandis* in South Africa. In: IUFRO 2007 WORKING GROUP 2.08.03 MEETING "EUCALYPTS AND DIVERSITY: BALANCING PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY", 2007, Durban. **Anais...** Durban: IUFRO, 2007. p. 1-11.
- NIAMKÉ, F.B.; AMUSANT, N.; KADIO, A.A.; THEVENON, M.-F.; NOURISSIER, S.; ADIMA, A.A.; JAY-ALLEMAND, C.; CHAIX, G. Rapid prediction of phenolic compounds as chemical markers for the natural durability of teak (*Tectona grandis* Linn f.) heartwood by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Sussex, v. 22, p. 35-43, 2014.
- NOORDAM, J.C.; VAN DEN BROEK, W.H.A.M.; GELADI, P.; BUYDENS, L.M.C. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**, v. 75, n. 2, p. 115-126, 2005.
- NOURI, M.; GOMEZ, C.; GORRETTA, N.; ROGER, J.M. Clay content mapping from airborne hyperspectral Vis-NIR data by transferring a laboratory regression model. **Geoderma**, v. 298, p. 54-66, 2017.
- NYSTRÖM, J.; HAGMAN, O. Real-time classification of compression wood in *Picea abies*. **Journal of Wood Science**, Heidelberg, v. 45, p. 30-37, 1999.
- OLANO, J.M.; EUGENIO, M.; GARCÍA-CERVIGÓN, A.I.; FOLCH, M.; ROZAS, V. Quantitative tracheid anatomy reveals a complex environmental control of wood structure in continental Mediterranean climate. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v. 173, p. 137-149, 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.; 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.

- OSBORNE, B.G.; FEARN, T.; HINDLE, P.H. **Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis**. (2nd Ed.). Longman Scientific and Technical, UK, 1993. 227 p.
- Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC. **O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC**. 2011. Disponível em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/organizacao/o-pbmc>> Acesso em: 25 fev. 2018.
- PÁDUA, F.A. de. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 99 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3rd ed. New York: Mcgraw-Hill, 1970. 736 p.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003.
- PETTIGREW, W.T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. **Plant Physiology**, Rockville, v. 133, p. 670-681, 2008.
- PIERNA, J.A.F.; DARDENNE, P. Soil parameter quantification by NIRS as a Chemometric challenge at 'Chimimétrie 2006. **Chemom. Intell. Lab. Syst**, v. 91, n. 1, p. 94–98, 2008.
- PILLOW, M. A new method for detecting compression wood. **J. Forest.**, v. 39, p. 385-387, 1941.
- PINKARD, E. Climate change: threat or opportunity? **Australian Forestry**, v. 80, n. 4, p. 195-196, 2017.
- PITTERMANN, J.; SPERRY, J.S.; WHEELER, J.K.; HACKE, U.G.; SIKKEMA, E.H. Mechanical reinforcement of tracheids compromises the hydraulic efficiency of conifer xylem. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 29, p. 1618–1628, 2006.
- POKE, F.S.; WRIGHT, J.K.; RAYMOND, C.A. Predicting extractives and lignin contents in *Eucalyptus globulus* using near infrared reflectance analysis. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 24, n. 1, p. 55-67, 2004.
- POOLE, D.J. Diameter growth of 4 - 7 year old *Eucalyptus regnans*. **New Zealand Forestry**, Wellington, v. 31, n. 1, p. 23, 1986.
- PRATS-MONTALBÁN, J. M.; DE JUAN, A.; FERRER, A. Multivariate image analysis: A review with applications. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 107, n. 1, p. 1–23, 2011.
- _____; JEREZ-ROZO, J. I.; ROMANACH, R. J.; FERRER, A. MIA and NIR Chemical Imaging for pharmaceutical product characterization. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 117, p. 240–249, 2012.

- PU, Y.-Y.; SUN, D.-W.; RICCIOLI, C.; BUCCHERI, M.; GRASSI, M.; CATTANEO, T.M.P.; GOWEN, A. Calibration transfer from micro NIR spectrometer to hyperspectral imaging: A case study on predicting soluble solids content of bananito fruit (*Musa acuminata*). **Food Analytica Methods**, 2017. 13 p. DOI: 10.1007/s12161-017-1055-3.
- QMS - QUINTEK MEASUREMENT SYSTEMS. **Tree ring analyzer users guide** - Model QTRS-01X. Knoxville, 1999. 72 p.
- RAMBAL, S. *Quercus ilex* facing water stress: a functional equilibrium hypothesis. **Plant Ecology**, Belgium, v. 99-100, p. 147–153, 1992.
- 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 Forest Resources**, Ottawa, v. 30, n. 1, p. 136–144, 2000.
- 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.
- REICH, P.B. The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: A traits manifesto. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 102, p. 275-301, 2014.
- REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; FONTAN, I.C.I.; MONTE, M.A.; GOMES, A.N.; OLIVEIRA, C.H.R. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbrido de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* X *Eucalyptus spp* submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-931, 2006.
- RENGASAMY, P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 37, p. 613-620, 2010.
- 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.
- ROBERT, E.M.R.; KOEDAM, N.; BEECKMAN, H.; SCHMITZ, N. A safe hydraulic architecture as wood anatomical explanation for the difference in distribution of the mangroves *Avicennia* and *Rhizophora*. **Functional Ecology**, London, v. 23, p. 649-657, 2009.
- 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.

- 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.
- 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.
- RODRIGUES-NAVARRO, A.; RUBIO, F. High-affinity potassium and transport systems in plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 5, p. 1149–1160, mar. 2006.
- ROGER, J.-M.; CHAUCHARD, F.; BELLON-MAUREL, V. EPO-PLS external parameter orthogonalisation of PLS application to temperature-independent measurement of sugar content of intact fruits. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**, v. 66, n. 2, p. 191-204, 2003.
- ROGER, J.-M.; CHAUCHARD, F.; WILLIAMS, P. Removing the block effects in calibration by means of dynamic orthogonal projection. Application to the year effect correction for wheat protein prediction. **J. Near Infrared Spectrosc.**, v. 16, n. 3, p. 311–315, 2008.
- RÖMHELD, V.; KIRKBY, E.A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, p. 155-180, 2010.
- ROSNER, S.; SVĚTLÍK, J.; ANDREASSEN, K.; BØRJA, I.; DALSGAARD, L.; EVANS, R.; KARLSSON, B.; TOLLEFSRUD, M.M.; SOLBERG, S. Wood density as a screening trait for drought sensitivity in Norway spruce. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 44, p. 154–161, 2014.
- ROWE, J.W. (Ed.). **Natural Products of Woody Plants II**. Springer-Verlag, Berlin, 1989. 1243 p.
- SALLEO, S.; LO GULLO, M.A. Drought resistance strategies and vulnerability to cavitation of some Mediterranean sclerophyllous trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCH, A. (Eds.), **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge University Press, Cambridge, pp 99–113, 1993.
- 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.
- 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, M.F.P. **Desenvolvimento e validação de métodos de espectroscopia no infravermelho próximo e médio para caracterização de lamas de ETAR para uso agrícola**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biológica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
- 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.
- SANTOS, R.B.; GOMIDE, J.L.; SOUSA, L.C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Revista Árvore**, v. 33, n. 4, p. 759-767, 2009.
- SAS INSTITUTE. **Statistical analysis system user's guide**: version 6.08. Cary, 1997. 1014 p.
- 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: SBCS; SLCS, 1996. 1 CD-ROM.
- SCHIMLECK, L.R.; EVANS, R. Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, p. 66-73, 2004.
- _____; MITCHELL, A.J. Determination of kraft pulp yield using near infrared spectroscopy. **TAPPI Journal**, v. 81, n. 1, p. 229–236, 1998.
- _____; 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.
- SCHRIEVE, G.D.; MELISH, G.G.; ULLMAN, A.H. The Herschek-Infrared – A useful part of the spectrum. **Applied Spectroscopy**, v.45, p.711-714, 1991.
- SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMINGSEN, E.A.; BRADSTREET, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy Science**, Washington DC, v. 51, p. 119-125, 1965.
- SCHOLZ, A.; KLEPSCH, M.; KARIMI, Z.; JANSEN, S. How to quantify conduits in wood? **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 1-11, 2013.
- 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.
- SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings: basics and applications of dendrocronology**. Amsterdam: Kluwer Academic, 1988. 292 p.
- SCHWANGHART, W.; JARMER, T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography—a case study from south-eastern Spain. **Geomorphology**, v. 126, n. 1, p. 252–263, 2011.
- 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.
- SCOTT, C.E.; MONKS, S.A.; SPRAKLEN, D.V.; ARNOLD, S.R.; FORSTER, P.M.; RAP, A.; ÄIJÄLÄ, M.; ARTAXO, P.; CARSLAW, K.S.; CHIPPERFIELD, M.P.; EHN, M.; GILARDONI, S.; HEIKKINEN, L.; KULMALA, M.; PETÄJÄ, T.; REDDINGTON, C.L.S.; RIZZO, L.V.; SWIETLICKI, E.; VIGNATI, E.; WILSON, C. Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. **Nature Communications**, v. 9, n. 157, 2018. 9 p.
- SEARSON, M. J.; THOMAS, D. S.; MONTAGU, K. D.; CONROY, J.P. Wood density and anatomy of water-limited eucalypts. **Tree Physiology**, Victoria, v 24, n. 1, p. 1295-1302, Nov. 2004.
- SECCHI, F.; PAGLIARANI, C.; ZWIENIECKI, M.A. The functional role of xylem parenchyma cells and aquaporins during recovery from severe water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 40, n. 6, p. 858-871, 2017.
- SEGLA, K.N.; RABIOU, H.; ADJONOU, K.; GUIBAL, D.; BATIONO, A.B.; MAHAMANE, A.; KOKOU, K.; LANGBOUR, P.; KOKUTSE, A.D.; CHAIX, G. Useful near infrared spectroscopy model calibrations on solid wood samples of *Pterocarpus erinaceus* (Poir.) for physical, mechanical and colour properties. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 25, n. 4, p. 256-266, 2017.
- 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.
- _____; DEUS JUNIOR, J.C, TOMAZELLO FILHO, M.; PÁDUA, F.A, CALIL, F.N.; LACLAU, J.-P. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. **CERNE**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 251-258, Jun. 2014.
- _____; 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.
- SHAO, H.B.; CHU, L.Y.; JALEEL, C.A.; ZHAO, C.X. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.
- SHENK, J.S.; WESTERHAUS, M.O. New standardization and calibration procedures for NIRS analytical systems. **Crop Sci.**, v. 31, n. 6, p. 1694–1696, 1991.
- SHVALEVA, A.L.; SILVA, F.C.E.; BREIA, E.; JOUVE, L.; HAUSMAN, J.F.; ALMEIDA, M.H.; MAROCO, J.P.; RODRIGUES, M.L.; PEREIRA, J.S.; CHAVES, M.M. Metabolic responses to water deficit in two *Eucalyptus globulus* clones with contrasting drought sensitivity. **Tree Physiology**, Victoria, v. 26, p. 239-248, 2005.
- 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, C.S. **Uso de imagens hiperespectrais na região do infravermelho próximo para identificar fraudes em documentos**. 2013. 80 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- 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.; MATOS, J.L.M.; OLIVEIRA, J.T.S.; EVANGELISTA, W.V. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005.

- _____; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 61, p. 279-291, Dez. 2007.
- _____; OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JR.; S.; MATOS, J.L.M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Paraná, v.34, n.1, p.13-22, jan./abr. 2004.
- 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.
- _____; 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.
- SILVÉRIO, F.O. **Caracterização de extrativos de madeira de *eucalyptus* e depósitos de *pitch* envolvidos na fabricação de celulose e papel**. 2008. 157 p. Tese (Doutorado em Ciências – Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry: Fundamentals and Application**. Academic Press, UK, 1993. 293 p.
- SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; CROUCH, S.R. **Principles of Instrumental Analysis**. Brooks Cole, 2006.
- SO, C.L.; VIA, B.K.; GROOM, L.H.; SCHIMLECK, L.R.; SHUPE, T.F.; KELLEY, S.S.; RIALS, T.G. Near infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest. Prod. J.**, v. 54, n. 1, p. 6-16, 2004.
- SPERRY, J.S. Evolution of water transport and xylem structure. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v. 164 (3 suppl), p. S115–S127, 2003.
- _____; HACKE, U.G.; PITTERMANN, J. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. **American Journal of Botany**, St. Louis, v. 93, n. 10, p. 1490–1500, 2006.
- _____; MEINZER, F.C.; MCCULLOH, K.A. Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 31, p. 632–645, 2008.
- _____; 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.

- STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis-urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219-234, 2004.
- STEPPE, K.; STERCK, F.; DESLAURIERS, A. Diel growth dynamics in tree stems: Linking anatomy and ecophysiology. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 6, p. 335-343, 2015.
- _____; 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.
- _____; ITO, O.; BERRY, W.L.; WHEELER, R.M. Sodium: a functional plant nutrient. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 22, n. 5, p. 391-416. Set. 2003.
- STEVANOVIC, T.; PERRIN, D. **Chimie du bois**. PPUR, 2009. 242 p.
- SWAN, B.; ÅKERBLOM, I.S. Wood extractives from *Eucalyptus globulus* Labill. **Svensk Papperstidn**, v. 70, p. 239-244, 1967.
- TAGHIZADEH, M.; GOWEN, A.; WARD, P.; O'DONNELL, C. Use of hyperspectral imaging for evaluation of the shelf-life of fresh white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in different packagingfilms. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 11, p. 423-431, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.
- TARDIEU, F. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 337, p. 57-67, 2005.
- TEIXEIRA, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JUNIOR, J.C.; DEZORDI, C. *Eucalyptus* sp. seedling response to potassium fertilization and soil water. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 47-63, jan.-mar. 2008.
- _____; LEAL, P.G.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Nutrición potásica y relaciones em plantas de *Eucalyptus spp*. **Bosque**, Valdivia, v. 16, n. 2, p. 61-68, 1995.
- THUMM, A.; RIDDELL, M.; NANAYAKKARA, B.; HARRINGTON, J.; MEDER, R. Near infrared hyperspectral imaging applied to mapping chemical composition in wood samples. **Journal of Near Infrared Spectroscopic**, Chichester, v. 18, p. 507-515, 2010.
- _____; RIDDELL, M.; NANAYAKKARA, B.; HARRINGTON, J.; MEDER, R. Mapping within-stem variation of chemical composition by near infrared hyperspectral imaging. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 24, n. 6, p. 605-616, 2016.
- TOMAZELLO FILHO, M. 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.
- _____. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 37-45, 1985.

- _____. **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.
- TORRAS-CLAVERIA, L.; JÁUREGUI, O.; CODINA, C.; TIBURCIO, A.F.; BASTIDA, J.; VILADOMAT, F. Analysis of phenolic compounds by high-performance liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry in senescent and water-stressed tobacco. **Plant Science**, Oxford, v. 182, p. 71-78, 2012.
- TRAN, T.N.; WEHRENS, R.; BUYDENS, L.M.C. Clustering multispectral images: A tutorial. **Chemom. Intell. Lab. Syst.**, v. 77, p. 3-17, 2005.
- 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.
- _____. **Anatomia ecológica do lenho de espécies arbustivas e arbóreas que ocorrem naturalmente em bosques com drástico gradiente de precipitação ao Noroeste da Patagônia, Argentina**. 2016. 196p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- 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.
- _____; GOULART, S.L.; ASSIS, C.O de.; COUTO, F.B.S.; ALVES, I.C.N.; PROTÁSIO, T.P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, abr. 2015.
- 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.
- _____; KOBORI, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**, v. 61, p. 213-220, 2015.
- _____; 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.
- TURTOLA, S.; MANNINEN, A.-M.; RIKALA, R.; KAINULAINEN, P. Drought stress alters the concentration of wood terpenoids in scots pine and Norway spruce seedlings. **Journal of Chemical Ecology**, New York, v. 29, n. 9, p. 1981-1995, sep. 2003.
- TYREE, M.T.; EWERS, F.W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. Transley review no. 34. **New Phytologist**, Lancaster, v. 119, p. 345-360, 1991.
- _____; SPERRY, J.S. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 19-38, 1989.
- _____; DAVIS, S.D.; COCHARD, H. (1994) Biophysical perspectives of xylem evolution: is there a tradeoff of hydraulic efficiency for vulnerability to dysfunction? **IAWA Journal**, Leiden, v. 15, n. 4, p. 335-360, 1994.
- 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.; 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.

- VAN KEMPEN, T.; JACKSON, D. NIRS may provide rapid evaluation of amino acids. **Feedstuffs**, v. 68, n. 50, p. 12-15, 1996.
- VETTER, R.E. Growth periodicity and age of Amazonian tree species. Methods for their determination. In: ROIG, F.A. (Ed.). **Dendrocronología en América Latina**. Mendoza: EDIUNC, 2000. P. 135-155.
- VIANA, L.C.; 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.
- VIDAL, M.; AMIGO, J.M. Pre-processing of hyperspectral images. Essential steps before image analysis. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 117, p. 148-148, 2012.
- VIEIRA, J.; NABAIS, C.; ROSSI, S.; CARVALHO, A.; FREITAS, H.; CAMPELO, F. Rain exclusion affects cambial activity in adult maritime pines. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237-238, p. 303-310, 2017.
- VITAL, B.R. Reflexos da fertilização mineral na qualidade e na utilização da madeira. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.
- WAGNER, K.R.; FRANK, F.W.; DAVIS, S.D. Tradeoffs between hydraulic efficiency and mechanical strenght in the stems of four co-occurring species of chaparral shrubs. **Oecologia**, Heidelberg, v. 117, p. 53–62, 1998.
- 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.
- WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; Near-infrared spectroscopy for within-field soil characterization: small local calibrations compared with national libraries spiked with local samples. **Eur. J. Soil Sci.**, v. 61, n. 6, p. 823–843, 2010.
- WHEELER, J.K.; SPERRY, J.S.; HACKE, U.G.; HOANG, N. Inter-vessel pitting and cavitation in woody Rosaceae and other vesselled plants: a basis for a safety versus efficiency trade-off in xylem transport. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 28, p. 800–812, 2005.
- 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.
- WILLIAMS, P.; DARDENNE, P.; FLINN, P. Tutorial: Items to be included in a report on a near infrared spectroscopy project. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 25, n. 2, p. 85-90, 2017.

- _____; 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.
- _____; P. The RPD statistic: a tutorial note. **NIR News**, v. 25, n.1, p. 22-26, 2014.
- WIMMER, R. Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1-2, p. 21-36, 2002.
- _____; 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.
- WINKEL-SHIRLEY, B. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. **Current Opinion in Plant Biology**, Amsterdam, v. 5, n. 3, p. 218-223, jun. 2002.
- WOODWARD, F.I. Plant responses to past concentration of CO₂. **Vegetatio**, v. 104/105, p. 145-155, 1993.
- WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 58, n. 2, p. 109–130, 2001.
- WORKMAN JR, J.; WEYER, L. **Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy**. Boca Raton: CRC Press, 2008. 332 p.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **World Meteorological Organization**. 2018. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en>>. Acesso em: 25 fev. 2018.
- WRIGHT, S.J.; YAVITT, J.B.; WURZBURGER, N.; TURNER, B.L.; TANNER, E.V.J.; SAYER, E.J.; SANTIAGO, L.S.; KASPARI, M.; HEDIN, L.O.; HARMS, K.E.; GARCIA, M.N.; CORRE, M.D. Potassium, phosphorus, or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland Tropical Forest. **Ecology**, Ithaca, v. 92, n. 8, p. 1616-1625, 2011.
- WU, Z.; DIJKSTRA, P.; KOCH, G.W.; PEÑUELAS, J.; HUNGATE, B.A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. **Global Change Biology**, London, v. 17, p. 927–942, 2011.
- YAZAKI, Y.; HILLIS, W.E. Polyphenols of *Eucalyptus globulus*, *E. regnans* and *E. deglupta*. **Phytochem**, v. 15, p. 1180–1182, 1976.
- ZANUNCIO, A.J.V.; CARVALHO, A.G.; TRUGILHO, P.F.; MONTEIRO, T.C. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. **Rev. Árvore**, v. 38, n. 2, mar./apr. 2014.
- ZAVARIN, E.; JONES, S.J.; COOL, L.G. Analysis of solid wood surfaces by diffuse reflectance infrared Fourier-transform (DRIFT) spectroscopy. **J. Wood Chem. Technol**, v. 10, n. 1, p. 495-513, 1990.

- ZHANG, X.; DENG, L.; BAAS, P. The ecological wood anatomy of the Lilacs (*Syringa oblata* var. *giraldii*) on Mount Taibei in North-western China. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 9, n. 1, p. 24-30, 1988.
- 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.
- ZHAO, X. Effects of cambial age and flow path-length on vessel characteristics in birch. **Journal of Forest Research**, Berlin, v. 20, p. 175-185, 2015.
- ZIMMERMANN, M.H. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. **Can J Bot**, v. 56, p. 2286–2295, 1978.
- _____. Functional anatomy of angiosperm trees. In: BAAS, P. (Ed.). **New perspectives in wood anatomy**. Nijhoff/Junk, The Hague, pp 59–70, 1982.
- _____. **Xylem structure and the ascent of sap**. Springer, Berlin, 1983.
- _____; BROWN, C.L. **Trees: Structure and Function**. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1971.
- ZOBEL, B.J. Silvicultural effects on wood properties. **IPEF International**, Piracicaba, n. 2, p. 31-38, 1992.
- _____; VAN 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.
- _____; ZIMMERMANN, L.; ZEUGIN, F.; NEWBERY, D.M. Intra-annual radial growth and water relations of trees – implications towards a growth mechanism. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, p. 1445–1459, 2006.