Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Resposta hiperespectral na determinação do conteúdo de água na folha em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp.

Taila Fernanda Strabeli

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

Taila Fernanda Strabeli
Engenheira Florestal

Resposta hiperespectral na determinação do conteúdo de água na folha em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp.

Orientador:
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

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

Strabeli, Taila Fernanda
Resposta hiperespectral na determinação do conteúdo de água na folha em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. / Taila Fernanda Strabeli. - - Piracicaba, 2016.
108 p. : il.

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

1. Sensores hiperespectrais 2. Comportamento espectral 3. Conteúdo relativo de água 4. Densidade equivalente da água 5. Modelos de regressão I. Título

CDD 634.9734
S894r

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

Dedico

aos meus pais, ***Maria Aparecida e Silvano****,*

minhas grandes inspirações,

que me ensinaram os caminhos corretos com todo o amor e paciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos da vida.

À minha mãe *Maria Aparecida* e meu pai *Silvano* pela compreensão e incentivo durante toda a minha trajetória.

À minha *vó Fia* e *vô Lindo* por todo o amor e carinho.

Ao meu querido irmão *William Strabeli* e cunhada *Patrícia Cilindri* pelo apoio e preocupação de sempre. Aos meus pequenos amores *Julia* e *Sofia* por toda a alegria que me trazem.

Ao meu orientador *Peterson Ricardo Fiorio* pelo apoio, conhecimento e confiança no desenvolvimento do projeto e principalmente pela paciência.

Ao Prof. *Carlos Alberto Vettorazzi* pelo apoio e conhecimento compartilhado.

Ao Prof. *Rubens Coelho* pelo auxílio com material para a execução do projeto.

Ao Prof. *José Luiz Stape* e *Clayton Alvares* pelo convite de desenvolvimento da pesquisa no projeto TECHS.

À funcionária do departamento de topografia *Lucia Monteiro* pelos inegáveis convites para o café.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), que por meio do projeto PROSENSAP, possibilitou a aquisição do espectroradiômetro utilizado neste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por fomentar o projeto de pesquisa n°2013/22435-9 pela compra do *leaf clip* utilizado neste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Ao *Hugo Seixas* e *Pedro Barros* pelo carinho, amizade e apoio de campo, seria impossível sem a ajuda de vocês.

À *Ivanka Rosada*, *Mauricio Martello* e *Tiago Tavares*, minha família piracicabana, por todo companheirismo e amizade sincera.

Aos meus amigos de laboratório e pós-graduação *Leonardo Possada*, *Érica Nakai*, *Ana Paula Barbosa*, *Juliano Martins*, *Arnaldo Souz*a, *Danilo Romero*, *Wanderlei Bieluczyk* e *Elizabeth Carneviskis* pelas discussões acadêmicas e pelos intervalos para o café.

Aos auxiliares de pesquisa *Gustavo Morone* (Pok-sombra), *Marcela Bruscagin* (Bitcha), *Anna Karoline* (Cãp-Qiq), *Guilherme Bueno*, *Isa Rolisola* (Sem bela) *Mariana Brochine* (Ativa) pela disposição em ajudar sempre e à todos os alunos que passaram pelo grupo de pesquisa TopoGeo.

Aos meus companheiros de casa/lar *Priscila Geroto*, *Caroline Garcia*, *Lucas Milani*, *Samira Chammas* pelos momentos inesquecíveis, amizade e aprendizagem.

Aos meus queridos amigos *Alice Martinez*, *Jacqueline Nepomuceno*, *Ana Calixto*, *Paola Aprile*, *Naira Besteti*, *Roberto C. Filho*, *Guilherme Tavares*, *Victória Pires*, *William O. Bertoloto*, *Alexandre Pessenda*, *Gabriel Goyos*, *João Paulo Vieira* e *Daniel Brasil* que se fizeram presentes em muitos momentos.

EPÍGRAFE

"Uma Jornada de mil quilômetros começa com um único passo."
Lao Tsu

SUMÁRIO

RESUMO 13
ABSTRACT 15
LISTA DE FIGURAS 17
LISTA DE TABELAS 19
1 INTRODUÇÃO 21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23
2.1 Considerações sobre o gênero *Eucalyptus* 23
2.2 A água e a Planta 24
2.3 Sensoriamento Remoto 25
2.3.1 Sensoriamento Remoto aplicado à vegetação 26
2.3.2 Sensoriamento Remoto e modelos para predição de água em outras culturas 28
Referências 29
3 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA, OBTIDO PELO MÉTODO DE DESIDRATAÇÃO, SOBRE COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE FOLHAS DE *Eucalyptus* spp. 33
Resumo 33
Abstract 33
3.1 Introdução 34
3.2 Material e Métodos 35
3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo 35
3.2.2 Descrição da área de estudo 36
3.2.3 Amostragem Foliar 37
3.2.4 Determinação do Conteúdo Relativo de Água 38
3.2.5 Obtenção dos dados hiperespectrais em laboratório 39
3.2.6 Aquisição sucessiva da massa, pelo método de desidratação, para determinação do conteúdo relativo de água e leituras espectrais 39
3.2.7 Avaliação do Conteúdo Relativo de Água em *Eucalyptus* 41
3.2.8 Análise descritiva e de sensibilidade do comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus* 41
3.2.9 Análise estatística do comportamento espectral 42
3.2.9.1 Pré- tratamento dos dados espectrais 42

3.2.9.2 Análise estatística das curvas espectrais 42
3.3 Resultados e Discussão 43
3.3.1 Análise do Conteúdo Relativo de Água para folhas frescas (CRA_U)..... 43
3.3.1.1 Análise estatística do Conteúdo Relativo de Água para folhas frescas..... 43
3.3.1.2 Análise descritiva das respostas hiperespectrais das folhas das diferentes espécies de *Eucalyptus*, no tempo úmida 44
3.3.1.3 Análise de Componentes principais das respostas hiperespectrais obtidas das folhas frescas (CRA_U) 46
3.3.2 Avaliação da influência da perda progressiva do Conteúdo Relativo de Água, pelo método de desidratação de folhas, no comportamento espectral 49
3.3.2.1 Análise da variação do CRA pelo método de desidratação..... 50
3.3.2.2 Análise estatística entre os CRA obtido pelo método de desidratação 52
3.3.2.3 Análise descritiva da influência da perda progressiva da água, pelo método de desidratação, sobre o comportamento espectral das folhas de *Eucalyptus* 53
3.3.2.4 Análise estatística dos dados espectrais em função da variação do CRA 62
3.4 CONCLUSÃO 65
Referências..... 66
4 MODELOS ESPECTRAIS PARA A ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA EM FOLHAS DE *Eucalyptus*..... 71
Resumo..... 71
Abstract 71
4.1 Introdução 72
4.2 Material e Métodos 74
4.2.1 Localização e caracterização da área de estudos..... 74
4.2.2 Descrição da área de estudo 75
4.2.3 Amostragem Foliar..... 76
4.2.4 Determinação do Conteúdo Relativo de Água 77
4.2.5 Determinação da densidade equivalente da água 78
4.2.5.1 Determinação da Área Foliar 78
4.2.6 Obtenção dos dados hiperespectrais em laboratório 79
4.2.7 Aquisição sucessiva da massa para determinação do conteúdo de água e comportamento espectral..... 80
4.2.8 Determinação do Conteúdo de água em folhas por dados hiperespectrais 81
4.2.8.1 Pré- tratamento dos dados espectrais espectrais..... 81

4.2.8.2 Relação entre os parâmetros da água e os dados hiperespectrais 82
4.2.8.3 Desempenho dos índices espectrais levantados na literatura para predição do conteúdo de água 82
4.2.8.4 Construção do modelo para predizer conteúdo de água em folhas..... 84
4.2.8.4.1 Seleção de variáveis para obtenção dos modelos..... 84
4.2.8.4.1.1 Seleção de variáveis pelo coeficiente de determinação..... 84
4.2.8.4.1.2 Seleção de variáveis pelo método *stepwise* 85
4.2.8.4.2 Validação dos modelos..... 85
4.3 Resultados e discussão 86
4.3.1 Relação entre o conteúdo de água na folha de *Eucalyptus* e os dados hiperespectrais..... 89
4.3.2 Performance dos índices espectrais levantados na literatura para a predição de água..... 90
4.3.3 Construção do modelo espectral 94
4.3.3.1 Seleção de variáveis preditoras..... 95
4.3.3.1.1 Seleção de variáveis preditoras pelo coeficiente de determinação 95
4.3.3.1.2 Seleção de variáveis preditoras pelo método de *stepwise* 98
4.3.3.2 Calibração de Modelos para a predição do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus* 99
4.4 Conclusão 102
Referências 102

RESUMO

Resposta hiperespectral na determinação do conteúdo de água na folha em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp.

Avaliar o estado hídrico das plantas é essencial para o monitoramento das culturas agrícolas e florestais. A interação da radiação eletromagnética com as plantas é um processo estudado por sensoriamento remoto (SR). Através da técnica de SR é possível interpretar os fatores que influenciam na quantidade de energia absorvida, transmitida e refletida pela planta. Neste estudo, buscou-se estabelecer as relações existentes entre variações nos parâmetros da água com o comportamento espectral e gerar modelos matemáticos que sejam capazes de predizer o conteúdo relativo da água (CRA) e espessura equivalente da água (EEA) em 11 diferentes espécies de *Eucalyptus*, utilizando um sensor hiperespectral. Os dados foram obtidos por meio da pesagem e respectiva leitura espectral das folhas, sendo que estas passaram por uma metodologia de desidratação. Tal metodologia permitiu encontrar uma diferença de reflectância média de 26% entre o máximo e mínimo teor de água na folha, provando a influência do CRA no comportamento espectral, sendo a água um dos fatores de maior domínio na reflectância na região do infravermelho médio (1300nm – 2500nm). A partir das curvas espectrais foi possível avaliar que os comprimentos de onda próximo ao 1400 nm e 1900 nm foram os mais sensíveis ao conteúdo de água. A análise de componentes principais permitiu reforçar estes resultados, uma vez que as pontuações (*scores*) dos componentes que apresentaram correlações significativas com o CRA tiveram maiores pesos (*loadings*) nas regiões espectrais citadas anteriormente. A partir das respostas espectrais também foram realizados os cálculos dos índices espectrais já descritos em literatura, e estes submetidos a análise de regressão simples para predição do CRA e EEA. O índice espectral calculado com a combinação de bandas do infravermelho médio (1300nm e 1450nm) foi o que apresentou melhores resultados ao predizer os parâmetros da água, sendo que o $SR_{1300,1450}$ teve um R^2=0,72 para o CRA e R^2=0,81 para o EEA. Os dados espectrais foram correlacionados com os parâmetros da água, e encontrou-se que para o CRA o comprimento de onda 1881 nm apresentou um coeficiente de correlação máximo negativo de r= -0,89, enquanto que o EEA apresentou um coeficiente de correlação máximo negativo de r= -0,79 no comprimento de onda 2165 nm. Foram testados três métodos de seleção das variáveis hiperespectrais para gerar um modelo matemático por meio de uma regressão linear. Para o parâmetro CRA, o método de seleção de variáveis *stepwise* foi o que gerou o maior (R^2= 0,86) e um RMSE = 13,85%, sendo que neste método restaram apenas seis variáveis preditoras. Enquanto que o método de seleção de variáveis pelas regiões do espectro foi o mais preciso ao predizer o parâmetro EEA, com um R^2= 0,87 e um RMSE = 0,00012 g/cm², sendo necessárias apenas 5 variáveis espectrais.

Palavras-chave: Sensores hiperespectrais; Comportamento espectral; Conteúdo relativo de água; Densidade equivalente da água; Modelos de regressão

ABSTRACT

Hyperespectral response for determining the water content in leaves of different species of *Eucalyptus* spp.

The hydric condition assessment of plants is essential for monitoring agricultural and forest cultures. The interaction of electromagnetic radiation with plants is a process studied by remote sensing. Through this technique it is possible to interpret the factors that plays influence on the quantity of energy absorbed, transmitted and reflected by the plant. In this study was sought the establishment of existing relations between variations on the water parameters and the spectral behavior and then to generate mathematical models capable of predictiong the relative water content (RWC) and equivalent water thickness (EWT) among 11 different *Eucalyptus* species using a hyperespectral sensor. The data was obtained through weighting followed by reflectance readings of leaves in which the leaves had gone through a dehydrating methodology. The dehydrating methodology allowed finding a average reflectance difference of 26% between the maximum and the minimum water content on the leaf, proving the influence of the RWC in the spectral behavior in which the water plays great influence in the medium infrared reflectance region (1300 nm – 2500 nm). From the spectral curves it was possible to conclude that the wavelengths near 1400 nm and 1900 nm were the most sensitive to the water content. The principal content analyses reinforced these results once the scores of the components that showed significant relations with the RWC had the bigger loadings in the mentioned spectral regions. Spectral indices already described in literature were calculated using the spectral responses and their results were submitted to a simple regression for predicting RWC and EWT. The spectral index calculated by the combination of medium infrared (1300 nm and 1450 nm) was the one which had better results when prediction water parameters in which SR… had an R^2=0,72 for RWC and R^2=0,81 for EWT The spectral data was correlated to the water parameters and it was observed that for the RWC at 1881 nm showed a maximum negative coefficient of correlation of r=-0,89 whereas the EWT showed a maximum negative coefficient of correlation of r=-0,79 at 2165 nm. Three selection methods were tested for the hyperespectral variables in order to generate a mathematical model through linear regression. For the RWC parameter, the selection method of stepwise variables was the one which generated and R^2=0,86 and a RSMSE = 13,85%. For this method just 6 predicting variables were left. While the variables selection method by spectral regions was the most precise when predicting the EWTparameter with a R^2 = 0,87 and a RMSE = 0,00012 g/cm² being just 5 spectral variables necessary.

.

Keywords: Hyperespectral sensors; Spectral behaviour; Relative water content; Equivalent water thickness; Regression models

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de fator de reflectância direcional-hemisférica típica de uma folha verde de *Eucalyptus* 27
Figura 2 - Gráfico de precipitação média anual e do mês de dezembro de 2015 do município de Piracicaba 36
Figura 3 - Localização ilustrativa da folha coletada A- posição dos terços da árvore, B- posição da folha em quatro pontos opostos da árvore, C- folha coletada no ramo 37
Figura 4 - A- Árvore selecionada e marcada, B-Identificação das folhas de *Eucalyptus* coletadas em campo, C- Folhas colocadas em gelo e D- Visão aproximada de uma folha do terço médio 38
Figura 5 - Organograma da obtenção progressiva do CRA e da radiometria 41
Figura 6 - Comportamento espectral médio das diferentes espécies de *Eucalyptus*, após serem coletadas em campo (CRA_U) 45
Figura 7 - Análise de Componentes Principais entre as espécies do gênero *Eucalyptus* (A) Scores das CP1 x CP2 (B) Scores das CP1 x CP3 (C) Loadings da CP1, CP2 e CP3 48
Figura 8 - Representação gráfica dos valores médios do CRA das diferentes espécies de *Eucalyptus*, em diferentes tempos de secagem (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) e para as folhas no tempo T e U 50
Figura 9 - A- Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água 54
Figura 10 - Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *Eucalyptus saligna*, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água 58
Figura 11 - Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água 60
Figura 12 - A-Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *Eucalyptus benthamii*, B- Diferença entre a reflectância pelos

comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água 61
Figura 13 - (A) Gráfico de Componentes Principais em função dos tempos, (B) Gráfico de Componentes Principais em função das espécies e (C) Gráfico de *loadings* das Componentes Principais 63
Figura 14 - Variação do fator de reflectância em função do tempo de secagem 64
Figura 15 - Gráfico de precipitação média anual e do mês de dezembro de 2015 do município de Piracicaba 75
Figura 16 - Localização ilustrativa da folha coletada A- posição dos terços da árvore, B- posição da folha em quatro pontos opostos da árvore, C- folha coletada no ramo . 76
Figura 17 - A- Árvore selecionada e marcada, B-Identificação das folhas de *Eucalyptus* coletadas em campo, C- Folhas colocadas em gelo e D- Visão aproximada de uma folha do terço médio 77
Figura 18 - Organograma da obtenção progressiva do conteúdo relativo de água (CRA) e da densidade equivalente da água (EEA) e da radiometria 81
Figura 19 - Mudança do CRA e o EEA em função do tempo de secagem 87
Figura 20 - Comportamento espectral mínimo, médio e máximo de folhas de *Eucalyptus* 88
Figura 21 - Correlação entre o fator de reflectância e (A) Conteúdo Relativo de Água-CRA e (B) Espessura Equivalente da Água- EEA. Os valores críticos do coeficiente de correlação (p-valor<0.05) são indicados com a linha horizontal (pontilhada) 89
Figura 22 - Teste entre os parâmetros da água e os índices públicados na literatura (A) CRAxWI, (B) EEAx WI, (C) CRA x MSI, (D) EEA x MSI, (E) CRA x NDWI, (F)EEA x NDWI, (G) CRA x NDII, (H) EEA x NDII, (I) CRA x $SR_{1300,\ 1450}$, (J) EEA x $SR_{1300,\ 1450}$, (K) EEA x $(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$, (L) CRA x $(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$ e (M) EEA x $(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$ 94
Figura 23 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear entre valores individuais de fator de reflectância das folhas de *Eucalyptus* (A)Conteúdo Relativo da Água- CRA e (B) Espessura Equivalente da Água- EEA 96
Figura 24 - Análise gráfica do resultado de calibração e validação dos modelos de regressão para a predição do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus* A) Predição do CRA por uma única banda, B) Predição do EEA por uma única banda, C) Predição do CRA pelas regiões do espectro, D) Predição do EEA pelas regiões do espectro, E) Predição do CRA pelo método de *stepwise* e F) Predição do EEA pelo método de *stepwise* 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos clones estudados 36
Tabela 2 - Análise de variância para o CRA entre as espécies de *Eucalyptus* 44
Tabela 3 - Análise de variância para o CRA entre os tempos de secagem das espécies de *Eucalyptus* 52
Tabela 4 - Teste de Tukey para as médias de conteúdo relativo de água em diferentes tempos de secagem. 52
Tabela 5 - Teste de Tukey para o fator de reflectância das bandas 1450 nm, 1887 nm e 2101 nm pelos tempos de secagem 65
Tabela 6 - Descrição dos clones estudados 75
Tabela 7 - Índices de Vegetação selecionados para relacionar com o conteúdo de água..... 83
Tabela 8 - Coeficiente de determinação (R^2) entre os parâmetros da água (CRA e EEA) e os índices espectrais usados para a calibração do modelo..... 91
Tabela 9 - Valores de regressão linear (R^2) máximos baseado em diferentes regiões do espectro: VIS (350 nm- 720 nm), IVP (721 nm - 1100 nm), IVPI (1101 nm - 1700 nm), IVPII (1701 nm -2100 nm), IVPIII (2101 nm - 2500 nm) 97
Tabela 10 - Desempenho dos modelos espectrais para a predição do conteúdo relativo de água e espessura equivalente da água usando quatro diferentes métodos de seleção de variáveis 99

1 INTRODUÇÃO

O gênero Eucalyptus tem merecido cada vez mais destaque no setor florestal brasileiro, devido aos seus diversos usos, rápido crescimento, grande incremento, portanto faz-se necessário o maior número de informações sobre a sua fisiologia, principalmente a sua relação com a água, pois a disponibilidade hídrica limita o aumento do incremento florestal. A água é um constituinte químico fundamental para o desenvolvimento da planta e auxilia no transporte e translocação de solutos, na turgescência celular, na abertura e fechamento dos estômatos e na penetração do sistema radicular.

O estresse hídrico provoca respostas específicas em cada espécie e vai depender da intensidade e velocidade com que o mesmo ocorre e suas respostas devem ser investigadas para que se obtenham informações necessárias para o cultivo e produção do gênero Eucalyptus.

Existem diversas metodologias que permitem avaliar o estado fisiológico da vegetação através da quantidade de água contida na folha. No entanto, os métodos convencionais são custosos e invasivos. O método tradicional de laboratório trata-se de um técnica destrutiva, pois exige a remoção da folha para mensuração do peso fresco, que deve ser realizado de forma imediata para evitar a perda de água por transpiração. Este método também exige a quantificação da massa túrgida, ou seja, com máximo teor da água, a qual pode apresentar erros devido à falta de cuidado ao se pesar as folhas sem remover a água na superfície da mesma, umidade ocasionada pela imersão da folha na água por 24 horas. Além disso, o método é dispendioso pois necessita da quantificação do peso seco que é adquirido após a permanência das folhas por 72 horas na estufa.

O conteúdo relativo de água é um dos parâmetros mais utilizados para interpretar o estado fisiológico da planta, sendo este calculado por uma relação entre a massa seca, túrgida e fresca, em que é necessário despendimento de tempo para adquirir essas informações. Outro parâmetro muito utilizado para estimar água em folhas é a espessura equivalente da água (EEA do inglês *equivalent water thickness*), apesar de menos utilizado, o EEA leva em consideração a quantidade de água por cm^2 de folha.

O sensoriamento remoto estuda a interação da radiação eletromagnética com os componentes da folha de forma ágil, eficiente e não destrutiva e vem sendo utilizado para estimar o conteúdo de água em folhas de diferentes culturas agrícolas e florestais, através de modelos matemáticos.

Diversos autores vem tentando quantificar esses parâmetros através de dados espectrais. No entanto, a maioria dessas pesquisas tem sido conduzidas em culturas agrícolas de pequeno porte. Além do mais, as leituras espectrais utilizadas para predizer água na folha geralmente são correspondentes ao momento em que a folha é tirada do campo e quando essa encontra-se no estado seca. A maioria dos trabalhos não levam em consideração os valores intermediários da quantidade de água, pois para o modelo tornar-se mais robusto este deveria abranger o máximo de valores de conteúdo de água, e não apenas o peso e a reflectância de folhas recém tiradas de campo ou completamente secas.

Dessa forma, seria possível obter valores intermediários de conteúdo de água em diferentes tempos de secagem de folhas de *Eucalyptus* e através de suas leituras hiperespectrais determinar um modelo que consiga predizer a quantidade de água em folhas, de forma rápida e não destrutiva.

O objetivo deste trabalho foi verificar se a variação do conteúdo de água, através do método de desidratação, tem influência no comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus* e avaliar modelos matemáticos capazes de predizer o conteúdo relativo de água e a espessura equivalente da água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações sobre o gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* tem merecido cada vez mais destaque em programas de reflorestamento, por se tratar de uma espécie de rápido crescimento, grande incremento, facilidade de manejo, alta diversidade, além da elevada produção de sementes e facilidades de propagação vegetativa. Em 2012, a área de plantio brasileira era superior a cinco milhões de hectares. Esse número ascendeu a economia do país no mercado internacional como um dos principais produtores de celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013), portanto faz-se necessário a obtenção de inúmeras informações que caracterizam o ambiente florestal para seu monitoramento e gerenciamento.

No Brasil, essas árvores são plantadas frequentemente em áreas com déficit hídrico (ABRAF, 2013), aumentando a necessidade de seleção de espécies com maior tolerância a condições adversas. De acordo com Silva (2001), a propagação da eucaliptocultura deve-se ao trabalho desenvolvido pelo Dr. Edmundo Navarro de Andrade e pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro. O gênero *Eucalyptus* é atualmente uma das principais essências florestais encontradas no Brasil. Entre as folhosas, é uma matéria-prima com alta demanda no mercado, pois é utilizada para atender diversos segmentos industriais e para confecção de múltiplos produtos, como medicamentos, cosméticos, produtos de higiene (BROOKER; KLEINIG, 2006) e pesticidas (BATISH et al., 2008) e não somente para a produção de celulose e papel, mas também carvão, chapas de fibras e aglomerados.

O *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, tem tronco retilíneo, com casca pulverulenta que se desprende em tiras longas, deixando aparecer uma superfície lisa de cor branca acinzentada, esverdeada ou salmão, algumas vezes persistente na base. Possui ramagem longa e robusta, formando copa aberta ou alongada. As folhas jovens são opostas, oval-lanceoladas, pecioladas; as adultas são alternas, lanceoladas, verde-escuras, brilhantes, com ápice agudo e margens levemente onduladas. A espécie pode ser usada para reflorestamento e o plantio pode acontecer em áreas inundadas e barrancos de rios, pela fixação do solo por suas raízes profundas (LORENZI, 2003).

O gênero *Eucalyptus* compreende mais de 700 espécies, sendo a maioria endêmica do continente australiano (BROOKER; KLEINIG, 2006). Esse gênero adaptou-se muito bem ao Brasil e está espalhado por quase todo o território nacional (VALVERDE et al., 2004), nas suas mais diversas espécies. A seleção de espécies tolerantes à seca é de fundamental importância para o sucesso das atividades florestais em áreas sob restrições hídricas, uma vez

que o crescimento e o desenvolvimento das plantas são afetados por fatores bióticos e abióticos, dentre eles a temperatura e o conteúdo de água no solo (STRECK, 2002). A acentuada variação na disponibilidade hídrica dificulta a seleção de materiais genéticos, pois os riscos de insucesso são elevados nestas condições ambientais, sendo, portanto, conveniente o desenvolvimento de estudos que visem à seleção precoce de material genético para reflorestamento com fins comerciais.

2.2 A água e a Planta

A água é o recurso mais abundante e limitante para o desenvolvimento das florestas (ZYGIELBAUM et al., 2009). Portanto, a distribuição da vegetação e a sua produtividade (MITCHELL; O'GRADY, 2015) são controladas principalmente pela disponibilidade hídrica (KERBAUY, 2013). Para isto, é necessário entender os traços ecofisiológicos da vegetação, pois seu estado hídrico está altamente relacionado com: a condutância estomática, a transpiração, a respiração e a fotossíntese (KRAMER; BOYER, 1995). Entender as características anatômicas, fisiológicas e bioquímicas da vegetação são essenciais para seleção de espécies e material genético, com o objetivo de obter espécies com tolerância a seca (NOGUEIRA et al., 2001) e que melhor se adaptam àquele local.

As espécies lenhosas absorvem água pelo seu sistema radicular, que é conduzida pelo xilema da raiz até as folhas, sendo que o mesófilo contido nas folha é o tecido mais fotossintético na planta. Ao estudar a anatomia das folhas, constata-se que sua estrutura é composta de numerosos espaços intercelulares, que podem estar preenchidos de ar ou água, enquanto suas células são compostas de celulose, água com solutos (íons, proteínas, ácidos nucléicos e outros) e pigmentos dentro dos cloroplastos (GATES et al., 1965). A clorofila é o pigmento fotossintetizante de estrutura molecular mais complexa na folha, que absorve energia eletromagnética principalmente nas regiões azul e vermelha do espetro. A fotossíntese é um processo físico-químico, em que os organismos fotossintetizantes utilizam a energia solar para a produção de carboidrato ($C_6H_{12}O_6$) e oxigênio (O_2),através da reação entre o de dióxido de carbono retirado da atmosfera e moléculas da água (TAIZ; ZEIGER, 2009).

A perda de água da folha para a atmosfera devido ao processo natural da fotossíntese ou alterações climáticas, pode causar déficit hídrico e funcionamento ineficiente de inúmeros processos celulares, como a absorção da radiação eletromagnética por meio dos pigmentos - clorofilas, xantofilas e carotenos (SANCHES et al., 2003; TAIZ; ZEIGER, 2013) e alteração na estrutura celular, pois o estresse da água na planta pode causar aumento da espessura e da

lignificação da parede celular, esse evento auxilia a planta a diminuir a perda de água para o ambiente, porém limita a difusão do CO_2 entre os cloroplastos (NIINEMETS et al., 2005).

O conteúdo relativo da água (CRA) é um parâmetro universal usado para avaliar o status de água na planta, sendo altamente correlacionado com a assimilação de CO_2 (TSNOVE et al., 2014) e capacita determinar a tolerância da planta à seca (ARNDT et al., 2015). Este parâmetro é dado em porcentagem (%) para quantificar a proporção de água e matéria seca na folha (DATT, 1999, RANJAN et al., 2015).

A densidade equivalente da água (do inglês *equivalent water thickness*- EEA) é outro parâmetro muito utilizado para quantificar água na folha, porém este estima a proporção de água por área foliar (YI et al., 2012; WANG; LI, 2012; MOBASHERI; FATEMI, 2013; RANJAN et al., 2015) e varia de acordo com as características das folhas (CECCATO et al., 2001).

O cálculo dos parâmetros da água tem sido obtido pelo método tradicional de laboratório, que envolve a pesagem da folha retirada do campo com posterior pesagem desta no estado túrgido, seguida por secagem e pesagem da mesma (KRAMER; BOYER, 1995), processo simples, porém lento e além do mais esse método exige muita atenção devido a alteração de massa gerada pela transpiração e da dificuldade de encontrar a massa túrgida (DREYER et al., 1990; ARDNT et al., 2015)

2.3 Sensoriamento Remoto

Na década de 80, Elachi (1987) definiu o termo sensoriamento remoto como a aquisição de informações sobre um determinado objeto inexistindo contato físico com o mesmo, porém Novo (2010) caracterizou essa definição como muito ampla, e descreveu o sensoriamento remoto como a ciência que estuda eventos e processos que ocorrem na superfície terrestre, por meio da utilização de sensores que são equipamentos para o processamento e transmissão desses dados.

As informações obtidas por técnicas de sensoriamento remoto advém da interação da radiação eletromagnética (REM) com um alvo (MULLA, 2012), essa radiação tem a forma de ondas de diferentes comprimentos (λ) e viajam no vácuo à velocidade da luz (WÓJTOWICZ et al., 2016). As regiões do espectro mais conhecidas para o sensoriamento são: visível (350 nm – 720 nm), infravermelho próximo (720 nm -1100 nm), infravermelho médio (1100 nm – 3200 nm) (PONZONI et al., 2012), termal e microondas.

O sensoriamento remoto pode ser dividido em três níveis de aquisição de coleta de dados: terrestre, aéreo e orbital (WÓJTOWICZ et al., 2016), para isso é necessário o uso de diferentes plataformas, as quais serão acoplados os sensores responsáveis por captar, registrar a REM e gerar informações que possam ser transformadas em um produto passível de interpretação (MOREIRA, 2001). Os sistemas sensores são classificados de acordo com a fonte de radiação, e são divididos em dois grupos: passivos e ativos.

Os sensores passivos são aqueles que medem a radiação refletida pelos alvos, e que provém de uma fonte de iluminação externa, como exemplo o leaf cleap, unidade detectora com luz própria, que e é acoplada a um sensor (passivo). Enquanto que o sensor ativo possui sua própria fonte de luz, portanto não depende de uma fonte externa de luz para irradiar o alvo (MOREIRA, 2001)

2.3.1 Sensoriamento Remoto aplicado à vegetação

O rápido avanço tecnológico das últimas décadas impulsionou o desenvolvimento de diferentes sistemas sensores que são atualmente utilizados nas mais diversas áreas da ciência (JENSEN, 2009), inclusive na agricultura e na floresta.

Desde a década de 1960, cientistas vêm extraindo e modelando muitos parâmetros biofísicos e bioquímicos da vegetação com o uso do sensoriamento remoto (JENSEN, 2009). A aplicação dessa técnica, chamada espectroradiometria, é baseada na interação da energia eletromagnética com o solo, vegetação, água e outros alvos de interesse. Geralmente as mensurações envolvidas no sensoriamento remoto medem a energia refletida, absorvida e transmitida. (MULLA, 2013) que são dependentes das características físico-químicas do objeto. A quantidade de energia refletida é inversamente proporcional a soma radiação absorvida e transmitida, sendo que a quantidade de energia absorvida depende de diversos fatores, como estrutura do objeto, composição celular e química, distribuição de seus constituintes, entre outros.

Os fenômenos naturais são melhores compreendidos quando se tem conhecimento da interação entre a radiação eletromagnética (REM) e o alvo. Com a espectroradimoetria é possível obter informações referentes à forma como a vegetação processa a REM (SILVA et al., 2012), pois as plantas realizam fotossíntese que é um processo fundamentado na absorção da REM, por meio dos pigmentos (clorofilas, xantofilas e carotenos), em que as folhas são as principais estruturas capazes de absorver radiação eletromagnética (SANCHES et al., 2003). Essa absorção acontece ao longo do espectro, mais intensamente na região do visível (400 nm – 720 nm) (PONZONI et al., 2012).

Na região do infravermelho próximo há uma pequena absorção de REM e alto espalhamento quando comparada à região do visível, a absorção da água nessa região é baixa e a reflectância quase constante. Segundo Ponzoni et al. (2012) quanto mais lacunosa for a estrutura interna da folha maior será o espalhamento da radiação incidente e consequentemente maior o fator de reflectância, pois essa região do espectro é altamente correlacionada com a estrutura celular das folhas. Apesar da estrutura celular ter maior influência sobre o infravermelho próximo, fatores externos como a disponibilidade de água podem alterar a relação água-ar no mesófilo, portanto ter uma mudança quantitativa no fator de reflectância da folha.

A região do infravermelho médio (1300 nm à 2500 nm) apresenta maior absorbância em virtude da quantidade de água no interior da folha (Figura 1), e pode ser alterada de acordo com a quantidade de água disponível para a planta (MOREIRA, 2001). Folhas saudáveis apresentam comportamento espectral semelhante, porém fatores como idade, espécie, doenças, deficiência de água e nutrientes podem alterar suas propriedades espectrais.

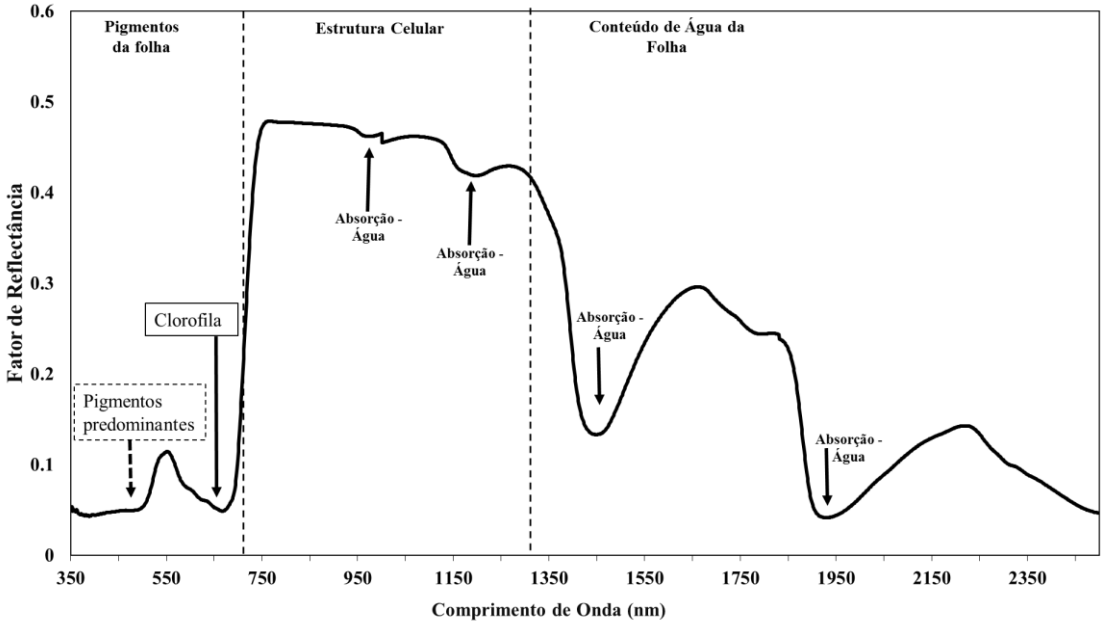


Figura 1 - Curva de fator de reflectância direcional-hemisférica típica de uma folha verde de *Eucalyptus*
Fonte: dados do autor

Medir a radiação refletida pelas folhas e copas de árvores possibilita estimar teores de água nas folhas (DATT, 1999), sendo que a situação hídrica das folhas altera diretamente a quantidade de energia refletida no infravermelho, principalmente no infravermelho médio (1300 nm à 2500 nm), pois a água é responsável por uma maior absorção de energia eletromagnética nessa região, mais especificamente nos comprimentos de onda próximos ao

1450 nm, 1940 nm, 2500 nm e outras duas regiões que caracterizam absorção, porém mais fraca próximas ao 970 nm e 1200 nm (KNIPLING 1970; THOMAS et al., 1971) (Figura **1**).

Carter (1991) sugeriu que a variação da quantidade de água na folha influencia inversamente a reflectância do infravermelho médio, chamado de "efeito primário". Esse evento possibilita avaliar os parâmetro hídricos por meio de dados hiperespectrais. De acordo com Ceccato et al. (2001) variações no comportamento espectral das folhas, com a mudança da quantidade de água da mesma, é devido a absorção de energia pela água e pela matéria seca da folha.

Muitos estudos investigam o potencial da reflectância de folhas para caracterizar o estado hídrico da planta e indicam que a leitura radiométrica de folhas individuais tem mostrado bons resultados (DATT, 1999; CLEVERS et al., 2010; CHENG et al., 2011; MIRZAIE et al., 2014; CAO et al., 2015).

2.3.2 Sensoriamento Remoto e modelos para predição de água em outras culturas

Estudos demonstram que alguns comprimentos de onda (λ) são essenciais para fornecerem informações que permitem quantificar água em folhas. Porém, o uso de dados hiperespectrais é complexo, devido ao grande número de variáveis espectrais. Portanto, muitos pesquisadores tentam utilizar de métodos que possam resumir o número dessas bandas colineares (MIRZAIE et al., 2014).

Ponzoni et al. (2012) afirmou que a região do infravermelho médio é a mais influenciada pela variação da água na vegetação , e que essa influência se destaca em pontos de absorção da água, que são: 1100 nm, 1450 nm, 1950 nm e 2700 nm, porém que essas feições de absorção podem variar por espécie e os comprimentos de onda de 1450 nm e 1950 nm são os que mais sofrem essa influência. Outras regiões do espectro que se relacionam com a água são: 950nm – 970 nm, 1150 nm – 1260 nm (RANJAN et al., 2015; CECCATO et al., 2002), estas regiões sofrem uma menor influência devido a variação de água, pois são influenciadas por outros componentes da folha, como a celulose (CLEVERS et al., 2010).

Peñuelas e Inoue (1999) mensuraram o CRA de folhas de trigo pelo índice WI (*Water Index*) e encontraram um coeficiente de correlação de r=0,92. Peñuelas et al. (1997) perceberam que espécies com alta concentração de água (*Arbustus unedo*) tem uma maior relação com o WI, enquanto que espécies com menor concentração de água (*Brachypodium retusum*) tem menor correlação com o índice citado.

Yi et al. (2013) usaram índices espectrais para estimar água em folhas de algodão e encontraram uma baixa correlação negativa (r=-0,26) para o MSI (*Moisture stress index*) e uma correlação moderada (r=0,61)para o WI.

Datt (1999) encontrou uma correlação moderada negativa (r=-0,61) entre o MSI e o EEA de 21 diferentes espécies de *Eucalytpus* e desenvolveu dois índices para predizer EEA, tanto o $(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$ quanto o $(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$ tiveram uma forte correlação positiva de r=0,78 para o primeiro e r=0,76 para o segundo.

Oumar e Mutanga, 2010 encontraram um coeficiente de correlação de 0,74, ao simularem, através de uma rede neural, quais as melhores bandas do satélite Sumbandila (África do Sul) para estimar conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus grandis*

Referências

ARNDT, S.K.; IRAWAN, A.; SANDERS, G. Apoplastic water fraction and rehydration techniques introduce significant errors in measurements of relative water content and osmotic potential in plant leaves; **International Journal for Plant Biology**, Lund, v. 155, p. 355-368, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013:** ano base 2012. Brasília, 2013. p. 8

BATISH, D.R.; SINGH, H.P.; KOHLI, R.K. Eucalyptus essential oil as a natural pesticide. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, p. 2166–2174, 2008.

BROOKER, M.I.H.; KLEINIG, D.A. **Field guide to Eucalyptus.** 3rd ed. Melbourne: Bloomings, 2006.

CAO, Z.; WANG, Q.; ZHENG, C. Best hiperespectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. **Ecological Indicators,** New York, v. 54, p. 96–107, 2015.

CARTER, G.A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, Baltimore, v. 78, p. 918- 924, 1991.

CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S.; GRÉGOIRE, J.M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 77, p. 22–33, 2001.

CHENG, T.; RIVARD, B.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G.A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 115, p. 659–670, 2011.

CLEVERS, J.; KOOISTRA, L.; SCHAEPMA, M., Estimating canopy water content using hyperspectral remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enscheda, v. 12, p. 119–125, 2010.

DATT, B. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. **Australian Journal of Botany**, East Melbourne, v. 47, p. 909-923, 1999.

DREYER, E.; BOUSQUET, F.; DUCREY, M. Use of pressure volume curves in water relation analysis on woody European oak species. **Annales des Sciences Forestieres,** Amsterdam, v. 47, p. 285–297, 1990.

ELACHI, C. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing.** Chichester: Wiley, 1987.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Easton, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestre. 2. ed. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2009.

KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal.** 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils.** Newark: Academic Press, 1995. 489 p.

KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation, **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 1, p. 155-159, 1970.

LORENZI, H.;**Árvores exóticas no Brasil:** madeireiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

MIRZAIE, M.; DARVISHZADEH, R.; SHAKIBA, A.; MATKAN, A.A.; ATZBERGER, C.; SKIDMORE, A. Comparative analysis of different uni- and multi-variate methods for estimation of vegetation water content using hyper-spectral measurements. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 26, p. 1–11, 2014.

MITCHELL, P.J.; O'GRADY, A.P. Adaptation of leaf water relations to climatic and habitat water availability. **Journal of Forests**, Tasmania, v. 6, p. 2281-2295, 2015.

MOBASHERI, M.; FATEMI, S. Leaf equivalente water thickness assessment using reflectance at optimum wave lenghts. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Heidelberg, v. 25, n. 1, p. 196-202, 2013.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 105 p.

MULLA, D.J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2012.

NIINEMETS, Ü.; CESCATTI, A.; RODEGHIERO, M.; TOSENS, T. Leaf internal diffusion conductance limits photosynthesis more strongly in older leaves of Mediterranean evergreen broad-leaved species. **Plant Cell Environment,** Rockville, v. 28, p. 1552–1566, 2005.

NOGUEIRA, R.J.M.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A.; BEZERRA, E.E.N. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2001.

NOVO, E. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 2010.

OUMAR, Z.; MUTANGA, O. Predicting plant water content in *Eucalyptus grandis* forest in Kwazulu-Natal, South Africa using field spectra resampled to the Sumbandila satellite sensor. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enscheda, v. 12, p. 158-164, 2010.

PEÑUELAS, J.; PIÑOL, R.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimations of plant water concentration by the reflectance water index (R900/R970). **Internationa Journal of Remote Sensing**, London, v. 18, p. 2869–2875, 1997.

PEÑUELAS, J.; INOUE, Y. Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. **Photosynthectica**, Praha, v. 36, p. 355-360, 1999.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** São José dos Campos: Oficina de Texto, 2012.

RANJAN, R.; SAHOO, R.N.; CHOPRA, U.K.; PRAMANIK, M.; SINGH, A.K.; PRADHAN, S. Assessment of water status in wheat (*Triticum aestivum* L.) using ground based hyperspectral reflectance. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, Allahabad, v. 5, n. 20, p. 1–12, 2015.

SANCHES, I.D'A.; ANDERSON, L.O.; ROJAS, E.H.M.; OLIVEIRA, C.G. Influência do tempo após a coleta de folhas na reflectância e transmitância. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte : SBRS, 2003. p. 2605-2612.

SILVA, J.C. **Eucalipto:** a madeira do futuro. Curitiba: Revista da Madeira, 2001. 114 p.

SILVA, E.A.; MARANGON, G.P.; DESSBESELL, L.; MORAIS, W.W.; LIPPERT, D.B.; PEREIRA, R.S. Caracterização espectral na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 285-292, 2012.

STRECK, N.A. A generalized nonlinear air temperature response fuction for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.) **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 105–111, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** Rio de Janeiro: Artmed, 2013.

THOMAS, J.R.; NAMKEN, L.N.; OERTHER, G.F.; BROWN, R.G. Estimating leaf water content by reflectance measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, n. 6, p. 845-847, 1971.

TSNOVE, T.; WAHBI, S.; SUN, P.; SORRENTINO, G.; CENTRITTO, M.; Gas exchange, water relations and their relationships with photochemical reflectance index in *Quercus ilex* plants during water stress and recovery. **International journal of agriculture and biology**, Faisalabad, v. 16, n. 2, p. 335–341, 2014.

VALVERDE, S.R.; SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; NEIVA, S.A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

WANG, Q.; LI, P.; Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water contents using PROSPECT simulated dataset and field reflectance measurements. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 26, p. 1230-1241, 2012.

WÓJTOWICZ, M.; WÓJTOWICZ, A.; PIEKARCZYK, J. Application of remote sensing methods in agriculture. **International Journal of the Faculty of Agriculture and Biology**, Varsovia, v. 11, n. 1, p. 31-50, 2016.

YI, Q.; BAO, A.; WANG, Q.; ZHAO, J.; Estimation of leaf water content in cotton by means of hiperespectral indices. **Computer and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 90, p. 144-151, 2013.

ZYGIELBAUM, A.I.; GITELSON, A.A.; ARKEBAUER, T.J.; RUNDQUIST, D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize. **Geophysical Research Letters**, New Jersey, v. 36, n. 12, p. 1-4, 2009.

3 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA, OBTIDO PELO MÉTODO DE DESIDRATAÇÃO, SOBRE COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE FOLHAS DE *Eucalyptus* spp.

Resumo

Avaliar o estado hídrico das plantas é um dos fatores necessários para o monitoramento da cultura. O sensoriamento remoto é uma das ciências que estuda e interpreta a interação da radiação eletromagnética com as plantas e o quanto os fatores intrínsecos e extrínseco podem influenciar na quantidade de energia absorvida, transmitida e refletida pela folha. Neste estudo, mediu-se a influência da variação do conteúdo relativo de água (CRA), pelo método da desidratação, em folhas de 11 diferentes espécies de *Eucalyptus* no comportamento espectral destas. As folhas amostradas foram secas progressivamente e o maior impacto ocorreu entre os comprimentos de onda de 1300 nm – 2500 nm, sendo que essa variação foi medida pela diferença de reflectância e chegou a 26% no comprimento de onda de 1400 nm para o híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis.* Ao analisar a sensibilidade ao conteúdo de água, verificou-se que as regiões próximas a 1400 nm e 1900 nm foram as que apresentaram maior sensibilidade a variação do conteúdo de água. Foi feita uma análise de componentes principais(ACP) a fim de classificar, por meio dos dados espectrais, as folhas com maior e menor CRA, esse método multivariado mostrou-se eficiente na classificação. Através da ACP foi possível verificar que os comprimentos de onda 1450 nm, 1887nm e 2101nm são os mais eficientes em classificar o progresso da desidratação. Este resultado foi confirmado pelo teste de Tukey.

Palavras-chave: Sensibilidade ao conteúdo de água; Diferença de reflectância; Análise de componentes principais

Abstract

The hydric condition assessment of pants is one of the necessary factor for monitoring a culture. Remote sensing is one of the sciences that studies and interprets the interaction of electromagnetic radiation with plants and also the influence of intrinsic and extrinsic factors that can influence the quantity of energy absorbed, transmitted and reflected by the leaf. In this study the relative water content variation was measured using the dehydrating method in leaves of 11 different species of *Eucalyptus* on its spectral behavior. The leaves samples were dried progressively and the major impact occurred between the wavelengths 1300 nm and 2500 nm, being this difference measured by the reflection difference in which 26% change happened at 1400 nm for the hybrid E. grandis x E. camaldulensis. By analyzing the sensibility to the water content, it was verified that regions near 1400 nm and 1900 nm were the ones that presented a greater sensibility to the relative water content variation. A principal component analysis was done (PCA) using the spectral data in order to classify the leaves with higher and lower RWC and this multivariate analysis appeared to be very efficient for classifying. Through PCA it was possible to conclude that the wavelengths of 1450 nm, 1887 nm and 2101 nm are the most efficient for classifying the dehydration process through spectral data, which was confirmed by Tukey's test results.

Keywords: Sensibility to water content; Reflectance difference; Principal components analysis

3.1 Introdução

O monitoramento da condição hídrica das florestas é essencial para determinar o estado fisiológico das plantas (SHEN et al., 2005). A baixa disponibilidade de água afeta o metabolismo desta que é caracterizado pelo fechamento dos estômatos, redução da condutância estomática, queda nas taxas fotossintéticas e de transpiração (SILVA et al., 2002; PORTES et al., 2006), e pode acarretar na senescência de folhas, acumulo de serapilheira, seca e morte de árvores, aumentando os riscos de incêndios florestais(CARLSON & BURGAN, 2003; PEÑUELAS et al., 1993, 1996).

Além dos sintomas visuais, como a identificação do secamento e enrolamento de folhas, diversos parâmetros são usados para avaliar a reposta das espécies vegetais ao estresse hídrico foliar (MORGAN, 1991) como a condutância estomática (OTTO et al., 2013), a taxa de transpiração (ALBUQUERQUE et al., 2013, SUN et al., 2014), potencial osmótico e conteúdo relativo de água (ARNDT et al., 2015, FERNANDES et al., 2015).

O conteúdo relativo de água (CRA) é uma medida universal (SUN, 2014) utilizada para estimar a quantidade de água na folha, capacitando determinar a tolerância das plantas à seca e sua adaptação a ambientes favoráveis (ARNDT et al., 2015), pois apresenta forte relação com o volume celular (JONES, 1992). Este parâmetro é dado em porcentagem (%) para quantificar a proporção de água e matéria seca na vegetação (DATT, 1999, RANJAN et al., 2015).

O cálculo do CRA da vegetação tem sido obtido pelo método tradicional de laboratório, que envolve a pesagem seguido da submersão da folha em água e a secagem das mesmas para determinar sua perda de massa. Contudo, existem problemas metodológicos na determinação da massa úmida por interferência da respiração e fotossíntese e massa túrgida (ARDNT et al., 2015) pelo ganho ou perda de massa dos tecidos; esses processos fisiológicos dificultam a sensibilidade do índice e sua aplicação em folhas. Então, vê-se a necessidade de investigar novas ferramentas que permitam avaliar a situação hídrica da folha de forma rápida e não destrutiva.

O sensoriamento remoto pode auxiliar nos estudos deste parâmetro, como já foi proposto por Yamsaki e Dilenburg (1999); Sun et al. (2014); Liu et al. (2015) Cao et al. (2015). Utilizando a radiometria de laboratório que tem apresentado bons resultados na determinação de deficiência hídrica, Gao (1996) afirmou que o comportamento espectral é sensível a quantidade de água na folha, porém o trabalho analisou apenas a variação espectral das folhas secas e úmidas, em que os conteúdos de água intermediários não foram considerados.

Peñuelas e Inoue (1999) avaliaram a influência de diferentes conteúdos relativos de água em folhas de amendoim (*Arachis hypogea* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) no comportamento espectral, e encontraram um aumento no fator de reflectância para os comprimentos de onda de 1430 nm e 1950 nm com a dessecação progressiva das folhas, entretanto a região de absorção de energia próxima ao 970 nm desapareceu.

Neste contexto seria necessário verificar novas metodologias de estudo que tratem da interpretação de dados de sensoriamento remoto hiperespectral em culturas florestais e da influência do conteúdo relativo de água no comportamento espectral destas. O objetivo do presente trabalho foi analisar o comportamento da assinatura espectral de 11 espécies de *Eucalyptus* e qual o efeito da variação progressiva de perda do conteúdo relativo de água, pelo método de desidratação, sobre o comportamento espectral e qual a região do espectro mais afetada pela variação do conteúdo relativo de água.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O presente estudo foi realizado no sítio experimental de número 36 do programa cooperativo de Tolerância de *Eucalyptus* clonais aos estresses hídrico, térmico e biótico-TECHS, do instituto de pesquisas florestais (Stape et al. 2014). O sítio localiza-se no município de Piracicaba- SP, na Fazenda Experimental –Areão que pertence a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Universidade de São Paulo, nas coordenadas geográficas 22°41’07” S e 47°38’38” W e altitude de 550 m.

O programa conta com 36 sítios experimentais distribuídos desde o Pará até o fim de atingir diferentes tipos de clima. Para este trabalho foram utilizados de 11 clonais do gênero *Eucalyptus* spp. de grande relevância para o Brasil, que foram por melhoristas florestais. Stape et al. (2014) classificou os clones em três grupos: a) úmidas e tropicais secas, b) subtropicais mais frias e c) intermediários e mais plásticos (

Tabela **1**).

Tabela 1 - Descrição dos clones estudados

Classificação	Espécie (hibrido= mãe x pai)
Plástico	*E. urophylla* x sp
	E. grandis x E. *camaldulensis*
	E. saligna
Tropicais	*E. urophylla* x *E. grandis*
	E. grandis x *E. urophylla*
	E. urophylla x *E. tereticornis*
	E. urophylla
	E. benthamii
Subtropicais	*E. urophylla* x *E. globulus*
	E. dunnii
	E. grandis

3.2.2 Descrição da área de estudo

O sítio experimental foi instalado pelo programa TECHS no dia 1° de dezembro de 2013. O solo local foi classificado como Nitossolo Vermelho distrófico textura argilosa a moderada (Vidal-Torrado et al., 2004). O clima da região é mesotérmico, tipo Cwa (Alvares et al., 2014) com verões quentes e chuvosos e invernos moderadamente frios e secos, com temperatura média anual de 19,1°C e a precipitação média anual de 1170 mm.

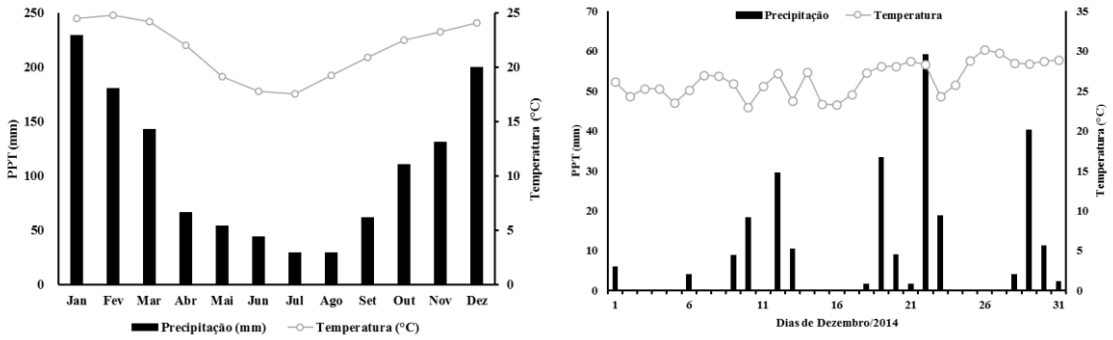


Figura 2 - Gráfico de precipitação média anual e do mês de dezembro de 2015 do município de Piracicaba

O delineamento experimental consta com 11 parcelas consistindo de 20 árvores/parcela, sendo estas divididas em cinco linhas de quatro plantas. O espaçamento entre as plantas é de 2,2 m x 2,3 m, portanto com uma área de 5,06 m²/planta.

De acordo com os dados do programa TECHS, no preparo do solo foi realizado aração, gradagem, e posterior subsolagem à 50 cm de profundidade. Anteriormente a implantação, a adubação consistiu de 300 g/planta super fosfato simples amoniado (03:17:00) e 50 g/planta de fertilizante FTEBr12. Foram realizadas constante combate as formigas e mato-competição, sendo o primeiro controlado por isca formicida (Sulfluoramida) e o segundo por herbicida pré-emergente (Isoxaflutole) e herbicida pós emergente (Glyphosate). Não se verificou qualquer tipo de trato silvicultural, como desbaste ou desrama com um ano após o plantio.

3.2.3 Amostragem Foliar

Foram selecionadas e marcadas quatro árvores, em cada parcela de *Eucalyptus* spp. (Figura **4**-A), em seguida fez-se uma separação visual dos terços de acordo com o começo da copa da árvore, os terços foram: superior, médio e inferior (Figura **3**-A) . Para cada árvore selecionada, foram coletadas quatro folhas por terço, que foram divididas de acordo com quatro pontos diferentes (Figura **3**- B). Este procedimento foi padronizado para todas as espécies a fim de se obter uma amostra que representasse a planta como um todo. A folha selecionada foi a segunda do ramo que apresentava um aspecto visualmente saudável (Figura **3**-C) e em boas condições fisiológicas.

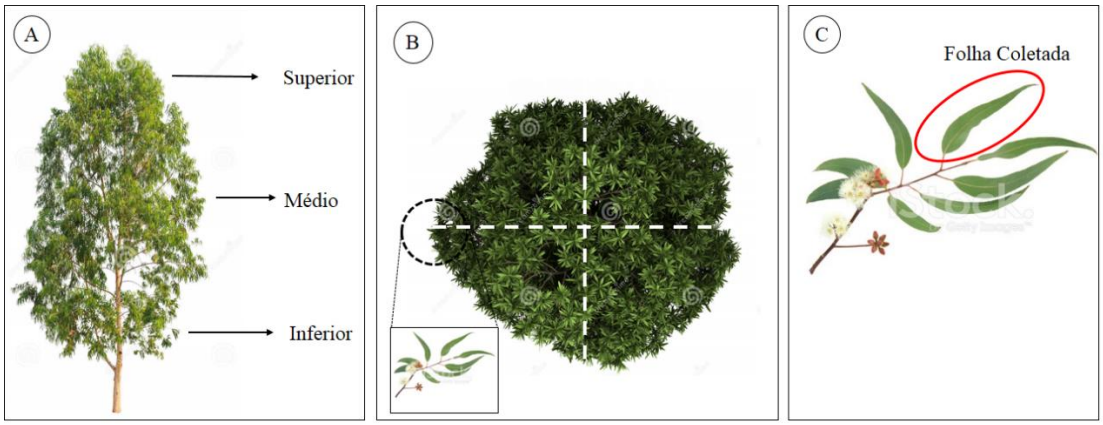


Figura 3 - Localização ilustrativa da folha coletada A- posição dos terços da árvore, B- posição da folha em quatro pontos opostos da árvore, C- folha coletada no ramo

A coleta das folhas ocorreram nos dias 9, 11 e 12 de dezembro, sempre entre às 7:00 e às 9:00 horas, ou seja, observando-se a Figura **2** nota-se que os dias 9, 10, e 12 foram caracterizados pela presença de chuva. No primeiro dia foram amostradas todas as folhas do

terço inferior das 11 espécies, no segundo dia o terço médio e finalizou-se com a amostragem das folhas do terço superior. Após a coleta do material, as folhas foram identificadas(Figura **4**-B e Figura **4**-D), embaladas em sacos plásticos transparentes, e colocadas em caixa térmica com gelo (SUMMY et al., 2011)(Figura **4**-C).

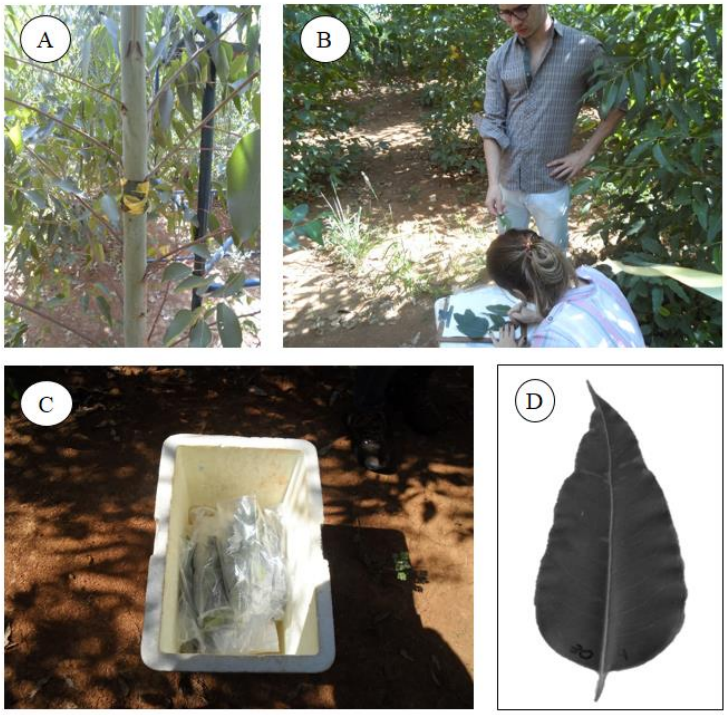


Figura 4 - A- Árvore selecionada e marcada, B-Identificação das folhas de *Eucalyptus* coletadas em campo, C-Folhas colocadas em gelo e D- Visão aproximada de uma folha do terço médio

3.2.4 Determinação do Conteúdo Relativo de Água

A água é um constituinte químico fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas (KRAMER; BOYER, 1995), sendo o conteúdo relativo de água (CRA) um parâmetro dado pela razão entre o teor de água no momento da coleta e o teor máximo de água (estado de turgor) para uma dada folha (HUNT et al., 1987). Para isso foi necessário determinar o peso fresco, o peso túrgido e peso seco através da Equação 1 sugerida por Turner (1981), Nogueira et al. (2001), Pacheco et al. (2011) e Fernandes et al. (2015).

Equação 1. Conteúdo Relativo de Água.

$$CRA=\frac{PF-PS}{PT-PS}*100$$

em que PF (g) é o peso fresco, PS (g) é o peso seco após 72 horas na estufa a 70 °C e PT (g) é o peso túrgido. Os resultados foram expressos em porcentagem (%).

3.2.5 Obtenção dos dados hiperespectrais em laboratório

A leitura radiométrica do material vegetativo foi realizada com o espectroradiômetro FieldSpec® 3 no laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia de Biossistemas- ESALQ/USP. Os procedimentos de leitura com o sensor tiveram início 30 minutos após o material vegetativo ter sido coletado.

O espectroradiômetro é um sensor passivo de campo e laboratório que realiza medições de irradiância e radiância. Opera na faixa de 350 nm à 2500 nm do espectro eletromagnético, com uma resolução espectral de 10 nm e capacidade de coletar até 10 espectros por segundo. Os espectros são divididos em visível (400 – 720 nm), infravermelho próximo (720 - 1100 nm) e infravermelho médio (1100-2500 nm) (PONZONI et al., 2012). A unidade detectora, denominada leaf clip, está conectada ao instrumento por um cabo de fibra óptica e possui três sensores, uma malha de fotodiodo de 512 elementos e dois sensores resfriados termoeletricamente (fotodiodos InGaAs) (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, USA).

A radiância mensurada pelo sensor é convertida em reflectância através da calibração do sensor com a placa branca Spectralon presente no leaf clip (OUMAR; MUTANGA, 2010). As técnicas de calibração e obtenção da resposta espectral são descritas como um ajuste do sistema sensor para que ele forneça respostas padronizadas, e garantir que os diferentes resultados encontrados sejam relacionados com as propriedades físicas do alvo (PACHECO, 2011).

Para a leitura espectral do material vegetativo pelo sensor, conectou-se o espectroradiômetro ao leaf clip, e realizou-se a calibração do sensor para posterior medição de reflectância das folhas. Cada folha foi posicionada no orifício com sua face adaxial voltada para o sensor que foi configurado para realizar 10 leituras amostrais médias por segundo, para cada folha. Os espectros gerados foram transferidos para o computador, para que fossem gravados e posteriormente processados.

3.2.6 Aquisição sucessiva da massa, pelo método de desidratação, para determinação do conteúdo relativo de água e leituras espectrais

As folhas são consideradas partes da planta em que são coletados dados radiométricos, a fim de caracterizar espectralmente fenômenos e/ou aspectos relacionados ao processo de interação entre a radiação eletromagnética e a vegetação (PONZONI et al., 2012). Diante da

necessidade de realizar a leitura espectral foram coletadas folhas para posteriores análises espectroradiométricas.

O organograma da Figura 5 ilustra tal procedimento, bem como toda a marcha metodológica, para obtenção dos CRA's e respectivas leituras espectrais em diferentes tempos de secagem. As folhas coletadas em campo (Figura 5-A) foram levadas para o laboratório e pesadas imediatamente para a aquisição dos valores de massa úmida com o auxílio de uma balança analítica de precisão (Figura 5-B). Imediatamente após a pesagem, foi realizada a leitura espectral de cada folha de *Eucalyptus* (Figura 5- C). Posteriormente, as folhas foram emergidas em água destilada por 24 horas (Figura 5-D) e pesadas para a obtenção da massa túrgida (Figura 5-E), em conseguinte obteve-se a leitura espectral (Figura 5-F) da folha na situação de máximo teor de água.

A fim de mensurar a reflectância com diferentes níveis de umidade, o conteúdo relativo de água foi obtido pela secagem sucessiva das amostras de folhas em uma estufa microbiológica (Figura 5-G). Testes preliminares possibilitaram estabelecer uma temperatura de 40°C na estufa, e o tempo de secagem foi limitado para 30 minutos. No momento em que as folhas foram retiradas da estufa, as mesmas eram pesadas para obtenção de um novo valor de massa (Figura 5-H) que substituiu-se no valor de peso fresco. Em seguida, foi obtida sua respectiva assinatura espectral. Esse processo foi repetido sete vezes, momento em que os valores de CRA_{Tempo} passaram a ter uma variação insignificante em relação ao $CRA_{Tempo-1}$, nesse instante o processo de secagem foi interrompido. Os pesos intermediários (PF_T), dado em gramas, eram substituídos nos valores de Peso Fresco, assim como descrito por Fabre et al. (2011) (Equação 2)

Equação 2. Conteúdo Relativo de Água Intermediários.

$$CRA_{Tempo}=\frac{PF_T\text{-}PS}{PT\text{-}PS}*100$$

No final das secagens intermediárias, as amostras de folhas foram colocadas em uma estufa com uma temperatura de 70°C por 72 horas (Figura 5-J), a fim de obter o peso seco (Figura 5-K).

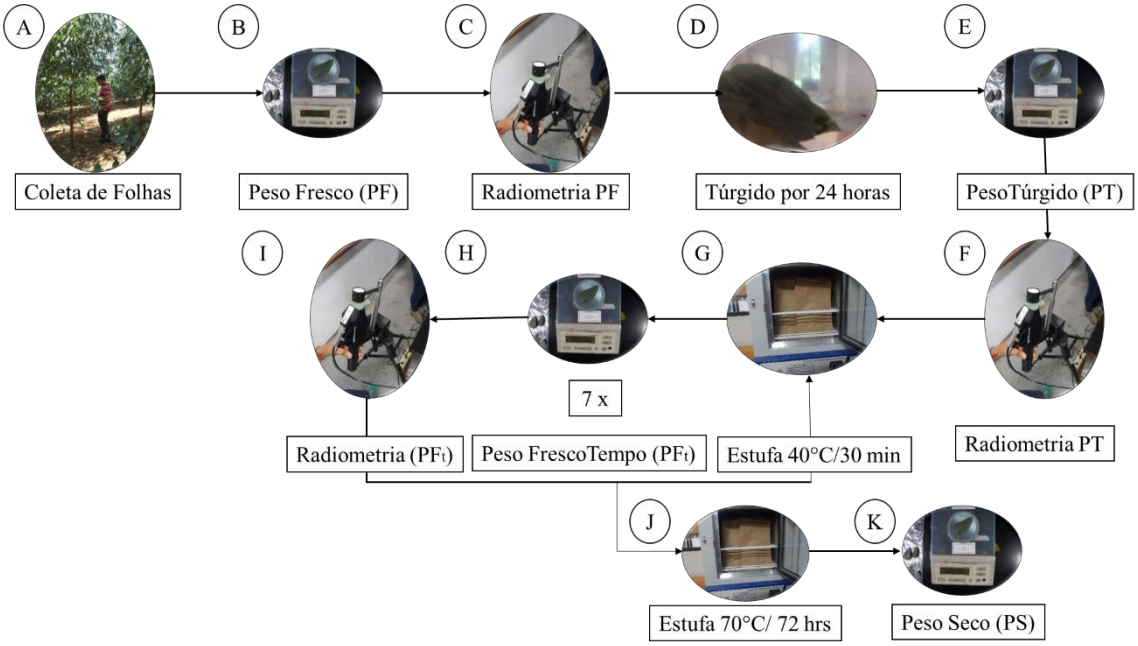


Figura 5 - Organograma da obtenção progressiva do CRA e da radiometria

3.2.7 Avaliação do Conteúdo Relativo de Água em *Eucalyptus*

Os dados obtidos pelo conteúdo relativo de água foram agrupados de acordo com a espécies e o tempo de secagem (metodologia de desidratação para encontrar os valores intermediários de CRA) para posterior análise descritiva e estatística. Realizou-se uma análise de variância (ANOVA), a fim de verificar se as amostras de CRA no tempo úmido são independentes.Uma nova análise de variância (ANOVA) foi feita para verificar se havia diferença estatística entre os CRA por tempo de secagem. Em caso de diferença estatística entre as médias foi feito um teste de comparação de médias (Teste de Tukey). Os testes foram feitos no software estatístico Rstudio pelo pacote ExpDes.

3.2.8 Análise descritiva e de sensibilidade do comportamento espectral de folhas de *Eucalyptus*

Inicialmente foi feita uma análise descritiva do comportamento espectral das diferentes espécies de *Eucalyptus*, no momento em que as folhas foram coletadas no campo, ou seja, folhas frescas. Em seguida, foi analisada a influência da variação do conteúdo relativo de água na assinatura espectral do *Eucalyptus*, pelo método de desidratação de folhas.

Para melhor visualização do efeito da variação do CRA na resposta espectral, foi feito um gráfico da diferença de reflectância em que foi calculado a diferença entre o fator de

reflectância (Equação 3) de todos os tempos de secagem pelo fator de reflectância das folhas que se encontravam no estado túrgida. Na sequência foi gerado um gráfico de análise de sensibilidade espectral (Equação 4)proposto por Carter (1991), em que as curvas de diferença de reflectância são divididas pelo fator de reflectância no tempo túrgido, mostrando assim quais comprimentos de onda são mais sensíveis a essa variação por tempo.

Diferença de Reflectância = $R_{Túrgida}$ - R_{Tempo} **(3)**

Sensibilidade ao Conteúdo de Água = $(R_{Túrgida} - R_{Tempo})/R_{Tempo}$ **(4)**

Em que $R_{Túrgida}$ é o fator de reflectância no tempo de secagem Túrgida e R_{Tempo} é o fator de reflectância nos diferentes tempos de secagem.

3.2.9 Análise estatística do comportamento espectral

3.2.9.1 Pré- tratamento dos dados espectrais

Realizou-se a análise de componentes principais (ACP) para todas as curvas espectrais, a fim de observar e remover os dados discordantes por espécie e por tempo de secagem das folhas, chamados *outliers*. Em termos geométricos, a componente principal (CP) representa o espalhamento entre os pontos (FERREIRA et al., 1999), ou seja, permite caracterizar os dados e verificar se existem *scores* fora da nuvem de pontos. Ao final da ACP, verificou-se que os poucos *outliers* presentes nas amostras fossem associados a prováveis erros de leitura, pois as curvas apresentaram uma reflectância muito inferior a esperada, sendo que o CRA das curvas consideradas *outliers* foram semelhante ao das outras repetições, portanto essa diferença no comportamento espectral não está associado a quantidade de água na folha. Este passo foi realizado antes de qualquer análise dos dados espectrais, para que os dados discordantes não interferissem nos resultados.

3.2.9.2 Análise estatística das curvas espectrais

Os procedimentos para tratamento dos dados espectrais da vegetação foram baseados na análise multivariada, ferramenta necessária para obter resultados de uma grande variedade de dados. Esta análise é fundamentada na representação das informações originais em poucas variáveis pelo emprego do método de análise de componentes principais (ACP). A ACP é um método estatístico exploratório, que visa a redução e eliminação dos dados de reflectância multicolineares (MARTENS; NAES, 1989).

As componentes principais (CP) são combinações lineares das variáveis originais (MANLY, 2008) e tem base na matriz de correlação dos dados de forma a calcular novas variáveis que expliquem a maior parte da variabilidade dos dados (KENT; COKER, 1992), ou seja, é um algoritmo interativo que extrai uma CP por vez, e cada componente é obtido interativamente por repetidas regressões. Este procedimento é utilizado em análises multivariadas para reduzir o número de variáveis preditoras, e/ou para descrever quais variáveis sãos mais importantes para cada componente principal, e como estes estão relacionados com a variável independente.

O objetivo da ACP foi reduzir a dimensionalidade dos dados espectrais originais e gerar uma tendência de variação dos dados em função da redução de água nas folhas e da espécie de *Eucalyptus.* Além disso, a técnica permite identificar, através do posicionamento das novas variáveis, quais das variáveis originais tem maior influência sobre "*loadings*". Para isso, os dados espectrais foram inseridos no software Parles 3.1, e não passaram por nenhuma transformação. Foi informado ao software para que plotasse cinco componentes principais, porém neste trabalho foram apresentadas apenas aquelas que tiveram maior explicação dos CP's.

Uma vez identificado os comprimentos de onda com maior influência sobre CP, gerou-se um gráfico para averiguar a variação da reflectância em relação ao processo de secagem, em seguida aplicou-se um teste de Tukey ($p<0,05$) nesses λ para comparação entre as médias destes (R Studio).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Análise do Conteúdo Relativo de Água para folhas frescas (CRA_U)

Na metodologia proposta para o cálculo do CRA, as folhas coletadas em campo foram levadas para o laboratório e pesadas 30 minutos após sua coleta para a aquisição dos valores de massa fresca, a qual gerou o conteúdo relativo de água para as folhas frescas, chamado CRA_U. Assim, nessa primeira etapa será analisado os resultados do CRA_U.

3.3.1.1 Análise estatística do Conteúdo Relativo de Água para folhas frescas

A fim de verificar se havia diferença entre a quantidade de água após a coleta de campo para as diferentes espécies, avaliou-se através do teste de análise de variância (ANOVA) se existia diferença estatística a nível de 1% entre os CRA_U (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise de variância para o CRA entre as espécies de *Eucalyptus*

	G.L	S.Q.	Q.M.	F	valor-P
Fator	10	0,006	0,0006	0,4567	0,900
Resíduo	22	0,027	0,001		

Com a análise da Tabela 2 concluiu-se que não existe diferença estatística entre os valores médios do CRA_U, portanto apesar de as espécies pertencerem a diferentes grupos climáticos (STAPE et al., 2014) estas apresentaram um CRA úmido semelhante.

3.3.1.2 Análise descritiva das respostas hiperespectrais das folhas das diferentes espécies de *Eucalyptus*, no tempo úmida

Ao avaliar a Figura **6**, referente ao comportamento espectral médio das 11 espécies do gênero *Eucalyptus* apresentadas na

Tabela **1**, em que a curva média por tempo é representada pela média da resposta espectral das folhas daquela espécie no tempo úmido (CRA_U), ou seja, após serem coletadas no campo. Notou-se que todas as espécies apresentaram um comportamento espectral semelhante ao da vegetação sadia, com bandas de absorção na região de 950nm – 970 nm, 1150 nm – 1260 nm, 1450 nm e 1950 nm, na literatura essas bandas são apresentadas como bandas de absorção da água (RANJAN et al., 2015; CECCATO et al., 2002).

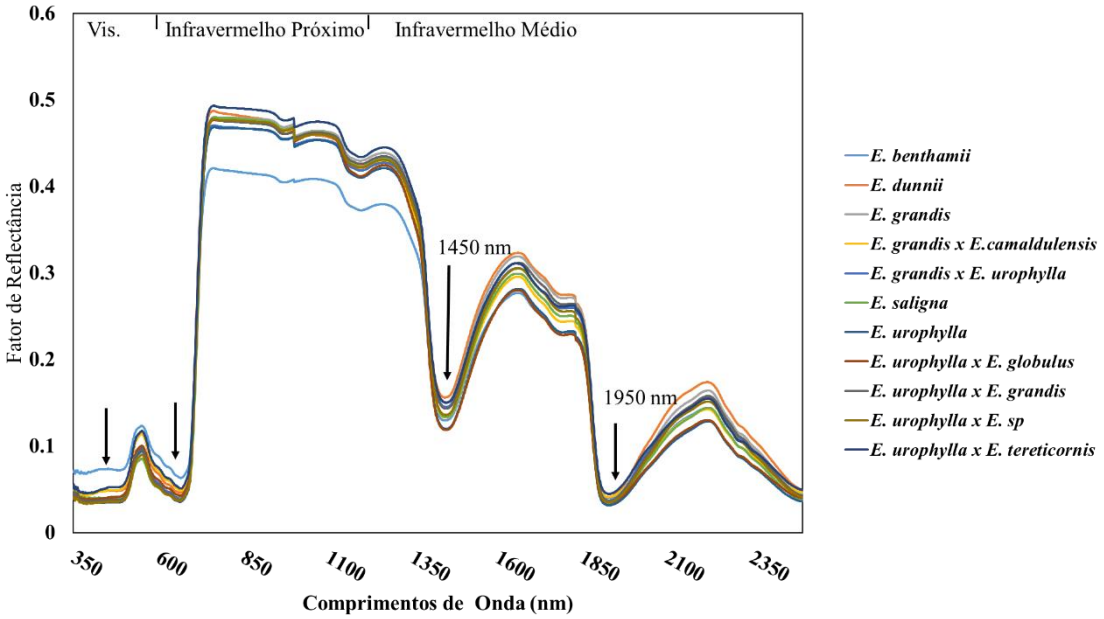


Figura 6 - Comportamento espectral médio das diferentes espécies de *Eucalyptus*, após serem coletadas em campo (CRA_U)

A espécie *Eucalyptus benthamii* se diferenciou espectralmente das outras espécies, pois teve maior intensidade no fator de reflectância ao ser comparada com outras espécies na região do azul (próximo a 445 nm) e equivalente à 7,3% e de 6,9% na região do vermelho (próximo a 645 nm). De acordo com Ponzoni et al. (2012) a reflectância nesses comprimentos de onda são dominados pelos pigmentos existentes nas folhas, pois a radiação eletromagnética (REM) é absorvida principalmente pelas clorofilas, xantofilas e carotenoides e pode ser convertida em calor ou energia na forma de compostos orgânicos por meio da fotossíntese. Em contraposição, a região do infravermelho próximo (720 nm – 1100 nm) e infravermelho médio (1100 nm – 2500 nm) da espécie *E. benthamii* alcançou uma menor intensidade no fator de reflectância (Figura **6**).

A região VIS-NIR é de grande relevância para o estudo da vegetação, pois a relação entre bandas dessas regiões possibilita obter de índices de vegetação que são consagrados pela

eficiência em diferenciar alvos (vegetação e não vegetação) e monitorar a qualidade desta. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um índice que varia de 0 à 1 para vegetação, em que os valores mais próximos de zero tem-se o predomínio de solo exposto, enquanto que os valores mais próximos de um representam uma vegetação mais vigorosa (LIU, 2007). No caso do *E. benthamii*, o índice apresentaria valores inferiores aos valores apresentados pelas outras espécies, pois a relação entre os comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho é menor quando comparado com outras espécies de *Eucalyptus* apresentados na Figura **6**.

Apesar de todas as espécies apresentarem um CRA_U estatisticamente semelhantes (Tabela 2), o *Eucalyptus benthamii* apresentou maior absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho, portanto a menor reflectância não está relacionada com o conteúdo de água na folha, mas provavelmente com a estrutura do mesófilo foliar menos lacunoso, acarretando em um menor espalhamento da energia.

Com análise do comportamento espectral médio da espécie *E. grandis* e do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* (Figura **6**), pode-se averiguar que as espécies apresentaram um comportamento semelhante com um fator de reflectância próximo a 4% na banda do azul e de 4,2% no vermelho. Silva et al. (2012) encontrou uma reflectância próxima à 5% na banda do vermelho ao estudar o comportamento espectral do *Eucalyptus grandis.*

Ao analisar o infravermelho médio, encontrou-se que a maior diferença nessa região do espectro foi entre as espécie *E. benthamii* e *E. dunnii* e chegou à 4,6%. Uma diferença semelhante no fator de reflectância foi identificada entre o *E benthamii* e o híbrido *E. urophylla* x *E tereticornis* (Figura 6) chegando a 4% no comprimento de onda 1400 nm, essa diferença no fator de reflectância provavelmente está relacionada a estrutura celular das diferentes espécies e não a quantidade de água representada pelo CRA_U, pois nesse momento as espécies apresentaram um CRA próximo à 90%.

3.3.1.3 Análise de Componentes principais das respostas hiperespectrais obtidas das folhas frescas (CRA_U)

Aplicar a análise de componentes principais nos dados espectrais possibilitou reduzir a dimensão dos dados para três CP's que explicam a variação dos dados espectrais de folhas das 11 diferentes espécies de *Eucalyptus*, pois os demais CP's tiveram uma baixa correlação com a variância dos dados e não foram incorporados na análise. Analisando a Figura 7, foi possível observar que as componentes principais classificam de forma diferente as espécies que já

haviam apresentado um comportamento distinto na análise visual das curvas espectrais (Figura 6). Os três CP's explicaram 99,98% da variância dos dados originais, sendo que a CP1 explicou 99,86% dessa variabilidade, enquanto que a CP2 e a CP3 explicaram 0,09% e 0,03% da variância, respectivamente; isso significa que a CP1 é a mais importante para a variação na reflectância das folhas das diferentes espécies, assim como apresentado por Mirzaie et al. (2014).

A classificação dos dados espectrais das folhas de *Eucalyptus* foram identificados pela projeção dos três primeiros "*scores*" (CP1, CP2 e CP3) que são resultantes da multiplicação dos "*loandings"* pelas variáveis de interesse (comprimentos de onda) (Figura 7-C). Os "*loandings"* foram determinados pela matriz de covariância composta por 2150 medidas de fator de reflectância. O "*loanding"* da CP1 apresentou semelhança com a resposta espectral da amostra, porém eles não se correspondem diretamente; este "*loanding"* (Figura 7 – C) possui covariância positiva com todo o espectro, consequentemente resulta em um "*score"* positivo. Ao observar a semelhança do "*loanding"* da CP1 com a resposta espectral, pode-se concluir que os comprimentos de onda do infravermelho próximo são os que tem maior peso sobre a formação do "*score*", portanto de acordo com os comprimentos de onda de maior peso sobre a formação da equação, constatou-se que a estrutura da vegetação é o fator de maior influência na posição dos "*scores"* da CP1. Em contraposição com este resultado, o "*loading"* da CP2 é caracterizado por ser parcialmente positivo e parcialmente negativo, sendo que as partes positivas foram fortemente influenciadas pelos comprimentos de maior absorção devido a água (1400 nm e 2250 nm) (RANJAN et al., 2015), mostrando que essa é a característica que tem maior influência sobre a segunda componente (CP2). Já o "*loading"* da CP3 teve maior influência da região do visível, seguida pela influência negativa da banda da água (1900 nm), possibilitando afirmar que a terceira componente (CP3) é dominada pelos efeitos fotossintéticos da folha.

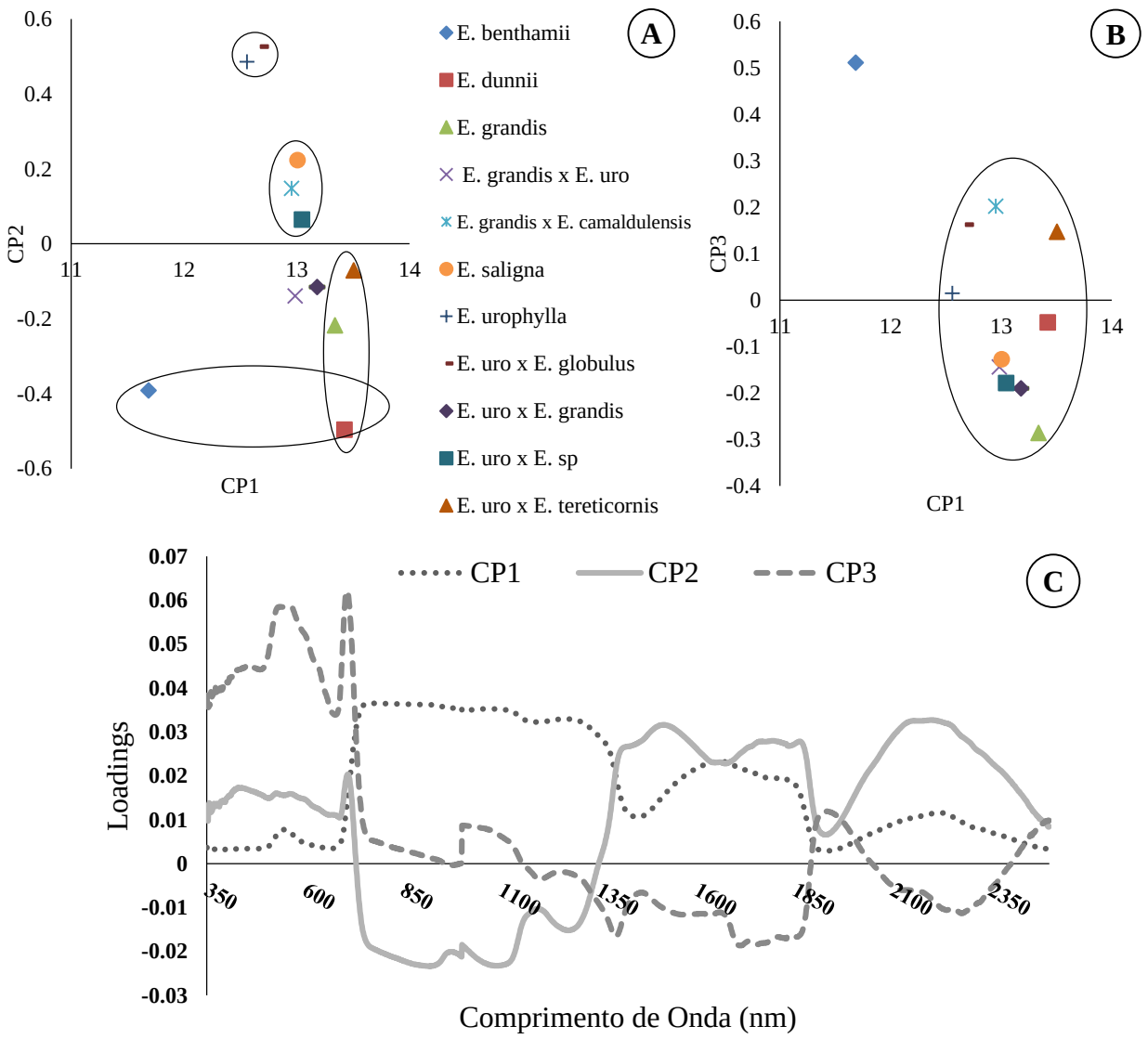


Figura 7 - Análise de Componentes Principais entre as espécies do gênero *Eucalyptus* (A) Scores das CP1 x CP2 (B) Scores das CP1 x CP3 (C) Loadings da CP1, CP2 e CP3

As espécies *E. dunnii* e *E. benthamii* apresentaram a maior diferença visual, como pode-se perceber na Figura 6. Ao examinar o posicionamento dos "*scores*" apresentados na Figura 7 (A) foi possível corroborar com o resultado apresentado na análise descritiva, pois estas espécies apresentam comportamentos distintos na componente principal 1 (CP1), enquanto que os eucaliptos *E. dunnii*, *E. grandis* e o híbrido *E. urophylla* x *E. tereticornis* apresentaram pouco espalhamento na CP1. Com a averiguação da Figura **7** (C) certificou-se que as variáveis que compõem a região entre os comprimentos de onda de 750 nm- 1300 nm são as que apresentam maior peso sobre a equação formadora da CP1, essa região é caracterizada por ter maior influência da estrutura foliar sobre a reflectância (JACQUEMOUD et al., 1996), e é provavelmente o que tem maior influência sobre a diferenciação do comportamento

espectral da espécie *E. benthamii*. As espécies *E. dunnii* e *E. benthamii*, que pertencem ao grupo subtropicais (STAPE et al., 2014), apresentaram pouco espalhamento (Figura **7**-A) na CP2, em que percebeu-se que as principais variáveis que influenciam essa componente são as bandas da água (Figura **7**-C) , diferentemente da CP1 em que as espécie apresentaram-se bem distantes.

As espécies *E. urophylla* e *E. urophylla* x *E. globulus* (Figura **7**-A) apresentaram comportamento semelhante tanto para a CP2 quanto para a CP1. O mesmo comportamento aconteceu com as espécies *E. dunnii* e *E. benthamii*, em que notou-se que essas espécies apresentam uma forte relação, porém em sentidos opostos as duas primeiras.

A ACP foi capaz de classificar as espécies pertencentes ao subgrupo plástico (Figura **7**-A), o agrupamento foi encontrado tanto para a CP1 quanto para a CP2 entre as espécies E. grandis x E. camaldulensis, E. saligna e E. urophylla x E. sp.

Na Figura **7** (B), observou-se que o *Eucalyptus benthamii* apresentou um posicionamento gráfico isolado das outras espécies, sendo que dentro de todo o espectro as variáveis da região do visível foram as que apresentaram maior peso sobre a formação da equação CP3, as bandas do vermelho (704 nm – 715 nm) foram as de maior domínio sobre essa componente principal, portanto de maior influência sobre o posicionamento dos autovalores na CP3. Na análise descritiva (Figura **6**), também foi possível verificar que essa espécie se destacou por possuir maior reflectância no visível, quando comparado com as outras espécies. Tais afirmações estão de acordo com Dian et al. (2016) que ao estudarem a influência das bandas espectrais no conteúdo de clorofila de folhas de seis diferentes espécies arbóreas, constataram que as regiões entre 713 nm – 732 nm e 748 nm – 796 nm tem maior relevância no monitoramento da clorofila.

3.3.2 Avaliação da influência da perda progressiva do Conteúdo Relativo de Água, pelo método de desidratação de folhas, no comportamento espectral

O método proposto em laboratório tem como ideia a perda progressiva de água na folha, pois é muito difícil ter controle sobre os valores intermediários de CRA em experimentos de campo. Testes anteriores foram realizados para se determinar com precisão o tempo de secagem e a temperatura da estufa. Assim neste tópico serão abordados os resultados de perda de água das folhas produzidos nos diferentes tempos de secagem.

3.3.2.1 Análise da variação do CRA pelo método de desidratação

A Figura 8 representa o conteúdo relativo de água na folha, dado em porcentagem (%), para cada espécie de *Eucalyptus*, nos diferentes tempos de secagens (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) e para as folhas no tempo T e U, dividido de acordo com os subgrupos proposto por Stape et al. (2014) plástico, tropical e subtropical. Todas as espécies alcançaram o valor máximo de água na folha ao serem colocadas por 24 horas em água destilada, processo de padronização do CRA denominada de "T". Após o início da desidratação das folhas, em que estas permaneciam por 30 minutos em estufa, ficou evidente a variação de água perdida por espécie em função do tempo (S1, S2, S3, S4, S5,S6, S7). Ao observar os subgrupos em que as espécies são classificadas pelo projeto TECHS (STAPE et al., 2014), notou-se que as espécies caracterizadas por plásticas foram as que apresentaram maior variação média do CRA, indicando menor capacidade de armazenamento da água em suas células, seguido pelo subgrupo de espécies subtropicais e tropicas, respectivamente. Stape et al., 2014 considerou o grupo de espécies plásticas como as espécies de climas intermediários, ou seja, entre clima seco e úmido.

Cao et al. (2015) analisaram a desidratação de folhas de cinco diferentes espécies com base no parâmetro CRA, e notou que todas as espécies possuíam um valor de CRA inicial similar, assim como neste trabalho. Independente da espécie de *Eucalyptus*, essas tem um CRA próximo a 90% que varia em ±2%.

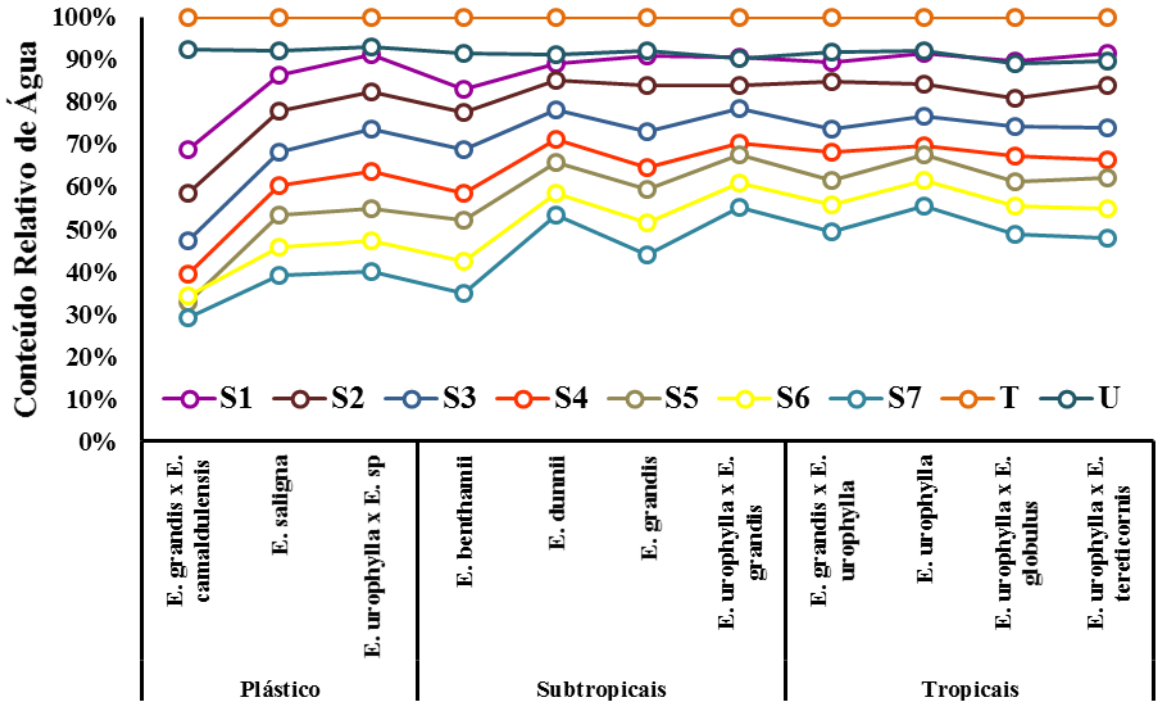


Figura 8 - Representação gráfica dos valores médios do CRA das diferentes espécies de *Eucalyptus*, em diferentes tempos de secagem (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7) e para as folhas no tempo T e U

Dentre todas as espécies observadas, o híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis* foi a espécie que apresentou menor resistência à perda da água, chegando a uma variação descendente de 70,97% no CRA do momento em que a folha se encontrava no estado turgido (T) até a última vez em que a mesma passou pela estufa (S7)(Figura **8**). Outro ponto relevante desta espécie é que durante a primeira secagem das folhas, foi observado uma perda expressiva de água, após esse evento a perda de água manteve-se constante e igual a 11% até o tempo S4, posteriormente apresentou valores menores de perda de água. No tempo S6, a espécie apresentou um CRA_{S6} maior que o CRA_{S5}, provavelmente pela absorção de água do ambiente em que estava sendo realizado a pesagem das folhas, pois o experimento não ocorreu em um ambiente controlado.

Ao analisar a Figura **8**, pode-se perceber que o *Eucalyptus benthamii* foi a segunda espécie que perdeu mais água ao ter a primeira passagem pela estufa (S1), antecedida pelo híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*. Diferente dos resultados encontrados por Merchant et al. (2007) que avaliaram a resposta fisiológica de seis espécies do gênero *Eucalyptus* submetidas ao déficit hídrico, inclusive o *Eucalyptus benthamii*, e verificou que as espécies apresentaram um CRA semelhante (entre 80% - 90%) antes de serem submetidas a escassez de água, e afirmaram que essas espécies tiveram uma alta tolerância ao stress, pois conseguiram manter suas funções celulares, mesmo com a queda da água na folha.

Na Figura **8**, tanto o *E. saligna* quanto o *E. urophylla* x E. sp, pertencente ao subgrupo das espécies plásticas, também apresentaram uma alta variação entre o CRA pelos tempos de secagem, sendo que a primeira espécie perdeu 13,58% de água na primeira passagem pela estufa (S1); essas espécies apresentaram um CRA inferior a 40% no último tempo de secagem (S7).

O *E. urophylla* e o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* apresentaram a menor diferença entre o CRA_T e CRA_{S7}, essa desigualdade foi de 45%, sendo que ambas as espécies partiram de um CRA_U semelhante, em que a primeira apresentou um CRA de 90% e a segunda 92%. Essas espécies apresentaram um comportamento de perda de água semelhante nos tempos S7 (Figura **8**). Fernandes et al. (2015) ao estudar a resposta fisiológica do *E. urophylla* x *E. camaldulensis* e *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. urophylla* cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica, encontraram que o segundo clone apresentou o CRA significativamente inferior aos outros, em contraposição aos resultados encontrados no trabalho em que o *E. urophylla* x *E. grandis* apresentou um CRA superior quando submetido ao mesmo processo de secagem.

Pode-se perceber que as espécies tropicais apresentaram menor variação do CRA ao longo dos tempos de secagem (S1 à S7) em relação as espécies plásticas, enquanto que a maior variação no CRA entre as espécies foi observada dentro dos grupos das espécies subtropicais. As folhas das espécies tropicais foram as mais resistentes a perda gradativa da água, nesse subgrupo todas as espécies possuem algum cruzamento com a espécie *E. urophylla* que é caracterizada por uma alta resistência a seca, e é selecionada para plantios em regiões de baixa disponibilidade hídrica.

3.3.2.2 Análise estatística entre os CRA obtido pelo método de desidratação

A fim de verificar se o método proposto não passou por uma secagem abrupta entre os tempos na estufas e comprovar que o tempo e a temperatura escolhidos foram ideais para essa espécie, fez-se a análise de variância (ANOVA). Não existiu distinção de espécie na média de CRA por tempo de secagem. O resultado foi apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise de variância para o CRA entre os tempos de secagem das espécies de *Eucalyptus*

	G.L	S.Q.	Q.M.	F	valor-P
Fator	8	9,770	1,221	108,625	$2.38348e^{-82}$*
Resíduo	288	3,237	0,011		

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p<0,05$)

De acordo com a Tabela 3, pode-se concluir que existe diferença estatística entre as médias do CRA por tempo de secagem. Portanto, foi realizado um teste de Tukey (Tabela 4), a fim de verificar quais tempos de secagem apresentaram o CRA significativamente diferentes.

Tabela 4 - Teste de Tukey para as médias de conteúdo relativo de água em diferentes tempos de secagem.

Úmida	Túrgida	Seco 1	Seco 2	Seco 3	Seco 4	Seco 5	Seco 6	Seco 7
$0,913^{b}$	1^{a}	$0,872^{bc}$	$0,801^{c}$	$0,713^{d}$	$0,634^{e}$	$0,573^{ef}$	$0,513^{fg}$	$0,449^{g}$

*médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de comparação de médias de Tukey a 95% de probabilidade de confiança.

Com a análise da Tabela 4, foi possível identificar que a média do CRA é estatisticamente diferente no tempo túrgido, enquanto que os outros tempos são estatisticamente semelhantes ao tempo posterior ou anterior. Mostrando a eficiência da metodologia escolhida em relação ao tempo e temperatura de secagem, pois com exceção do Seco 3 e do túrgido, todos os tempos de secagem apresentaram um CRA médio estatisticamente semelhante ao CRA anterior e CRA posterior, evidenciando que não existiu uma perda de água estatisticamente expressiva entre os tempos de secagem.

3.3.2.3 Análise descritiva da influência da perda progressiva da água, pelo método de desidratação, sobre o comportamento espectral das folhas de *Eucalyptus*

Para a análise descritiva da resposta espectral das folhas de *Eucalyptus* submetidas a perda progressiva do conteúdo relativo de água foram selecionadas quatro espécies que mostraram resultados mais expressivas para a diferença de reflectância(Figura 9- B, Figura 10- B, Figura 11-B, Figura 12-B), ou seja, que apresentaram maior diferença entre o comportamento espectral do CRA_{S1}, CRA_{S2}, CRA_{S3}, CRA_{S4}, CRA_{S5}, CRA_{S6}, CRA_{S7} com relação ao $CRA_{T.}$

Para a espécie *E. grandis* x *E. camadulensis* foi esquematizada em forma de gráfico o fator de reflectância dos comprimentos de onda de 350 nm - 2500 nm (Figura **9**). Pode-se observar que a assinatura espectral característica de vegetação sadia permanece, independentemente da quantidade de água encontrada na folha. Na região do visível, o híbrido apresentou o mesmo comportamento para o CRA_T e CRA_U com um pico de reflectância de 12% no comprimento de onda próximo ao 550 nm, que está relacionado à quantidade de clorofila na folha (SCHEPERS et al., 1996), porém com a perda de água na folha, essa região apresentou alterações que pode estar relacionada com o fechamento dos estômatos (SOUZA et al., 2004) e com o rompimento da clorofila (SUN et al., 2008), fatores que influenciam diretamente no processo fotossintético (KERBAUY, 2013) afetando a quantidade de energia absorvida e consequentemente a reflectância das folhas. Ao avaliar a influência do CRA na região do visível, não foi possível afirmar que a água seja o único componente responsável pela alteração da reflectância, mesmo estando indiretamente relacionado com os outros fenômenos já descritos, estes devem ser levados em consideração tanto quanto a água.

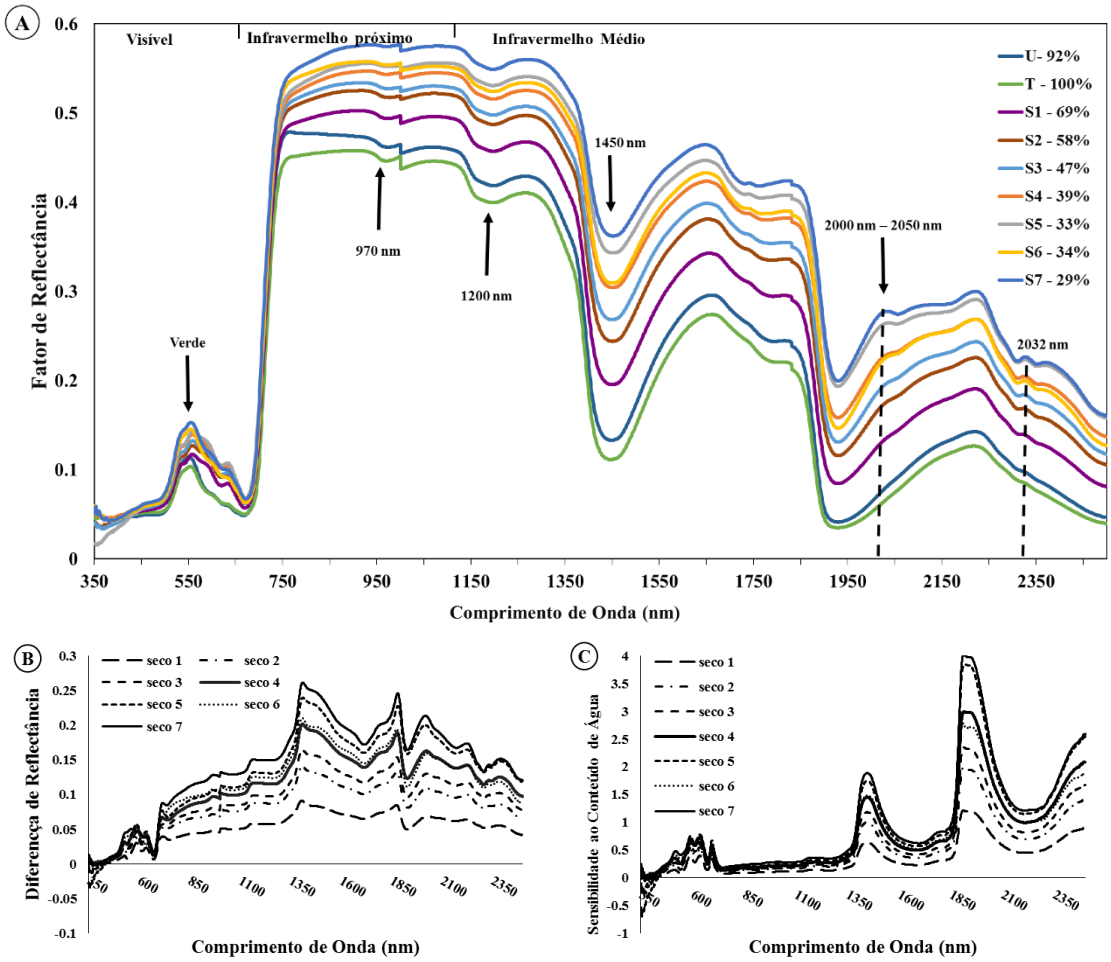


Figura 9 - A- Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água

A região do infravermelho próximo (720 nm – 1100 nm) e uma pequena região do infravermelho médio (1100 nm -1300 nm) estão altamente relacionadas com a estrutura da folha (JACQUEMOUD et al., 1996), porém pode-se notar em todos os gráficos de influência do CRA no comportamento espectral (Figura 9-A, Figura 10-A, Figura 11-A e Figura 12-A) que a dessecação das folhas tem alta influência sobre a resposta espectral, mas essa alteração pode estar relacionada a outros fatores que não somente a água. Foley et al. (2006) verificou que o processo de perda da água varia por espécie devido a diferente organização e estrutura das células do mesófilo foliar; a ruptura celular da espécie *Floss silk* ocorreu rapidamente, enquanto que nas espécies *Common guava* e *Purple guava* ocorreu depois de horas, portanto a diferença espectral das duas últimas espécies teriam maior influência da água, enquanto que a primeira seria altamente influenciada pela ruptura celular, para a região entre 720 nm- 1300 nm. Assim como descrito neste trabalho, apesar de pertencerem ao mesmo gênero, as espécie

tiverem uma perda de água de forma desuniforme e suas respostas espectrais seguiram a mesma tendência que a perda da água.

Em cada tempo na estufa, as folhas perderam água de forma heterogênea (Figura **8**), e como consequência foi possível identificar visualmente uma variação na curva média do fator de reflectância das mesmas folhas de *Eucalyptus*, cujo o fator de reflectância da região do infravermelho aumenta com a perda de água, mais claramente da região de 1300 nm - 2500 nm. Diversos estudos tem apontado resultados similares ao descrito por esse trabalho, ou seja, um aumento na reflectância com a queda do conteúdo de água na folha, principalmente entre os comprimentos de onda de 350 nm – 700 nm e 1300 nm- 2500 nm (CARTER, 1991; PEÑUELAS et al., 1993; CAO et al., 2015). Carter (1991) sugeriu que esse efeito de aumento da reflectância, chamado de "efeito primário", está relacionado a mudança da quantidade de água na folha, o que possibilita avaliar os parâmetro hídricos por meio de dados hiperespectrais.

O aumento da reflectância com a dessecação das folhas também foi encontrado nos comprimentos de onda de 3000 nm à 15000 nm por Fabre et al. (2011) que investigou o processo de secagem em folhas de cerejeira, e verificou que a reflectância nessa região também aumenta com a queda do conteúdo de água nas folhas.

No CRA_T (Figura **9**-A), momento em que as folhas se encontraram no estado túrgido, ou seja, com turgor total das células (KERBAUY, 2013), foi o instante em que a curva espectral exibiu menor intensidade no fator de reflectância para a região do infravermelho próximo e médio, quando comparada com a intensidade da reflectância de menores conteúdos de água na folha, sendo que a diferença no fator reflectância começa a se destacar a partir de 770 nm. De acordo com Ponzoni et al. (2012), na região do infravermelho próximo (IVP) equivalente aos comprimentos de onda entre 720 nm à 1100 nm ocorre pequena absorção da energia eletromagnética (REM) pelas células vegetais e um considerável espalhamento da radiação na folha, sendo que a absorção de energia pela água é geralmente baixa nessa região. Gates et al. (1965) afirmaram que a reflectância de folhas no IVP é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo, e que a disponibilidade de água nessas células podem causar alteração da relação água/ar do mesófilo, portanto podem alterar quantitativamente a reflectância dessa região do espectro.

Ao analisar a resposta espectral da região de 970 nm, banda de absorção de energia devido a água, percebeu-se que a "calha" de absorção de energia começa a aumentar a reflectância no CRA_{S3} (CRA = 47%). Peñuelas e Inoue (1999) também perceberam que a

absorção de energia diminuía com a dessecação na região de 970 nm para plantas de estrutura foliar diferentes, como o amendoim e o trigo.

O comprimento de onda 1200 nm é um ponto do espectro caracterizado pela absorção de energia devido à água. Gao (1996) afirmou que a região entre 800 nm – 1300nm geralmente passa por um aumento no fator de reflectância com a perda da água, porém a banda de 1200 nm é menos influenciada por essa diferença no conteúdo de água, pois esse pico de absorção também é influenciada pela presença de celulose. Ao observar Figura **9**-A, nota-se que apesar da queda no conteúdo relativo de água, próximo a esse comprimento de onda continua sendo uma região de absorção de energia.

O resultado encontrado neste trabalho (Figura **9**-A), corrobora com o que foi exposto por Mirzaie et al. (2014) e Zhang et al. (2015), pois com a redução da água na folha, têm-se um aumento na reflectância dos comprimentos de onda de 1450 nm e 1950 nm, provando que a água é o componente mais influente dessas feições.

Na Figura **9**-A, entre os tempos Seco 5 e Seco 6 do híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*, existiu uma variação ascendente do conteúdo relativo de água, ou seja, ocorreu absorção de água pelas folhas, com um acréscimo de 1% no conteúdo de água. Esta divergência do resultado esperado foi coerente com a curva espectral, que teve uma maior fator de reflectância no CRA_{S5} que no CRA_{S6}. Esta afirmação é mais evidente entre os comprimentos de onda de 1400 nm – 1900 nm. Tal fato, mostra a sensibilidade da resposta espectral a essa pequena variação do CRA, que pode ser observado mais claramente na Figura **9**-B e Figura **9**-C, em que a curva Seco 5 apresenta maiores valores que os dados da curva Seco 6.

No primeiro momento em que as folhas passaram pela estufa (CRA_{S1}), percebeu-se um aumento na intensidade da reflectância entre as bandas 2000 nm- 2050 nm, a partir desse instante a curva passou a apresentar um abaulamento, caracterizado por um aumento na reflectância, que se intensificou com a perda de água. Aproximadamente na banda 2320 nm, identificou-se mais um pico de reflectância que começou a se destacar a partir do CRA_{S2}, e ficou mais evidente com a menor quantidade de água na folha. Dentre todas as espécies de *Eucalyptus* estudadas, o híbrido apresentado na Figura **9**-A foi o único que teve essa variação na assinatura espectral na região do infravermelho médio.

Para representar mais claramente a resposta da reflectância em função da variação do conteúdo de água, fez-se a representação gráfica da diferença de reflectância (Figura **9**- B), em que a maior diferença é encontrada no infravermelho e com um pequena diferença apresentada na região do visível. Para todas as diferenças de reflectância, o valor máximo

estava próximo ao λ_{1400} e $\lambda_{1900.}$ A diferença da reflectância Seco 7 (diferença entre o fator de reflectância do $CRA_{túrgida}$ e CRA_{Seco7}), não apresentou variação no começo do espectro, enquanto que essa variação teve uma amplitude máxima que chegou à 26% no λ_{1400} e 22% no $\lambda_{1855.}$ Uma diferença de reflectância negativa foi encontrada antes do λ_{450} para o Seco2, Seco 3 e Seco 5, ou seja, a folha no momento túrgido tinha uma maior absorção de energia que nos outros tempos de secagem, provavelmente pela queda das atividades fotossintéticas.

Na Figura 10-A, assim como na Figura **9**-A, a característica espectral da vegetação permanece mesmo com a perda da água na folha. Porém, ao observar os comprimentos de onda do visível notou-se uma maior reflectância na região do verde com a passagem das folhas pela estufa, em que o fator de reflectância máximo para o CRA_U foi de 8,6% e para o CRA_{S7} foi de aproximadamente 10,3%. No trabalho realizado por Cao et al. (2015), o comportamento espectral do visível das espécies *Fagus crenata*, *Liquidambar styraciflua* e *Zelkova serrata* também passou por uma descaracterização com a perda de água na folha. Esse evento provavelmente está relacionado pelo “fenômeno secundário”, apresentado por Carter (1991), que varia de acordo com a degradação da clorofila devido a desidratação de folhas.

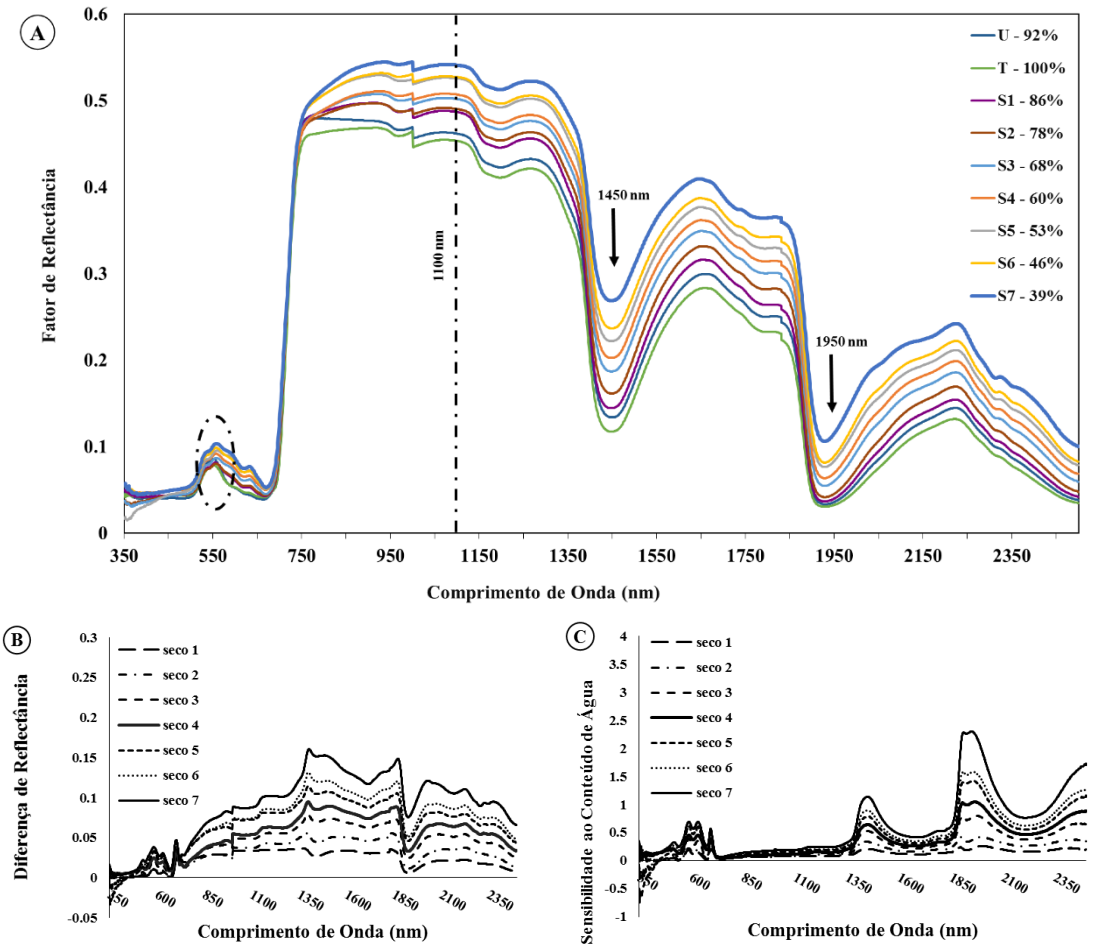


Figura 10 - Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *Eucalyptus saligna*, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água

Na região do infravermelho próximo notou-se que algumas curvas se sobrepõem (Figura 10), assim como encontrado por Cao et al. (2015) ao analisar a variação espectral de folhas de *Fagus crenata* em função da desidratação , mesmo com o CRA diminuindo com cada passagem pela estufa, isso pode acontecer pela baixa variação na estrutura celular entre os tempos CRA_{S1} e CRA_{S2}, CRA_{S3} e CRA_{S4}, ou CRA_{S5} e CRA_{S6}, porém após o 1100 nm verificou-se a distinção das curvas, que passaram a ter uma relação inversa com o CRA, pois quanto menor o conteúdo de água na folha, maior fator de reflectância. Portanto, vê-se a necessidade em apresentar a diferença de reflectância que deixa mais evidente essa desigualdade entre a intensidade da energia refletida.

Ao verificar a diferença de reflectância (Figura 10-B) entre o fator de reflectância do CRA_{S7} e CRA_T (Seco 7), da espécie *E. saligna*, encontrou-se uma diferença de 13,8% no comprimento de onda 1410 nm e de 12,85% no comprimento de onda 1878 nm, sendo estes os comprimentos de onda que apresentaram maior sensibilidade ao conteúdo de água (Figura

10-C). Ao analisar a diferença entre o comportamento espectral dos diferentes CRA's, percebeu-se que a maior variação de reflectância foi de 3,23% no comprimento de onda 1457 nm, entre os tempos do CRA_{S6} e CRA_{S5}, enquanto que a perda de água na folha foi 8% nesses mesmo instantes.

Ao explorar os gráficos de comportamento espectral médio em função da variação de CRA da espécie *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp, explanado na Figura 11, foi possível identificar que entre os comprimentos de onda de 750 nm à 850 nm (IVP), a folha CRA_U foi representada por um comportamento característico da vegetação sadia, e quando a folha se encontra no estado túrgido, a assinatura espectral é mantida, porém com menor intensidade, devido a absorção da REM pela água. Wang & Li, 2012 ao investigarem a curva espectral e o conteúdo de água na espécie arbórea *Fagus crenata* em diferentes regiões montanhosas, encontrou o mesmo comportamento para as folhas em todas as espécies, porém com intensidades de reflectância diferentes que variavam de acordo com a quantidade de água nas espécies.

Ao avaliar o fator de reflectância da Figura 11-A, calculou-se que a maior diferença ocorre próximo a banda caracterizada por banda da água (1455 nm) e igual a 3,8%, entre o CRA_{S6} e CRA_{S7}. Na Figura 11-B encontrou que a diferença de reflectância entre o CRA_{S7} e o CRA_T foi de aproximadamente de 17%., no comprimento de onda de λ_{1441}. Valores bem superiores para a diferença de reflectância foram encontrados por Cao et al. (2015) para espécie *L. styraciflua*, chegando a 40%, no comprimento de onda próximo ao 1400, esta diferença de reflectância foi encontrada para um CRA de 4%.

Apesar de a espécie *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp apresentar uma sensibilidade ao conteúdo da água (Figura 11-C) menos expressiva que o *E. grandis* x *E. camaldulensis*, nota-se que os comprimentos de onda que apresentaram maior sensibilidade continuam sendo as bandas da água λ_{1400} e λ_{1900}, sendo que a região do visível, próximo a banda do verde, apresentou uma sensibilidade quase tão relevante quanto o λ_{1400}.

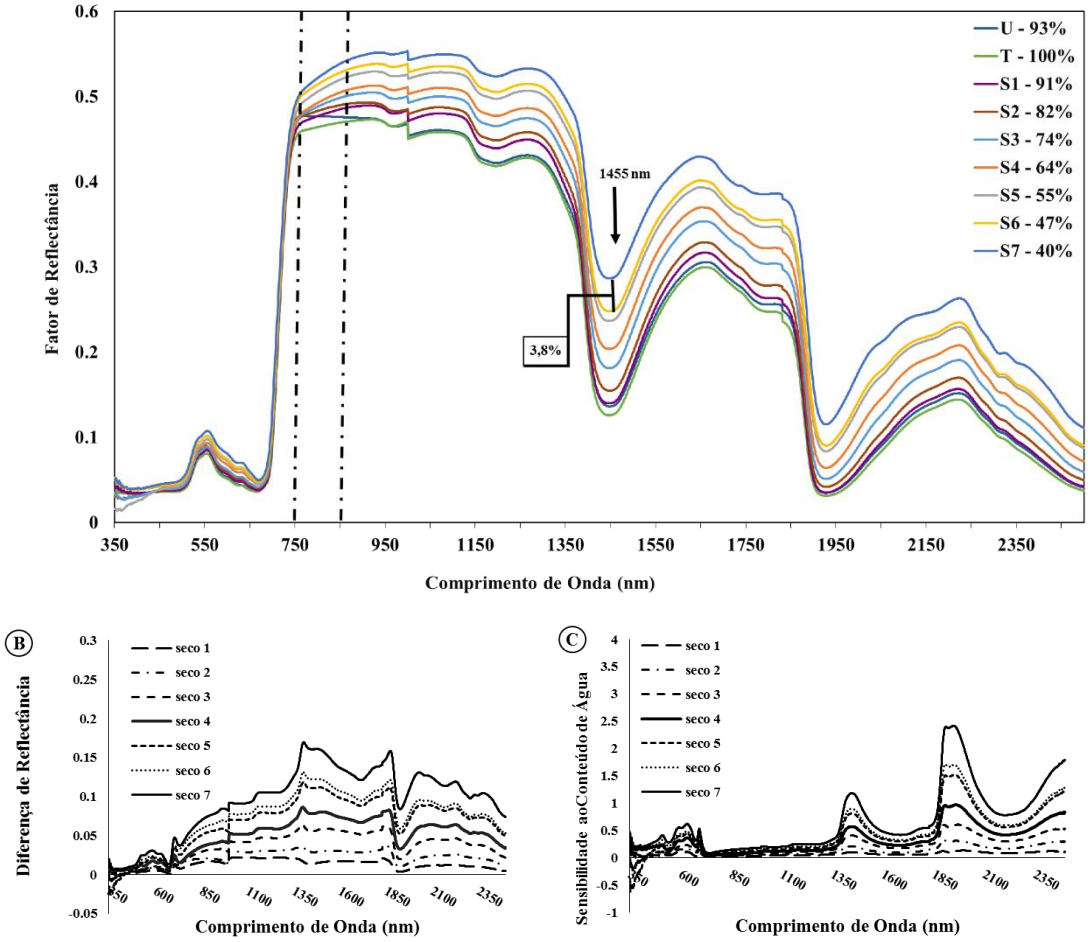


Figura 11 - Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus* sp, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água

Como apresentado na Figura 8, o *Eucalyptus benthammi* foi a segunda espécie que apresentou maior variação no CRA da folha, e notou-se na Figura **12** que no início da região do infravermelho médio (1100 nm) até a o comprimento de onda de 1350 nm, foram observados alguns tempos de secagem em que a reflectância da folha é similar a reflectância do tempo anterior, como o CRA_{S1} e o CRA_{S2}. A maior diferença na reflectância aconteceu próximo ao comprimento de onda de 1250 nm e foi de 9% entre o CRA_{S5} e CRA_{S6}, nesse mesmo intervalo, percebeu-se que a diferença entre o CRA do tempo Seco 6 e Seco 7 foi de 6% (Figura **8**), porém a variação na reflectância foi imperceptível. A diferença de reflectância do CRA_T e CRA_{S1} (Seco 1) também foi negativo nos comprimentos de onda entre 950 nm – 1350 nm (Figura **12**-B).

Ao analisar a Figura **6**, já se discutiu que a espécie *E. benthamii* se diferencia das outras espécies de *Eucalyptus* devido a sua menor intensidade de reflectância na região do infravermelho, ao verificar a sensibilidade do espectro em função do conteúdo de água na

folha Figura **12**-C, percebeu-se que mesmo quando a folha apresenta o menor quantidade de água, CRA no tempo seco 7= 36%, portanto o maior fator de reflectância ao ser comparado com os tempos anteriores, esta espécie não alcançou o valor de 50% de reflectância na região do infravermelho próximo (Figura **12**-A), enquanto que o híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis* esse valor chegou quase a 60%.

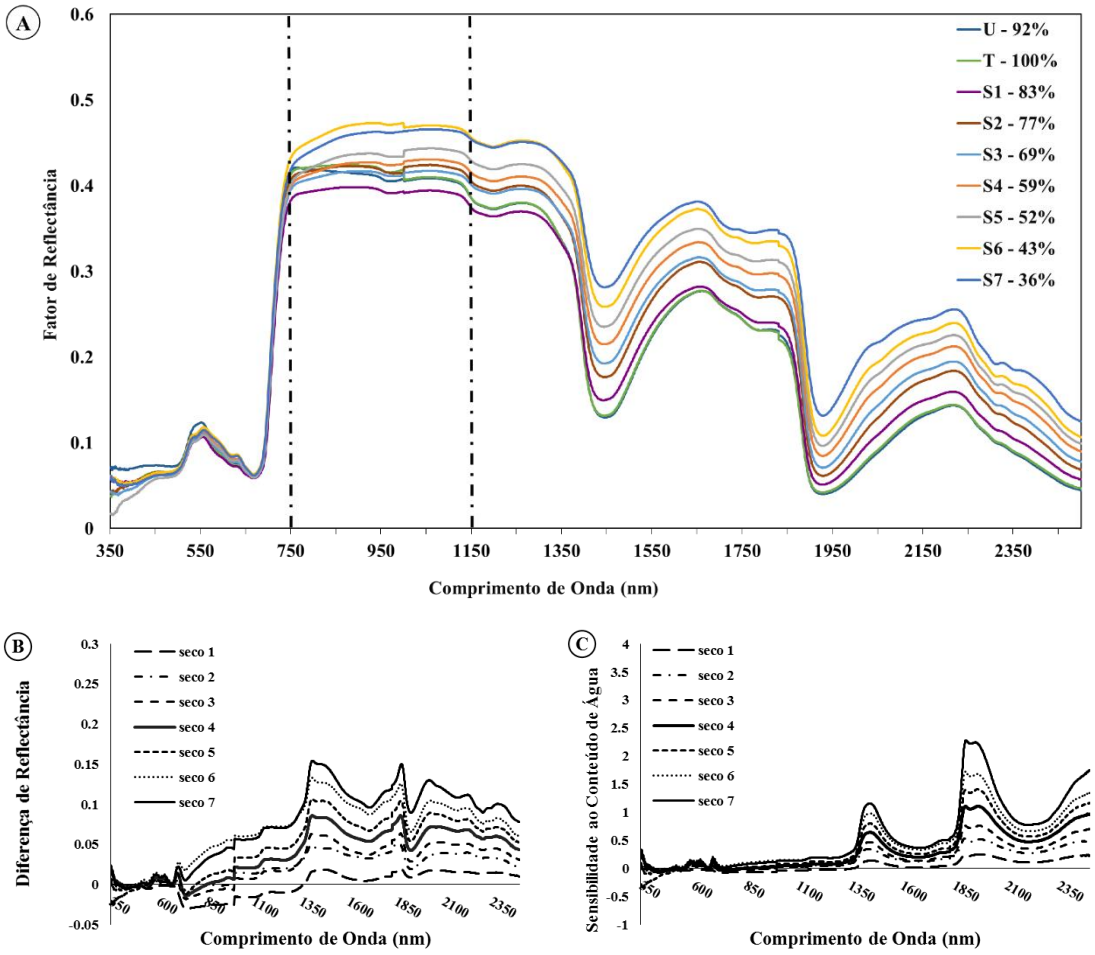


Figura 12 - A-Comportamento espectral médio de diferente conteúdos relativos de água em folhas de *Eucalyptus benthamii*, B- Diferença entre a reflectância pelos comprimentos de onda e C- Sensibilidade da Reflectância para o conteúdo relativo de água

Ao analisar o CRA_{S6} e CRA_{S7}, entre os comprimentos de onda de 750 nm-1300 nm, percebeu-se que as espécies pertencentes ao subgrupo plástico tiveram um aumento na reflectância mais significativo em relação a diminuição do CRA's. Na espécie *E. benthamii* existiu uma inversão inesperada no fator de reflectância entre as bandas 750 nm - 1150 nm, em que a queda de 7% entre CRA_{S6} e CRA_{S7} gerou uma diminuição na reflectância e fica mais evidente na Figura 12-B, portanto, pode-se afirmar que outros fenômenos tiveram maior

influência que a perda da água sobre o comportamento espectral. Assim como a espécie *F crenata* estudada por Cao et al. (2015), apesar de ter passado por uma variação de 48% para 16% no conteúdo relativo de água, teve uma resposta espectral inesperado entre os comprimentos de onda de 750 nm-1100 nm.

3.3.2.4 Análise estatística dos dados espectrais em função da variação do CRA

Na Figura **13**(A), foi apresentado a análise de componentes principais das respostas espectrais médias por tempo de secagem. Com essa análise verificou-se estatisticamente que existe diferença do comportamento espectral pelo tempo de secagem, assim como na análise descritiva.

A Figura **13**-A caracteriza o comportamento das variáveis em função da secagem e possibilita fazer a análise da ACP. Os dois primeiros componentes principais explicaram 99,96% da variância dos dados originais, sendo que a CP1 explicou 99,48% e a CP2 explicou 0,47% da variância. Os demais CP's tiveram uma baixa correlação com a variância dos dados e não foram incorporados na análise. A ferramenta multivariada aplicada nos dados espectrais possibilitou classificar os tempos de secagem em dois "*scores*" (CP1 e CP2).

Ao analisar a Figura **13** (A), pode-se perceber que essa análise foi promissora para verificar que o conteúdo relativo de água tem influência no fator de reflectância de folhas de *Eucalyptus*, sendo que a classificação dos dados espectrais referentes ao tempo de secagem das folhas de *Eucalyptus* foram identificados pela projeção dos dois primeiros "*scores*". O "*loading*" do primeiro CP (Figura **13**-C) apresenta semelhança com o comportamento espectral da amostra, e possui covariância positiva com todo o espetro resultado em uma CP1 positivo, enquanto que o "*loading*" da CP2 (Figura **13**-C) possui uma pequena covariância positiva nas faixas do violeta e azul e entre as bandas 711 nm - 1346 nm, e uma covariância negativa da banda 1347 nm – 2500nm, sendo que as bandas 1450 nm, 1887 nm e 2101 nm foram as que apresentaram a mais forte covariância.

Analisando-se a CP1, verificou-se que um grupo de novas variáveis se separou do restante das variáveis de forma distinta, portanto fez-se um gráfico das mesmas CP's, colocando em destaque as espécies de *Eucalyptus* (Figura **13**-B), com isso constatou-se, assim como já apresentado nas Figura **6** e Figura **7**, que a espécie *E. benthamii* se separa das outras espécies, e essa diferença se propaga desde a primeira coleta até a última secagem.

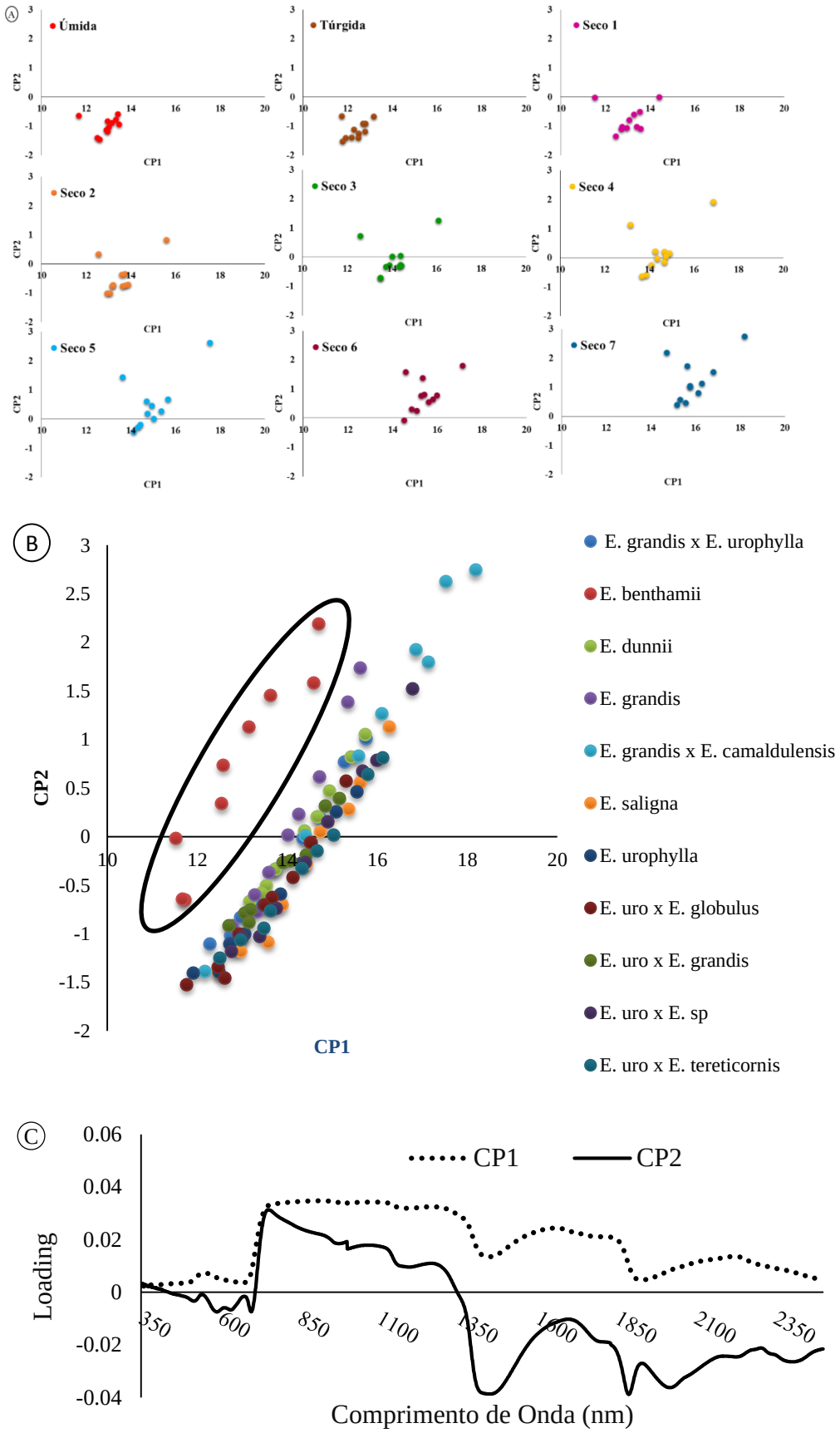


Figura 13 - (A) Gráfico de Componentes Principais em função dos tempos, (B) Gráfico de Componentes Principais em função das espécies e (C) Gráfico de *loadings* das Componentes Principais

Ao analisar a Figura **13**(A), observou-se que ao passo que as folhas diminuem o conteúdo relativo de água, ou seja, perdem água em função do tempo, existiu uma variação ascendente tanto na CP1 quanto na CP2. Com a análise da Figura **13** (C), verificou-se que a CP1 tem uma alta influência da região entre 720 nm – 1380 nm, região caracterizada por Ponzoni et al. (2012), pela estrutura da vegetação, como pode ser observado na Figura **13** (A), apesar de existir uma diferenciação entre os tempos de secagem na CP1, foi a CP2 que apresentou maior distinção entre os CRA's, pois na CP1 os tempos seco 2 e seco 3 tem uma posição gráfica semelhante, como se não houvesse diferença, este mesmo resultado é apresentado nos tempos de seco 6 e seco 7.

Com a averiguação do eixo y do gráfico de componentes (Figura **13**-A), fica evidente a variação ascendente e inversa da CP2 em função da água, ou seja, quanto menor o CRA das folhas maior o valor na CP2, essa dedução é coerente com a análise gráfica dos "*loadings*" (Figura 13- C), em que as variáveis de maior influência sobre a CP2 são os comprimentos de onda próximos ao 1450 nm, 1950 nm e 2200 nm (Ranjan et al., 2015), bandas relacionada a absorção de água. Os "*loadings*" da CP2 tem uma correlação inversa com a mesma, corroborando portanto com o resultado já apresentado.

De acordo com a Figura **13**-C viu-se que as CP2 é fortemente influenciada pelos λ 1450 nm, 1887nm e 2101nm, portanto na Figura **14** foi apresentado a variação da reflectância em função da secagem nesses comprimentos de onda e pode-se perceber que essa variação é ascendente em relação a perda da água na folha.

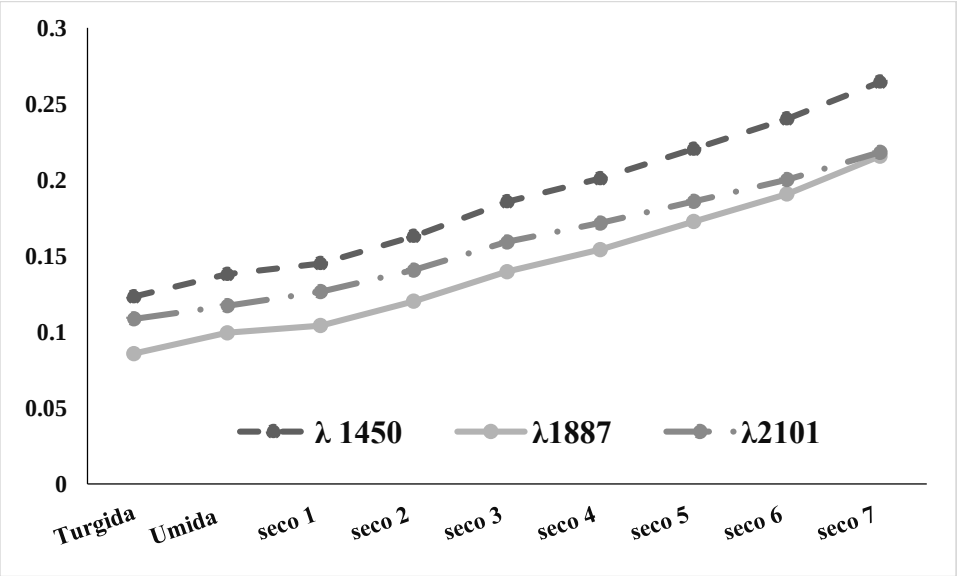


Figura 14 - Variação do fator de reflectância em função do tempo de secagem

Em seguida foi realizado um teste de Tukey para verificar se existia diferença estatística entre os tempos de secagem dos picos espectrais de todas as espécies de *Eucalyptus*, representados na segunda componente principal (Tabela **5**).

Tabela 5 - Teste de Tukey para o fator de reflectância das bandas 1450 nm, 1887 nm e 2101 nm pelos tempos de secagem

	λ_{1450}		λ_{1887}		λ_{2101}	
Túrgida	0,12	f	0,08	F	0,10	f
Úmida	0,131	f	0,09	Ef	0,11	ef
seco 1	0,14	ef	0,10	Ef	0,12	ef
seco 2	0,16	def	0,12	def	0,14	de
seco 3	0,18	cde	0,13	cde	0,15	cd
seco 4	0,20	bcd	0,15	bcd	0,17	bcd
seco 5	0,22	bc	0,17	Bc	0,18	bc
seco 6	0,24	ab	0,19	Ab	0,20	ab
seco 7	0,26	a	0,21	A	0,21	a

*médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de comparação de médias de Tukey a 95% de probabilidade de confiança

O resultado do teste de Tukey da Tabela **5** mostrou que todos os tempos tiveram semelhança estatística com o fator de reflectância do tempo posterior ou anterior, para os três comprimentos de onda. Para o comprimento de onda de 1450 nm, o fator de reflectância no momento túrgida passou a ter diferença estatística após a terceira passagem pela estufa, este mesmo comportamento foi encontrado no comprimento de onda de 1887 nm, enquanto que a média do fator de reflectância das folhas no estado túrgido para o comprimento de onda de 2101 nm apresentaram diferença estatística com a média do fator de reflectância dos outros tempos de secagem após a segunda passagem das folhas na estufa.

3.4 Conclusão

É possível pela metodologia de desidratação desenvolvida neste trabalho, obter valores intermediários do conteúdo relativo de água e a influência deste parâmetro no comportamento espectral de diferentes espécies de *Eucalyptus.*

Para as regiões do infravermelho próximo e infravermelho médio, quanto menor o conteúdo relativo de água maior o fator de reflectância, independente da espécie de

Eucalyptus, sendo que os comprimentos de onda centrados em 1400 nm e ao 1900 nm são os mais sensíveis a essa variação.

O *Eucalyptus benthammmii* tem um comportamento espectral com menor fator de reflectância na região do infravermelho próximo e médio quando comparado as demais espécies do mesmo gênero.

Os comprimentos de onda 1450 nm, 1887 nm e 2101 nm são os que tem maior influência no fator de reflectância devido a variação do conteúdo de água, de acordo com a análise de componentes principais.

Referências

ALBUQUERQUE, M.P.F.; MORAES, F.K.C.; SANTOS, R.I.N.; CASTRO, G.L.S.; RAMOS, E.M.L.S.; PINHEIRO, H.A. Ecofisiologia de plantas jovens de mogno-africano submetidas a déficit hídrico e reidratação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 48, n. 1, p. 9-16, 2013.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Gebruder, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ARNDT, S.K.; IRAWAN, A.; SANDERS, G. Apoplastic water fraction and rehydration techniques introduce significant errors in measurements of relative water content and osmotic potential in plant leaves; **International Journal for Plant Biology**, Lund, v. 155, p. 355-368, 2015.

CARLSON, J.D.; BURGAN, R.E. Review of user needs in operational fire danger estimation: the Oklahoma example. **International Journal of Remote Sensing,** London, v. 24, p. 1601–1620, 2003.

CAO, Z.; WANG, Q.; ZHENG, C.; Best hyperspectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. **Ecological Indicator**s, New York, v. 54, p. 96-107, 2015.

CASCARDO, J.C.M.; OLIVEIRA, L.E.M. de; SOARES, A.M. Disponibilidade de água e doses de gesso agrícola nas relações hídricas da seringueira. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal,** Londrina, v. 5, p. 31-34, 1993.

CARTER, G.A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, Baltimore, v. 78, p. 918- 924, 1991.

CECCATO, P.; GOBRON, N.; FLASSE, S.; PINTY, B.; TARANTOLA, S. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. Part 1: theoretical approach **Remote Sensing Environment**, New York, v. 82, p. 188-197, 2002.

DATT, B. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. **Australian Journal of Botany**, East Melbourne, v. 47, p. 909-923, 1999.

DIAN, Y.; LE, Y.; FANG, S.; XU, Y.; YAO, C.; LIU, G. Influence of spectral bandwidth and position on chlorophyll content retrieval at leaf and canopy levels. **Journal Indian Society of Remote Sensing**, Easton, v. 44, n. 4, p. 1-11, 2016.

FABRE, S.; LESAIGNOUX, A.; OLIOSO, A.; BRIOTTET, X.; Influence of water content on spectral reflectance of leaves in the 3-15µm domain; **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, New York, v. 8, n. 1, p. 143-147, 2011.

FERNANDES, E.T.; CAIRO, P.A.R.; NOVAES, A.B. Resposta fisiológica de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 1, p. 29-34, 2015.

FERREIRA, M.M.C.; ANTUNES, A.M.; MELGO, M.S.; VOLPE, P.L.O. Quimiometria. I: Calibração multivariada, **Química Nova**, Campinas, v. 22, p. 724–731, 1999.

FOLEY, S.; RIVARD, B.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G.A.; CALVO, J. Foliar spectral properties following leaf clipping and implications for handling techniques. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 103, p. 265–275, 2006

GAO, B. NDWI- A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing Environment**, New York,, v. 58, p. 257-266, 1996.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Easton, v. 4, p. 11-20, 1965.

HUNT, E.R. Jr.; ROCK, B.N.; NOBEL, P.S.; Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 22, p. 429–435, 1987.

JACQUEMOUD, S.; USTIN, S., VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G.; ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 56, p. 194–202, 1996.

JONES, H.G. **Plants and microclimate:** a quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 86

KENT, M.; COKER, P. **Vegetation description and analysis.** Baffins Lane: Wiley Blackwell, 1992.

KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal.** 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils.** Newark: Academic Press, 1995. 489 p.

LIU, W.T.H. **Aplicações do sensoriamento remoto.** Campo Grande: Ed. Uniderp, 2007. 239 p.

MANLY, B.J.F. **Métodos estatístico multivariados:** uma introdução. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

MARTENS, H.; NAES, T. **Multivariate calibration.** New York: Wiley, 1989. 419 p.

MERCHANT, A.; CALLISTER, A.; ARNDT, S.; TAUSZ, M.; ADAMS, M. Contrasting physiological responses of six Eucalyptus species to water deficit. **Annals of Botany,** Oxford, v. 100, p. 1507-1515, 2007.

MIRZAIE, M.; DARVISHZADEH, R.; SHAKIBA, A.; MATKAN, A.A.; ATZBERGER, C.; SKIDMORE, A. Comparative analysis of different uni- and multi-variate methods for estimation of vegetation water content using hyper-spectral measurements. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 26, p. 1–11, 2014.

MORGAN, J.M. Adaptation to water deficits in three grain legume species: mechanisms of turgor maintenance. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, p. 91-106, 1991.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A.; BEZERRA NETO, E.E.; Alterações na resistência à difusão de vapor de folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2001.

OTTO, M.S.G.; VERGANI, A.R.; GONÇALVES, A.N.; VRECHI, A.; SILVA, S.R.; STAPE, J. L. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 431-439, 2013.

OUMAR, Z.; MUTANGA, O. Predicting plant water contente in *Eucalyptus grandis* forest stands in KwaZulu-Natal, South Africa using field spectra resampled to the Sumbandila satellite sensor. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 12, n. 3, p. 158-164, 2010.

PACHECO, A.C., CAMARGO, P.R., SOUZA, C.G.M. Deficiência hídrica e aplicação de ABA nas trocas gasosas e no acúmulo dos flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.). **Acta Scientiarum.** Agronomy. Maringá, v. 33, n. 2, p. 275-288, 2011.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL, C.; SERRANO, L.; SAVE, R. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 14, p. 1887–1905, 1993.

PEÑUELAS, J.; INOUE, Y.; Reflectance índices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. **Photosynthectica**, Praha, v. 36, p. 355-360, 1999.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.A.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação.** 2. Ed. São José dos Campos: Oficina de Texto, 2012.

PORTES, M.T., ALVES, T.H., SOUZA, G.M. Water deficit affects photosynthetic induction in *Bauhinia forficata* Link (Fabaceae) and *Esenbeckia leiocarpa* Engl. (Rutaceae) growing in understorey and gap conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 18, n. 4, p. 491-512, 2006.

RANJAN, R.; SAHOO, R.N.; CHOPRA, U.K.; PRAMANIK, M.; SINGH, A.K.; PRADHAN, S. Assessment of water status in wheat (*Triticum aestivum* L.) using ground based hiperespectral reflectance. **Biological Sciences**, New York, v. 5, n. 20, p. 1-12, 2015.

SCHEPERS, J.S.; BLACKMER, M.T.; WILHELM, W.; RESENDE, M. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. **Journal of Plant Physiology**, New York, v. 148, p. 523-529, 1996.

SILVA, E.A.; MARANGON, G.P.; DESSBESELL, L.; MORAIS, W.W.; LIPPERT, D.B.; PEREIRA, R.S. Caracterização espectral na reflectância de *Eucalyptus gradis*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 285-292, 2012.

SILVA, S.R.S.; DEMUNER, A.J.; BARBOSA, L.C.A.; CASALI, V.W.D.; NASCIMENTO, E.A.; PINHEIRO, A.L. Efeito do estresse hídrico sobre características de crescimento e a produção de óleo essencial de *Melaleuca alternifolia* Cheel. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1363-1368, nov./dez. 2002.

SHEN, Y.; SHI, R.; NIU, Z.; YAN C. Estimation models for vegetation water content at both leaf and canopy levels. **Proceedings IEEE International,** Amsterdam, v. 2, p. 1387-1388, 2005.

SOUZA, R.P.; MACHADO, E.C.; SILVA, J.A.B.; LAGÔA, A.M.M.A.; SILVEIRA, J.A.G.; Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculate*) during water stress and recovery. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 51, p. 45-56, 2004.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M.T. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3., 2014, Campinas. **Anais…** Campinas: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.

SUMMY, K.R.; LIEMAN, J.; GANDY, Y.P.; MAMACHEN, A.; GOOLSBY, J.; MORAN, P.J. Effects of leaf excision and sample storage methods on spectral reflectance by foliage of giant reed, *Arundo donax*. **Subtropical Plant Science**, Texas, v. 63, p. 54-64, 2011.

SUN, P.; LIU, S.; CASACCHIA, R.; PIETRINI, F.; LORETO F.; CENTRITO, M.; Associated changes in physiological parameters and spectral reflectance indices in olive (*Olea europea* L.) leaves in response to different levels of water stress. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 29, p. 1725-1743, 2008.

SUN, P.; WAHBI, S.; TSONEV, T.; HAWORTH, M.; LIU, S.; CENTRITTO, M. On the use of leaf spectral indices to assess water status and photosynthetic limitations in Olea europaea L. during water-stress and recovery. **Plos One**, San Francisco, v. 9, n. 8, p. 1–12, 2014.

TURNER, N.C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil**, Hague, v. 58, n. 3, p. 339-366, 1981.

VIDAL-TORRADO, P.; SPAROVEK, G. **Mapa pedológico detalhado do Campus Luiz de Queiroz.** Piracicaba: ESALQ, 1993. Escala 1: 10000.

WANG, Q.; LI, P. Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water contents using PROSPECT simulated dataset and field reflectance measurements. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 26, p. 1230-1241, 2012.

YI, Q.; BAO, A.; WANG, Q.; ZHAO, J. Estimation of leaf water content in cotton by means of hiperespectral indices. **Computer and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 90, p. 144-151, 2013.

ZHANG, C.; PAN, Z.; DONG, H.; HE, F.; HU, X. Remote estimation of leaf water content using spectral index derived from hyperspectral data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCE AND ELECTRONIC TECHNOLOGY, 1., Wuhan, 2015. **Proceedings…** Wuhan: Atlantis Press, 2015. p. 20-23.

4 MODELOS ESPECTRAIS PARA A ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA EM FOLHAS DE *Eucalyptus*

Resumo

O conteúdo relativo de água (CRA) e a espessura equivalente da água (EEA) são parâmetros que fornecem diversas informações sobre a condição hídrica da planta. O sensoriamento remoto hiperespectral é uma técnica rápida e não destrutiva capaz de gerar dados que permitem quantificar o estado hídrico da vegetação. Neste trabalho, buscou-se estabelecer as relações existentes entre variações nos parâmetros da água CRA e EEA com a resposta espectral da folha de diferentes espécies de *Eucalyptus*, utilizando um sensor hiperespectral. Os parâmetros da água e os dados espectrais foram medidos em laboratório. No entanto, um modelo espectral para predizer água em diversas espécies continua sendo um desafio, devido ao limitado conjunto de dados coletados em campo para medição em laboratório. Portanto, foi aplicado uma metodologia de desidratação das folhas, a fim de obter um conjunto de dados abrangente, com intervalos difíceis de se obter em campo. Foram testados oito índices espectrais para predizer os parâmetros da água nas folhas e encontrou-se que o índice $SR_{1300,1450}$ teve um R^2= 0,72 ao ser correlacionado com o CRA e um R^2=0,81 ao ser correlacionado com o EEA. Os dados espectrais foram correlacionados com os parâmetros da água, e encontrou-se que para o CRA o comprimento de onda 1881 nm apresentou um coeficiente de correlação máximo negativo de r= -0,89, enquanto que o EEA apresentou um coeficiente de correlação máximo negativo de r= -0,79 no comprimento de onda 2165 nm. Foram testados quatro métodos de seleção das variáveis hiperespectrais para gerar um modelo matemático por meio do método de regressão linear. Para o parâmetro CRA, o método de seleção de variáveis *stepwise* foi o que gerou o maior R^2= 0,86 e com um RMSE = 13,85%, sendo que neste método restaram apenas seis variáveis preditoras. Enquanto que o método de seleção de variáveis pelas regiões do espectro foi o mais preciso para predizer o parâmetro EEA com um R^2= 0,87 e um RMSE = 0,00012g/cm², sendo necessário apenas 5 variáveis espectrais.

Palavras-chave: Conteúdo relativo da água; Densidade equivalente da água; Sensoriamento remoto hiperespectral; Índices espectrais; Modelos espectrais

Abstract

The relative water content (RWC) and equivalent water thickness (EWT) are parameters that provide a diversity of information about the plant's hydric condition. Hyperespectral remote sensing is a fast and non-destructive technique capable of generating data that allow the quantification of vegetation's hydric condition. In this study, it was sought to establish the existing relations among the water parameters (RWC and EWT) with the leaf spectral response of different species of *Eucalyptus* by using a hyperespectral sensor. The water parameters and the spectral data were measured in laboratory. However, a spectral model for predicting water in different species is still a challenge due to limited field collection for measurements in laboratory. Thus, a leaf dehydration methodology was applied aiming to obtain a wider data set, with intervals that are hard to find in the field. Eight spectral indices were tested for the prediction of water parameters. The $SR_{1300,1450}$ had an R^2=0,72 when correlated to the RWC and a R^2=0,81 when correlated to the EWT. The spectral data were correlated to the water parameters and it was found that the RWC at 1881 nm presented

a maximum negative coefficient of correlation of r=-0,89 whereas the EWT presented a maximum negative coefficient of correlation of r=-0,79 at 2165 nm. Four methods of selecting hyperespectral variables were tested to generate a mathematical model through linear regression. For the RWC parameter the stepwise variable selection method generated the higher R^2=0,86 with a RMSE = 13,85%, considering that just six predicting variables were left in this method. While the variable selection method by spectral regions was the most precise to predict the EWT parameter with an R^2=0,87 and an RMSE=0,0012g/cm², being necessary jut 5 spectral variables.

Keywords: Relative water content; Equivalent water thickness; Hyperespectral remote sensing; Spectral indices; spectral models

4.1 Introdução

O conteúdo de água é uma importante característica da vegetação (ZHANG; ZHOU, 2015). Os conhecimentos relacionados com a condição de água na vegetação podem contribuir para determinar seu estado fisiológico (PEÑUELAS et al., 1993,1994), a tolerância e a adaptação de plantas à seca (ARDNT et al., 2015) e averiguar a suscetibilidade de incêndios em áreas florestais (CHUVIECO et al., 2004).

O conteúdo relativo de água (CRA) e a densidade equivalente da água (EEA do inglês *Equivalent Water Thickness*) são parâmetros utilizados para estimar a quantidade de água na folha. O CRA é uma variável dada em porcentagem (%) que quantifica a proporção de água e matéria seca na vegetação (FERNANDES et al, 2015; ARDNT et al., 2015), enquanto que o EEA estima a quantidade de água pela área foliar (YI et al., 2013; WANG; LI, 2012; MOBASHERI; FATEMI, 2013; RANJAN et al., 2015) e varia de acordo com as características das folhas (CECCATO et al., 2001).

O cálculo do conteúdo de água na vegetação tem sido obtido pelo método tradicional de laboratório, que envolve a pesagem e secagem de folhas na estufa para determinar sua perda de massa, processo simples, porém com uma alta magnitude de erros devido à dificuldade ao determinar a massa túrgida (DREYER et al., 1990; ARDNT et al., 2015). No entanto, o Sensoriamento Remoto tem sido muito utilizado para quantificar parâmetros biofísicos (AHAMED et al., 2011) e bioquímicos (CROFT et al., 2014) da vegetação, por ser uma técnica rápida e não destrutiva. O conteúdo de água é uma propriedade da vegetação que pode ser investigada por dados de sensoriamento remoto conhecida por espectroradiometria (ZARCO-TEJADA et al., 2003; DATT, 1999; ZHANG et al., 2012; YI et al., 2012; MIRZAIE et al., 2014).

Os índices de vegetação são associados principalmente ao estado nutricional e hídrico das plantas, permitindo o melhor entendimento ecofisiológico desta (SELLERS et al., 1997; SZILAGYI, 2000). Diferentes regiões do espectro foram correlacionadas com o conteúdo de água em folhas (MOBASHERI; FATEMI, 2013), originando diversos índices espectrais já citados que são composto de duas ou mais bandas, e se encontram próximas as bandas da água que são: 970 nm, 1200 nm, 1450 nm, 1940 nm e 2500 nm. Porém, esses índices são normalmente calibrados para determinado conjunto de dados (CAO et al., 2015), o que significa que esse índice pode não ser adequado para outras espécies, ambientes, condições climáticas ou estado fenológico da planta (WANG; LI, 2012)

Um grande número de índices espectrais tem sido desenvolvidos para estimar o conteúdo de água nas plantas, pois quando estas apresentam uma baixa quantidade de água disponível para o seu desenvolvimento, tem como consequência diversas alterações em suas propriedades químicas e físicas. Datt (1999) apresentou uma alta correlação entre o conteúdo de água por unidade de área da folha (EEA) e a reflectância em folhas de *Eucalyptus* através dos índices $(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$ e $(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$ e encontrou um r de 0,78 para o primeiro e 0,76 para o segundo índice. Ranjan et al (2015) encontraram alta correlação entre o conteúdo relativo de água (CRA) e os índices de vegetação MSI e NDII. Imanishi et al. (2004) utilizaram as bandas presentes na região “red-edge” do espectro para determinar o conteúdo de água em *Quercus glauca* e *Quercus serrata*. Wang e Li (2014) obtiveram que o índice d*SR* (1510, 1560) teve maior coeficiente de determinação ao estimar o EEA de folhas de *Fagus crenata.*

O modelo criado através dos resultados dos índices de vegetação para estimar conteúdo de água em folhas, geralmente não envolve dados com valores extremos de conteúdo de água, o que torna os índices fracos para avaliar risco de mortalidade em florestas, pois a maioria destes são projetados por dados radiométricos de folhas saldáveis (CAO et al., 2015). Nos comprimentos de onda de 400 nm – 2500 nm tem-se um aumento no fator de reflectância das folhas com a queda progressiva do conteúdo de água (PEÑUELAS et al., 1993).

Estudos anteriores demonstraram que a desidratação da vegetação, através da suspensão da irrigação, pode fornecer um conjunto de dados com uma vasta variação na quantidade de água da folha e diferentes respostas fisiológicas (PEÑUELAS et al., 1993). O índice da água $SR_{1300,1450}$ proposto por Seelig (2008) foi baseado em um conjunto de dados radiométricos em que as folhas tiveram uma progressiva perda no conteúdo de água. Carter

(1998) demonstrou com o índice $SR_{701,820}$ que o fator de reflectância próximo ao 700 nm é capaz de diagnosticar o stress da planta devido a água.

O monitoramento do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus* por técnicas de sensoriamento remoto, de forma rápida e não destrutiva, poderia auxiliar na tomada de decisões no manejo da cultura e na previsão de risco de incêndio da floresta, devido à seca de folhas.

Os objetivos deste trabalho foram: (1) definir quais os λ são melhores correlacionadas com o conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus*, (2) avaliar o desempenho de índices espectrais já existentes para quantificar os parâmetros da água: CRA e o EEA, (3) gerar modelos matemáticos capazes de estimar conteúdo de água em folhas e (4) identificar qual o melhor método de seleção de variáveis para gerar o modelo para estimar os parâmetros da água (CRA e EEA) em folhas de *Eucalyptus.*

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Localização e caracterização da área de estudos

O presente estudo foi realizado no sítio experimental de número 36 do programa cooperativo de Tolerância de *Eucalyptus* clonais aos estresses hídrico, térmico e biótico-TECHS, do instituto de pesquisas florestais (STAPE et al., 2014). O sítio localiza-se no município de Piracicaba- SP, na Fazenda Experimental – Areão que pertence a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Universidade de São Paulo, nas coordenadas geográficas 22°41’07” S e 47°38’38” W e altitude de 550 m.

O programa conta com 36 sítios experimentais distribuídos desde o Pará até o Uruguai, a fim de atingir diferentes tipos de clima. Para este trabalho foram utilizados de 11 materiais clonais do gênero *Eucalyptus spp.* de grande relevância para o Brasil, que foram selecionados por melhoristas florestais. Stape et al. (2014) classificou os clones em três grupos: a) tropicais úmidas e tropicais secas, b) subtropicais mais frias e c) intermediários e mais plásticos (

Tabela **6**).

Tabela 6 - Descrição dos clones estudados

Classificação	Espécie (hibrido= mãe x pai)
Plástico	*E. urophylla* x sp
	E. grandis x E. *camaldulensis*
	E. saligna
	E. urophylla x *E. grandis*
Tropicais	*E. grandis* x *E. urophylla*
	E. urophylla x *E. tereticornis*
	E. urophylla
	E. benthamii
Subtropicais	*E. urophylla* x *E. globulus*
	E. dunnii
	E. grandis

4.2.2 Descrição da área de estudo

O sítio experimental foi instalado pelo programa TECHS no dia 1º de dezembro de 2013. O solo local foi classificado como Nitossolo Vermelho distrófico textura argilosa a moderada (VIDAL-TORRADO et al., 2004). O clima da região é mesotérmico, tipo Cwa (ALVARES et al., 2014) com verões quentes e chuvosos e invernos moderadamente frios e secos, com temperatura média anual de 19,1°C e a precipitação média anual de 1170 mm.

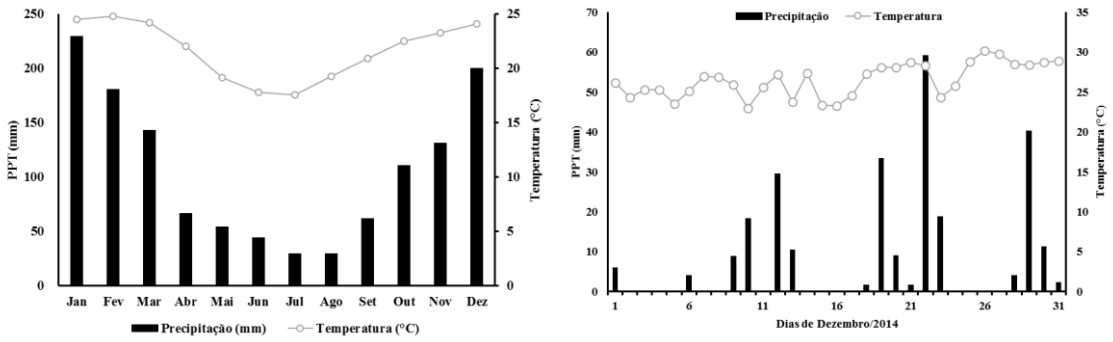


Figura 15 - Gráfico de precipitação média anual e do mês de dezembro de 2015 do município de Piracicaba

O delineamento experimental consta com 11 parcelas consistindo de 20 árvores/parcela, sendo estas divididas em cinco linhas de quatro plantas. O espaçamento entre as plantas é de 2,2 m x 2,3 m, portanto com uma área de 5,06 m²/planta.

De acordo com os dados do programa TECHS, no preparo do solo foi realizado aração, gradagem, e posterior subsolagem à 50 cm de profundidade. Anteriormente a implantação, a adubação consistiu de 300 g/planta super fosfato simples amoniado (03:17:00) e 50 g/planta de fertilizante FTEBr12. Foram realizadas constante combate as formigas e mato-competição, sendo o primeiro controlado por isca formicida (Sulfluoramida) e o segundo por herbicida pré-emergente (Isoxaflutole) e herbicida pós emergente (Glyphosate). Não se verificou qualquer tipo de trato silvicultural, como desbaste ou desrama com um ano após o plantio.

4.2.3 Amostragem Foliar

Foram selecionadas e marcadas quatro árvores, em cada parcela de *Eucalyptus* spp. (Figura **17**-A), em seguida fez-se uma separação visual dos terços de acordo com o começo da copa da árvore, os terços foram: superior, médio e inferior (Figura **16**-A). Para cada árvore selecionada, foram coletadas quatro folhas por terço, que foram divididas de acordo com quatro pontos diferentes (Figura **16**- B). Esse procedimento foi padronizado para todas as espécies a fim de se obter uma amostra que representasse a planta como um todo. A folha selecionada foi a segunda do ramo que apresentava um aspecto visualmente saudável (Figura **16**-C) e em boas condições fisiológicas.

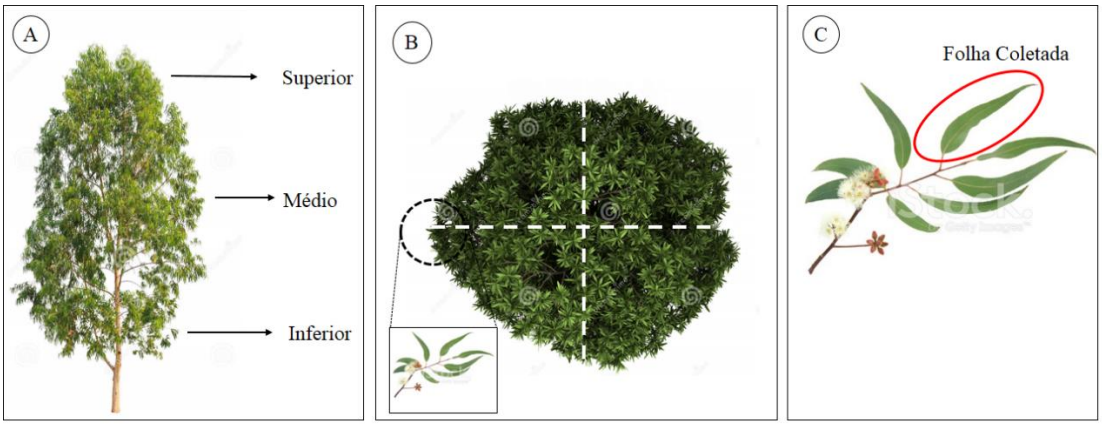


Figura 16 - Localização ilustrativa da folha coletada A- posição dos terços da árvore, B- posição da folha em quatro pontos opostos da árvore, C- folha coletada no ramo

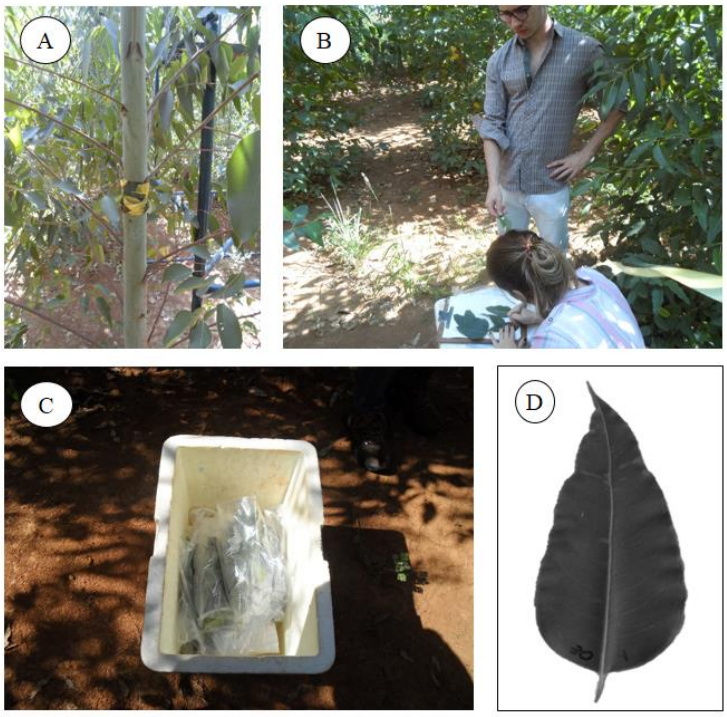


Figura 17 - A- Árvore selecionada e marcada, B-Identificação das folhas de *Eucalyptus* coletadas em campo, C- Folhas colocadas em gelo e D- Visão aproximada de uma folha do terço médio

A coleta das folhas ocorreram nos dias 9, 11 e 12 de dezembro, sempre entre às 7:00 e às 9:00 horas, ou seja, observando-se na Figura **15** que os dias 9, 10, e 12 foram caracterizados pela presença de chuva. No primeiro dia foram amostradas todas as folhas do terço inferior das 11 espécies, no segundo dia o terço médio e finalizou-se com a amostragem das folhas do terço superior. Após a coleta do material, as folhas foram identificadas(Figura **16**-B e Figura **16**-D), embaladas em sacos plásticos transparentes, e colocadas em caixa térmica com gelo (SUMMY et al., 2011) (Figura **16** -C).

4.2.4 Determinação do Conteúdo Relativo de Água

A água é um constituinte químico fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Kramer; Boyer, 1995), sendo o conteúdo relativo de água (CRA) um parâmetro dado pela razão entre o teor de água no momento da coleta e o teor máximo de água (estado de turgor) para uma dada folha (HUNT et al., 1987). Para isso foi necessário determinar o peso fresco, o peso túrgido e peso seco através da Equação 5 sugerida por Turner (1981), Nogueira et al. (2001), Pacheco et al. (2011) e Fernandes et al. (2015).

$$CRA=\frac{PF-PS}{PT-PS}*100 \qquad \textbf{(5)}$$

em que PF (g) é o peso fresco, PS (g) é o peso seco após 72 horas na estufa a 70 °C e PT (g) é o peso túrgido. Os resultados foram expressos em porcentagem (%).

4.2.5 Determinação da densidade equivalente da água

Além do CRA, determinou-se a espessura equivalente da água (EEA- no inglês *Equivalent Water Thichness*) que resulta no volume de água por unidade de área da folha (cm²), sugeridos por Datt (2009).

$$EEA=\frac{PF-PT}{(\rho*AF)} \qquad \textbf{6}$$

em que PF, dado em gramas (g), é o peso fresco da folha e PS, dado em gramas (g) é o peso seco da mesma folha, ρ é uma constante física que representa a densidade água pura (1g/cm^3) e AF é a área foliar (cm²).

4.2.5.1 Determinação da Área Foliar

As folhas são partes da planta com alta absorção de luz para a realização da fotossíntese (LUCENA et al., 2011), portanto a área foliar está diretamente relacionada com a quantidade de energia absorvida pela mesma. A partir da estimativa de área foliar é possível chegar a diversas varáveis fisiológicas como área foliar específica, taxa de crescimento foliar vegetativo, EEA e quantificação de variações no crescimento das plantas devido as diferenças genéticas (FONSECA; CONDÉ, 1994).

A área foliar foi obtida pelo método da imagem digital (ADAMI et al., 2007) ou método do escâner (LUCENA et al., 2011) que consistiu na captura de imagens das folhas, contra um fundo de cor branca, por meio de uma impressora multifuncional acoplada a um computador pessoal, em que as imagens foram arquivadas e processadas no software SPRING, versão 5.1.8.

Este método possibilita o cálculo da área foliar com base na escala e na resolução em pontos por polegada (*dots per inch - dpi*), a imagem gerada pelo scanner tem uma resolução de 200*dpi, dimensão de 1700 x 2338 pixels, e profundidade de 24 bits*. No software SPRING, esses dados foram usados para estimar o tamanho do eixo X e Y de cada pixel (menor elemento que compõe a imagem).

Após a digitalização da folha foi realizado o cálculo da resolução inicial (res_{ini}), em que os valores X e Y foram calculados:

$$res_{ini} = \frac{2,54}{dpi} \quad (7)$$

Para essas imagens, o tamanho do pixel encontrado em centímetros foi posteriormente convertido em metros, que é a unidade de medida utilizada pelo Spring. Após a importação das imagens para o software, foi feita uma classificação não supervisionada, gerando um polígono sobre o limbo foliar, sendo que quando necessário, foram feitas alterações manuais para corrigir os erros. As áreas foliares foram obtidas através da ferramenta Operações Métricas. Em seguida, os valores de área foliar foram convertidos em cm².

4.2.6 Obtenção dos dados hiperespectrais em laboratório

A leitura radiométrica do material vegetativo foi realizada com o espectroradiômetro FieldSpec® 3 no laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia de Biossistemas- ESALQ/USP. Os procedimentos de leitura com o sensor tiveram início 30 minutos após o material vegetativo ter sido coletado.

O espectroradiômetro é um sensor passivo de campo e laboratório que realiza medições de irradiância e radiância. Opera na faixa de 350 nm à 2500 nm do espectro eletromagnético, com uma resolução espectral de 10 nm e capacidade de coletar até 10 espectros por segundo. Os espectros são divididos em visível (400 – 720 nm), infravermelho próximo (720 - 1100 nm) e infravermelho médio (1100-2500 nm) (PONZONI, 2012). A unidade detectora, denominada leaf clip, está conectada ao instrumento por um cabo de fibra óptica e possui três sensores, uma malha de fotodiodo de 512 elementos e dois sensores resfriados termoeletricamente (fotodiodos InGaAs) (ASD – Analytical Spectral Devices Inc., Boulder, CO, USA).

A radiância mensurada pelo sensor é convertida em reflectância através da calibração do sensor com a placa branca Spectralon presente no leaf clip (OUMAR; MUTANGA, 2010). As técnicas de calibração e obtenção da resposta espectral são descritas como um ajuste do sistema sensor para que ele forneça respostas padronizadas, e garantir que os diferentes resultados encontrados sejam relacionados com as propriedades físicas do alvo.

Para a leitura espectral do material vegetativo pelo sensor, conectou-se o espectroradiômetro ao leaf clip, e realizou-se a calibração do sensor para posterior medição de reflectância das folhas. Cada folha foi posicionada no orifício com sua face adaxial voltada para o sensor que foi configurado para realizar 10 leituras amostrais médias por segundo, para

cada folha. Os espectros gerados foram transferidos para o computador, para que fossem gravados e posteriormente processados.

4.2.7 Aquisição sucessiva da massa para determinação do conteúdo de água e comportamento espectral

O organograma da Figura **18** ilustra tal procedimento, bem como toda a marcha metodológica para obtenção dos CRA, EEA e respectiva leitura espectral em diferentes tempos de secagem. As folhas coletadas em campo (Figura **18**-A) foram levadas para o laboratório e pesadas imediatamente para a aquisição dos valores de massa úmida, com o auxílio de uma balança analítica de precisão (Figura **18**-B). Imediatamente após a pesagem, foi realizada a leitura espectral de cada folha de *Eucalyptus* (Figura **18**- C). Após aquisição da leitura espectral, cada folha foi digitalizada para a determinação de sua área foliar (Figura **18**-D, item 4.2.5.1). Posteriormente, as folhas foram emergidas em água destilada por 24 horas (Figura **18**-E) e pesadas para a obtenção da massa túrgida (Figura **18**-F), em conseguinte obteve-se a leitura espectral (Figura **18**-G) da folha na situação de máximo teor de água.

A fim de mensurar a reflectância com diferentes quantidades de água, o conteúdo de água e as curvas espectrais de cada folha foram obtidas pela secagem sucessiva das amostras de folhas em uma estufa microbiológica (Figura **18**-H). Testes preliminares possibilitaram estabelecer uma temperatura de 40°C na estufa, e o tempo de secagem foi limitado para 30 minutos. A cada 30 minutos as mesmas eram pesadas para obtenção de um novo valor de peso (Figura 18-I) que substituiu-se no valor de peso úmido, Equação 8 e Equação 9. Em seguida, foi obtida sua respectiva assinatura espectral (Figura **18**-J). Esse processo foi repetido sete vezes (S1, S2, S3, S4, S5, S6 e S7), até o momento em que os valores de CRA_{Tempo} e EEA_{Tempo} passaram a ter uma variação insignificante em relação ao $CRA_{Tempo-1}$ e $EEA_{Tempo-1}$ respectivamente, momento em que o processo de secagem foi interrompido. Os pesos intermediários (PF_T), dado em grama, eram substituídos nos valores de Peso Fresco, assim como descrito por Fabre et al. (2011). A Equação 1 e reformulada na equação a seguir:

$$CRA_T = \frac{PF_T - PS}{PT - PS} * 100 \qquad \textbf{(8)}$$

No final das secagens intermediárias, as amostras de folhas foram colocadas em uma estufa com uma temperatura de 70°C por 72 horas (Figura 18-K), a fim de obter o peso seco (Figura 18-L).

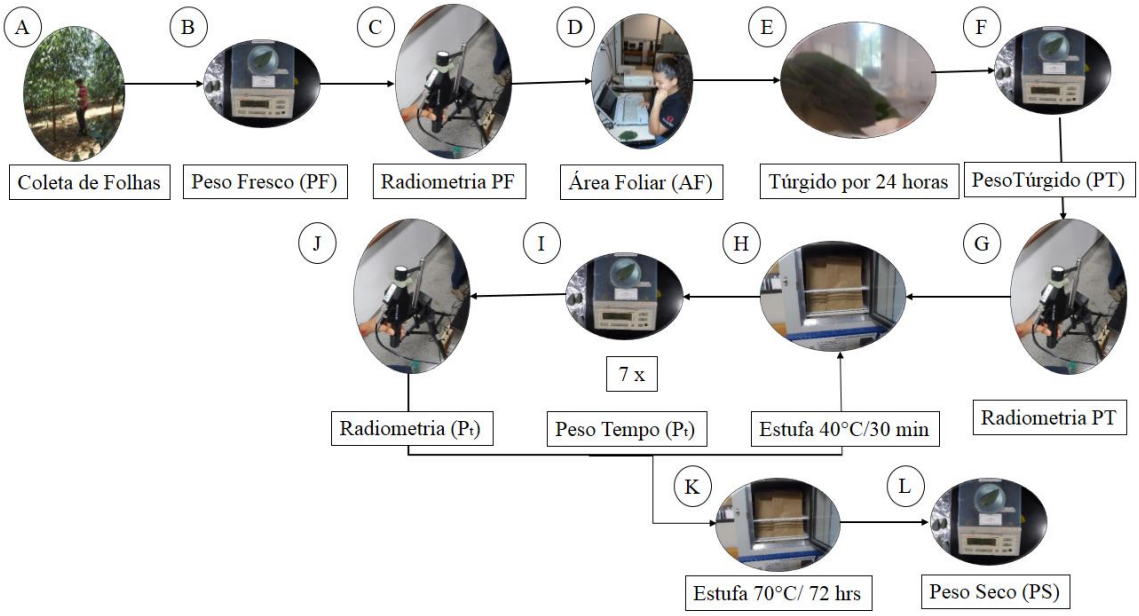


Figura 18 - Organograma da obtenção progressiva do conteúdo relativo de água (CRA) e da densidade equivalente da água (EEA) e da radiometria

Os valores de peso obtidos para a equação do CRA também foram utilizados na equação do EEA. Na Equação 9 os valores do peso fresco variaram em função do peso após a passagem da folha pela estufa, sendo que as outras variáveis são constantes.

$$EEA_T = \frac{PF_t - PT}{(\rho * AF)} \quad \textbf{(9)}$$

4.2.8 Determinação do Conteúdo de água em folhas por dados hiperespectrais

4.2.8.1 Pré- tratamento dos dados espectrais espectrais

Realizou-se a análise de componentes principais (ACP) para todas as curvas espectrais, a fim de observar e remover os dados discordantes por espécie e por tempo de secagem das folhas, chamados outliers. Em termos geométricos a componente principal (CP) representa o espalhamento entre os pontos (FERREIRA et al., 1999), ou seja, permite caracterizar os dados e verificar se existiam scores fora da nuvem de pontos. Ao final da ACP,

verificou-se que os poucos outliers presentes nas amostras fossem associados a prováveis erros de leitura, pois as curvas apresentaram uma reflectância muito inferior a esperada, sendo que o CRA das curvas consideradas *outliers* foram semelhante ao das outras repetições, portanto essa diferença no comportamento espectral não está associado a quantidade de água na folha. Este passo foi realizado antes de qualquer análise dos dados espectrais, para que os dados discordantes não interferissem nos resultados.

Após remoção dos *outliers*, foi feito a média dos dados de fator de reflectância, em que o fator de reflectância e os conteúdos de água dos quatro pontos opostos da árvore (Figura **16**-B) passaram a ter um valor de fator de reflectância médio e o conteúdo de água médio, ou seja, passou a existir um valor médio por terço de cada árvore. Esse método foi aplicado em todos os tempos devido ao grande número de dados coletados para o presente trabalho.

4.2.8.2 Relação entre os parâmetros da água e os dados hiperespectrais

Para verificar a relação linear entre o conteúdo de água e os dados hiperespectrais foi realizada análise de correlação univariada (correlação de Pearson) entre os parâmetros da água (CRA e EEA) com os dados hiperespectrais (350 nm - 2500 nm) (DATT, 1999). Os coeficientes de correlação (r) foram submetidos ao teste t de student ($p \leq 0,05$), para averiguar sua significância.

4.2.8.3 Índices espectrais levantados na literatura para predição do conteúdo de água

Parâmetros bioquímicos e biofísicos da vegetação podem ser quantificados espectralmente por índices de espectrais (WÓJTOWICZ et al., 2016). Uma variedade de índices tem sido criados para estimar o conteúdo de água na vegetação, sendo que a maioria são baseados nos índices espectrais simples ou normalizados (WANG; LI, 2012). Esses índices tem apresentado uma boa correlação entre o conteúdo de água e as regiões do visível, mas principalmente do infravermelho próximo e médio. Os índices tratam-se de uma associação entre uma ou mais bandas, estes cálculos reduzem o efeito de dispersão de uma única banda para estimar o conteúdo de água (RANJAN et al., 2015).

Foram selecionados oito índices espectrais encontrados na literatura que já foram apontados como sensíveis a variação do conteúdo de água em folhas (Tabela 7). Com base nos dados hiperespectrais coletados para folhas de *Eucalyptus*, foram realizados os cálculos dos índices citados na tabela abaixo de acordo com a instrução dos autores, em seguida

encontrou-se a relação entre os índices calculados e os parâmetros da água por meio do coeficiente de determinação (R^2); e testou-se sua significância ao nível de 5%.

Tabela 7 - Índices de Vegetação selecionados para relacionar com o conteúdo de água

Índice	Símbolo	Equação	Referência
Water Index	WI	$\lambda_{900}/\lambda_{970}$	Peñuelas et al. (1997)
Moisture Stresss Index	MSI	$\lambda_{1650}/\lambda_{820}$	Hunt & Rock (1989)
Normalised Difference Water Index	NDWI	$(\lambda_{860}-\lambda_{1240})/(\lambda_{860}+\lambda_{1240})$	Gao (1996)
Normalized Difference Infrared Index	NDII	$(\lambda_{819}-\lambda_{1600})/(\lambda_{819}+\lambda_{1600})$	Hardisky et al. (1983)
Simple Ratio 701 and 820	$SR_{701,820}$	$\lambda_{701}/\lambda_{820}$	Carter (1998)
Simple Ratio 1300 and 1450	$SR_{1300,1450}$	$\lambda_{1300}/\lambda_{1450}$	Seelig (2008)
$(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$	$(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$	$(\lambda_{850}-\lambda_{2218})/(\lambda_{850}-\lambda_{1928})$	Datt (1999)
$(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$	$(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$	$(\lambda_{850}-\lambda_{1788})/(\lambda_{850}-\lambda_{1928})$	Datt (1999)

*λ_n= Comprimento de Onda

Os índices apresentados na Tabela 2 que tiveram significância foram submetidos a análise de regressão linear simples, no software Excel, e foram considerados variáveis independentes. As variáveis dependentes foram os valores de CRA e EEA encontradas em laboratório. Os modelos foram calibrados com 70% dos dados de CRA e EEA, e validados com o restante dos dados. A precisão dos modelos, gerados pelos índices de vegetação, foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 10).

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2} \quad \textbf{(10)}$$

Em que y_i são os valores do conteúdo de água (CRA e EEA) estimados pelo modelo proposto e $\hat{y}_i$ são os resultados da análise de laboratório para o conteúdo água (CRA e EEA) na folha e n é o número de amostras da validação. O RMSE mostra o erro do modelo e sua unidade de medida é a mesma unidade dos parâmetros mensurados. O melhor índice foi identificado pela combinação entre o maior R^2 e o menor RMSE, respectivamente.

4.2.8.4 Construção do modelo para predizer conteúdo de água em folhas

Os modelos matemáticos para a predição dos parâmetros da água foram feitos por meio da análise de regressão linear, que é uma técnica de modelagem utilizada para analisar a relação entre uma variável dependente (Y) e as variáveis independentes (X_1, X_2, X_3, ..., X_n) e tem a finalidade de identificar uma função que descreva (Equação 11), o mais próximo possível a relação entre essas variáveis, ou seja, os parâmetros da água terão valores que serão estimados pelos comprimentos de ondas escolhidos no item 4.2.8.4.1.

$$\mathbf{Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon_n} \quad \textbf{(11)}$$

Em que β_0, β_1, β_2, ..., β_n são parâmetros desconhecidos do modelo.

4.2.8.4.1 Seleção de variáveis para obtenção dos modelos

Um dos problemas práticos ao se trabalhar com dados hiperespectrais é devido à grande quantidade de variáveis para a coleta de uma única informação, sendo que na maioria dos casos o número de observações é menor que o número de variáveis preditoras, e muitas delas estão altamente correlacionadas. As variáveis selecionadas para a predição do modelo foram obtidas por três diferentes métodos apresentados nos subitens abaixo.

4.2.8.4.1.1 Seleção de variáveis pelo coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação é uma medida descritiva que correlaciona os parâmetros da água com os dados espectrais, portanto elegeu-se esta medida para selecionar variáveis espectrais que tivessem maior correlação com os parâmetros da água, porém os dados espectrais são caracterizados por serem colineares, ou seja, variáveis consecutivas tem R^2 semelhantes.

O critério de seleção das variáveis pelo coeficiente de determinação foi de acordo com o maior coeficiente de determinação (R^2), obtido pela relação entre os parâmetros da água e os dados hiperespectrais. Após encontrar os coeficientes de determinação (R^2) para todo o espectro, selecionou-se a variável que teve o maior R^2, em seguida selecionou-se as variáveis de maior R^2 dentro das seguintes regiões do espectro: visível (VIS: 350 nm -720 nm), infravermelho próximo (IVP: 720 nm – 1100 nm), infravermelho médio I (IVMI: 1100 nm – 1700 nm), infravermelho médio II (IVMII: 1700 nm – 2100 nm) e infravermelho médio III (IVMIII: 2100 nm – 2500 nm). Todas as regiões do espectro determinadas acima, possuem uma banda da água, exceto a região do visível.

4.2.8.4.1.2 Seleção de variáveis pelo método *stepwise*

Redução de dimensão dos dados

A metodologia *sparse Partial Least Square* (sPLS) é eficiente para reduzir a dimensão de dados altamente correlacionados, e tem como princípio central a imposição de dispersão (*sparsity*) nas variáveis preditoras, por meio dos princípios dos mínimos quadrados parciais (CHUN; KELES, 2010). Essa metodologia foi implementada utilizando o pacote de análises "sPLS", desenvolvido para o software estatístico r (CHUNG; CHUN, 2012).

Seleção de variáveis por *stepwise*

A técnica de seleção de variáveis por *Stepwise* (passo a passo) se inicia com um modelo contendo todas as variáveis do conjunto de dados selecionados pela sPLS, em seguida as variáveis menos significativas estatisticamente são removidas de forma gradativa, a parti de um critério de seleção. Esse processo ocorre até que as variáveis restantes sejam estatisticamente relevantes, ou seja, até que não haja melhora na significância do modelo ou não haja variáveis a serem retiradas. Esta técnica supõe que algumas variáveis não contribuem de forma expressiva para a resposta de todo o conjunto (DARVISHZADEH et al., 2008).

O critério de seleção das variáveis foi o critério de informação de Akaike (AIC), que leva em consideração qual é a penalização dos parâmetros estatísticos do modelo de regressão em relação a inserção ou exclusão de mais uma variável preditora (ESTES et al., 2008). A análise de "AIC" não representa diretamente a qualidade do modelo final.

4.2.8.4.2 Validação dos modelos

Os resultados encontrados pelos diferentes métodos de seleção de variáveis foram submetidos a análise de regressão linear simples e múltipla, no software Excel, sendo estas

consideradas variáveis independentes. As variáveis dependentes foram os valores dos parâmetros de conteúdo da água CRA e EEA encontradas em laboratório. Cada modelo foi calibrado com 70% dos dados dos respectivos parâmetros: CRA e EEA; e validados com o restante dos dados. A precisão dos modelos gerados foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 10) e o erro relativo (RE%) (Equação 12).

$$\text{RE (\%)}=\left(\sqrt{\frac{1}{n}} * \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{y_1-\hat{y}_1}{\hat{y}_1}\right)^2\right) * \mathbf{100} \qquad \textbf{(12)}$$

Em que y_i são os valores do conteúdo de água (CRA e EEA) estimados pelo modelo proposto e $\hat{y}_i$ são os resultados da análise de laboratório para o conteúdo água (CRA) na folha e n o número de amostras da validação.

4.3 Resultados e Discussão

Ambos os parâmetros (CRA e EEA) tiveram uma alta variação entre o seu conteúdo de água máximo e mínimo, indicando que o valor de conteúdo máximo de água está relacionado com o estado de turgor das folhas (máxima quantidade de água), enquanto o valor do conteúdo mínimo de água foi representado pela perda de água nas folhas, devido a secagem das mesmas (Figura 19). Ao analisar o gráfico de CRA (Figura 19-A), foi possível verificar que todas as espécies tinham o mesmo conteúdo relativo de água no momento túrgida e que a resposta aos tempos de secagem para as 11 espécies de *Eucalyptus* foram similares, sendo que a perda da água ocorreu de forma gradual e descendente. Além do mais, a permanência das folhas por 24 horas em água, metodologia de coleta de dados do CRA e EEA, permitiu uma padronização antes de iniciar o processo sucessivo de secagem, pois todas as folhas partiram do estado túrgido, ou seja, com valores muito próximos a 100%.

Na Figura 19-B foi observado a resposta de secagem para as 11 espécies de *Eucalyptus* e notou-se que essas tiveram um EEA inicial diferente entre as espécies, pois este parâmetro é dependente da área foliar, que varia por espécie. A espécie E. urophylla x E. globulus foi a que apresentou maiores valores de EEA para todos os tempos de secagem. Cao et al. (2015) coletaram folhas de cinco diferentes espécies arbóreas e arbustivas e as submeteram a um procedimento de secagem, em seguida adquiriram as massas das folhas por tempo de secagem e seus respectivos dados espectrais de hora em hora, e observou que o EEA apresentou

valores distintos nas diferentes espécies desde o primeiro instante, enquanto o CRA possui uma quantidade de água semelhante para as diferentes espécies.

Wang et al. (2009) estimaram o conteúdo de água em três diferentes espécies, sendo essas arbórea, arbustiva, e a última uma planta anual; e encontraram um CRA (%) de folhas frescas variando de 42%, 25-62%, 53%, ou seja, com porcentagem de conteúdo relativo de água inferiores aos resultados encontrados neste trabalho. As três espécies descritas apresentaram um EEA (g/cm²) de 0,006 - 0,040, ou seja, resultados superiores ao encontrado em folhas de *Eucalyptus*, pois estas espécies apresentam maior área foliar quando comparadas as espécies estudadas por Wang et al. (2009).

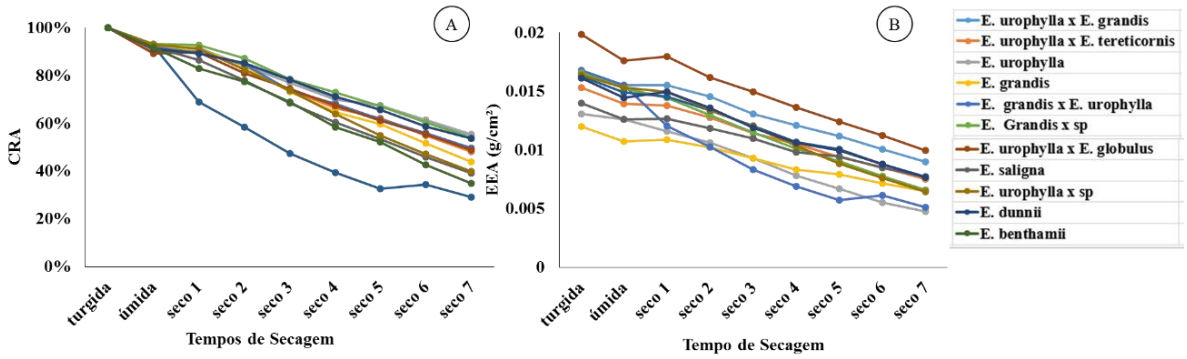


Figura 19 - Mudança do CRA e o EEA em função do tempo de secagem

A Figura **20** apresenta o - Comportamento espectral mínimo, médio e máximo de folhas de *Eucalyptus* A curva média representa o comportamento espectral média de várias folhas de *Eucalyptus* após ser coletada em campo (peso fresco), sendo que esta apresentou um fator de reflectância similar à uma folha sadia, porém quando as folhas tiveram um conteúdo de água muito baixo (peso S7) ou muito alto (peso turgido) (curva espectral máxima e curva espectral mínima respectivamente). A curva espectral mínimo diminuiu a intensidade da feição de absorção, inclusive nas bandas consideradas de absorção devido a água: 1150 nm – 1260 nm, 1450 nm e 1950 nm (RANJAN et al., 2015; CECCATO et al., 2002), sendo que próximo a região de 970 nm perdeu-se completamente a feição de absorção, descaracterizando o comportamento espectral da vegetação; essa resposta espectral corresponde a um conteúdo relativo de água de aproximadamente 5%. Foi observado uma alta diferença entre o conteúdo de água máximo e mínimo e essa mesma variação foi observada na resposta espectral máximo e mínimo de folhas de *Eucalyptus*, outros fatores além da água podem ser responsáveis pela distinção na resposta espectral, como a concentração de clorofila

ou estrutura do mesófilo, assim como afirmado por Datt (1999) que avaliou o comportamento espectral de 21 espécies de *Eucalyptus.*

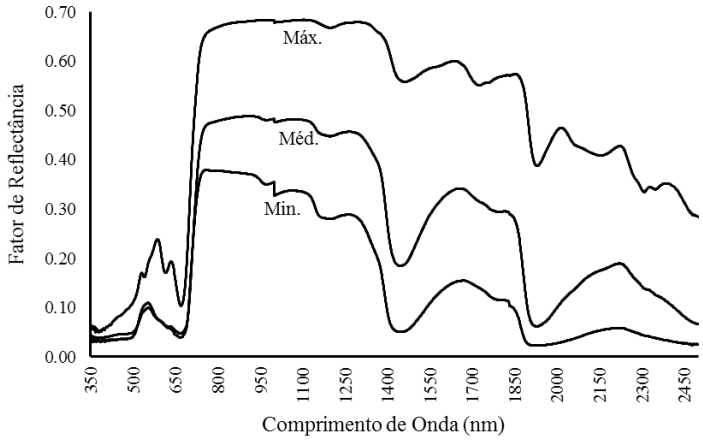


Figura 20 - Comportamento espectral mínimo, médio e máximo de folhas de *Eucalyptus*

O comportamento espectral da curva de máxima reflectância na folha (Figura **20**) apresentou características espectrais semelhantes as apresentadas por Zarco-Tejada et al. (2003) que simularam o efeito da variação do conteúdo de água sobre o comportamento espectral da vegetação, porém os autores afirmaram que a água não é o único parâmetro que influencia no resultado radiométrico das folhas, pois a quantidade de matéria seca e organização celular também são fatores relevantes para este resultado. Na Figura **20**, foi possível verificar que o momento de ascendência da curva espectral ("red-edge") é antecipado para a curva de reflectância máxima. Tal fato, pode estar relacionado com a degradação dos pigmentos da folha com comportamento espectral máximo, pois observa-se um aumento da resposta espectral em todos os λ do visível. Além disso, pode-se perceber que a região do vermelho teve um maior aumento da reflectância que a região do azul, provavelmente pela clorofila ter sido mais degradadas que os outros pigmentos, como xantofila e carotenos, pois a clorofila é o único pigmento que absorve energia na região do vermelho (PONZONI et al., 2012).

4.3.1 Relação entre o conteúdo de água na folha de *Eucalyptus* e os dados hiperespectrais

Para determinar a relação dos parâmetros CRA e EEA com os dados hiperespectrais, encontrou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) que foi calculado para todas os comprimentos de onda dentro do intervalo de 350 nm – 2500 nm e plotadas em forma gráfica. Na Figura 21, foi apresentada as regiões estatisticamente significativas (p-value<0.05) em que tiveram um coeficiente de correlação variando entre moderado negativo à forte negativo.

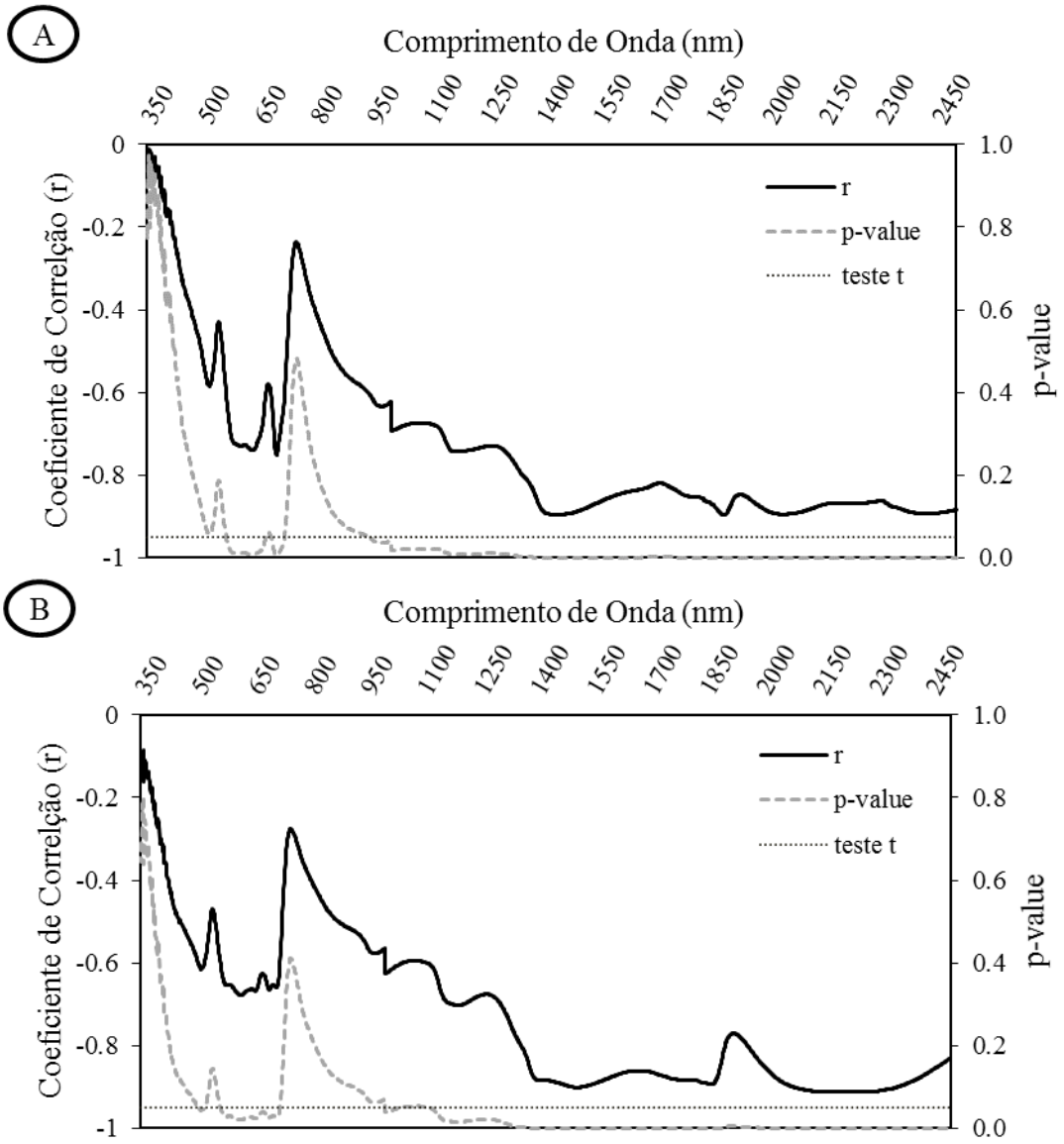


Figura 21 - Correlação entre o fator de reflectância e (A) Conteúdo Relativo de Água-CRA e (B) Espessura Equivalente da Água- EEA. Os valores críticos do coeficiente de correlação (p-valor<0.05) são indicados com a linha horizontal (pontilhada)

Ao analisar a Figura 21-A, foi possível afirmar que algumas regiões do visível (560nm - 664 nm e 679 nm – 714 nm) tiveram uma correlação negativa moderada, e do comprimento de onda de 939 nm à 2500 nm foi observado uma variação de moderada negativa a forte negativo; a relação negativa entre os parâmetros da água e os dados espectrais ocorrem, pois a quantidade de energia refletida pelas folhas tem uma relação inversa com água, ou seja, quanto mais água possuir uma folha maior será absorção de REM pela mesma, portanto menor o fator reflectância. A região do visível apresentou menor correlação com os parâmetros da água provavelmente por essa região ter uma forte correlação com o conteúdo de pigmentos na folha, o que pode ter maior influência que o conteúdo de água sobre a resposta espectral.

Zhang et al. (2014) encontraram um coeficiente de correlação máximo de 0,8 entre o CRA e os dados hiperespectrais ao estudarem a influência da salinidade do solo nos fatores de reflectância de folhas de algodão, enquanto que este estudo encontrou um coeficiente de correlação máximo (r=-0,89) entre o CRA no comprimento de onda 1881nm.

Yi et al. (2013) investigaram a relação do EEA com a resposta espectral para folhas de uma cultura de algodão e encontraram um coeficiente de correlação negativo máximo de r=-0,67 (1725 nm), sendo que a máxima correlação foi observada entre as bandas 1550 nm – 1850 nm, região com elevada absorção de energia devido a água. Neste estudo, o coeficiente de correlação entre o EEA e os dados espectrais (Figura 21- B) apresentaram uma correlação negativa com todo espectro de folhas de *Eucalyptus*, com um coeficiente de correlação máximo (r=-0,79) para o comprimento de onda 2165 nm.

Carter (1994) e Carter e Knapp (2001) mostraram que índices que usam λ próximo ao 700 nm e o infravermelho apresentam uma alta correlação com parâmetros que predizem água. Neste trabalho, encontrou-se uma baixa correlação entre o CRA e a região de 700 nm, sendo que muitos comprimentos de onda próximos a esse comprimento de onda não foram significativos, assim como apresentado por Cao et al. (2015) que afirmaram que a reflectância das bandas próximas ao comprimento de onda de 700 nm são fortemente influenciadas pelos pigmentos fotossintetizantes e com baixa influência da água.

4.3.2 Avaliação de índices espectrais levantados na literatura para a predição de água

Foi avaliado o desempenho dos índices espectrais levantados na literatura para predizer água com os dados hiperespectrais adquiridos na secagem das folhas de *Eucalyptus*. Nesta fase, foi encontrado um modelo em que o resultado apresentado pelos índices foram

considerados as variáveis independentes e os parâmetros da água foram tratadas como variáveis dependentes.

Na fase de calibração do modelo de regressão linear simples, foi possível identificar que de todos os índices apresentados apenas o *Simple Ratio* 701 *and* 820 teve um R^2 não significativo ao nível de 5% para o parâmetro EEA (Tabela 8). O índice proposto por Carter (1998) é calculado por uma relação entre um comprimento de onda do visível (701 nm) e infravermelho próximo (820 nm), e não apresentou um resultado significativo com os parâmetros da água, provavelmente por esses comprimentos de onda possuírem maior correlação com os pigmentos e estrutura da folha, o que oculta os efeitos da água. Este índice também apresentou uma significância irrelevante para o parâmetro CRA, assim como o $(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$, proposto por Datt para diferentes espécies de *Eucalyptus* (Tabela 8). Diferente do índice MSI, que apresentou um dos maiores R^2 para os parâmetros da água, e é composto por uma relação entre duas bandas, sendo estas pertencentes ao infravermelho próximo e médio, ou seja, regiões do espectro com alta correlação com a água (PONZONI et al., 2012).

Tabela 8 - Coeficiente de determinação (R^2) entre os parâmetros da água (CRA e EEA) e os índices espectrais usados para a calibração do modelo

Índices Espectrais	WI	MSI	NDWI	NDII	SR701, 820	SR 1300,1450	$(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$	$(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$
EEA	0,60*	0,82*	0,67*	0,83*	0,20	0,87*	0,54*	0,81*
CRA	0,61*	0,71*	0,70*	0,70*	0,25	0,68*	0,28	0,60*

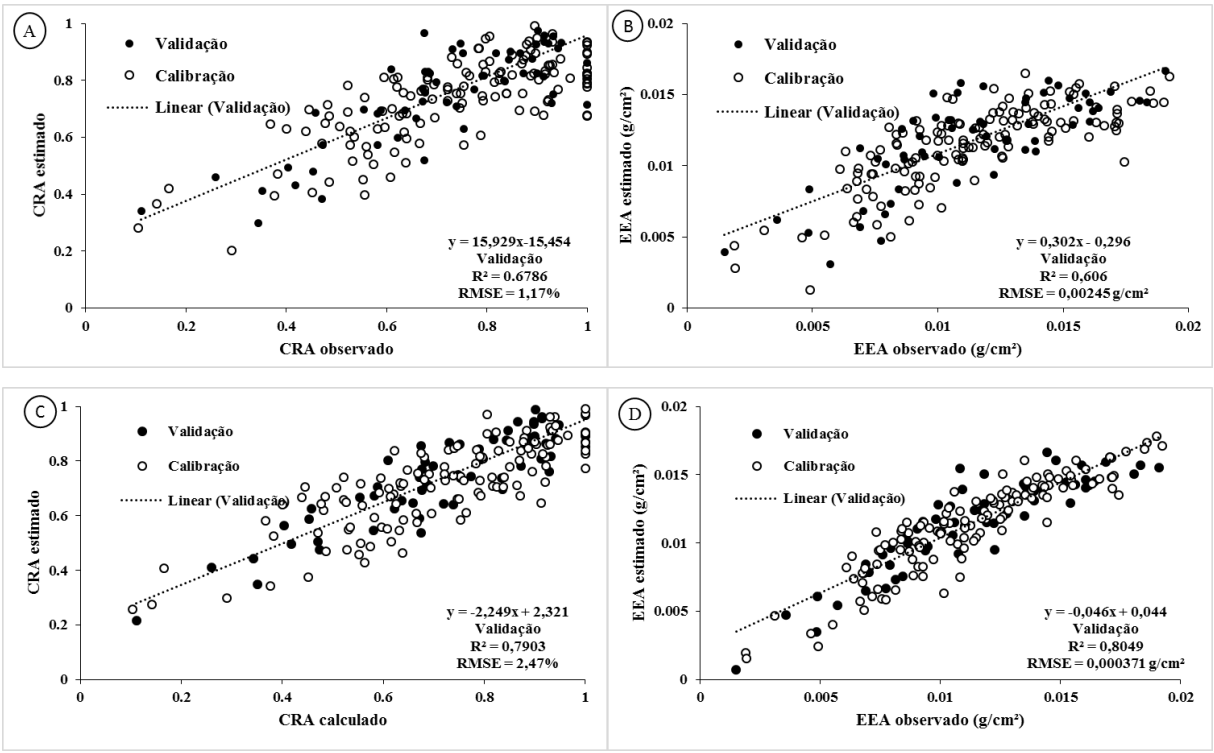
*Significativo ao nível de 5%

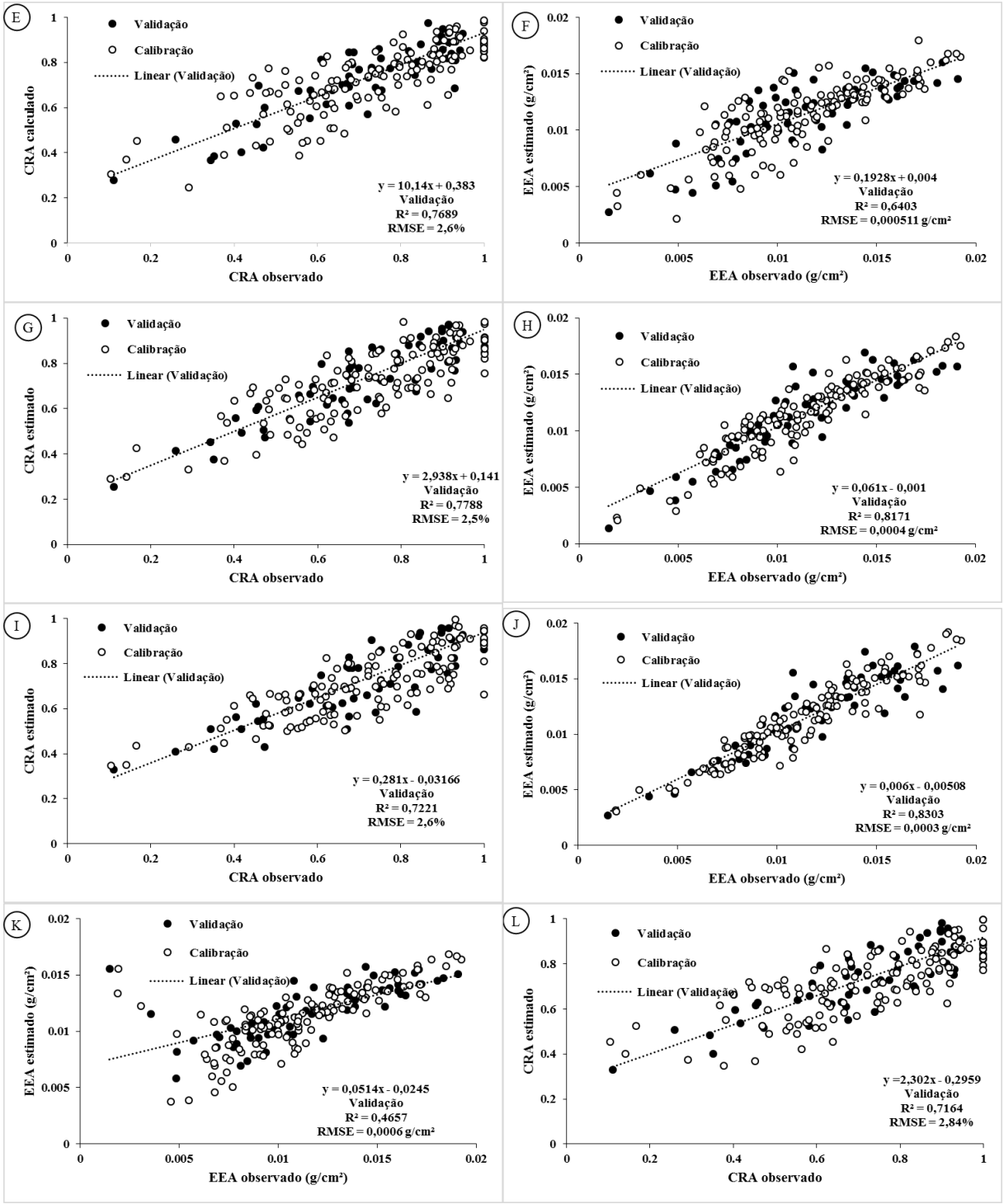
Na Figura 22 **foi apresentado o desempenho de todos os índices selecionados na literatura que tiveram significância estatística de acordo com a**

Tabela **8**. Os índices espectrais da vegetação mostraram um resultado satisfatório tanto para predição de CRA quanto para o EEA, porém a maioria dos índices tiveram um R^2 maior ao predizer o parâmetro EEA. O índice $SR_{1300,1450}$, ao estimar o parâmetro EEA, apresentou maior coeficiente de determinação (R^2=0,83) e um baixo valor para a raiz quadrada do erro médio (RMSE=0,0003 g/cm²), enquanto que o CRA apresentou seu maior coeficiente de determinação (R^2=0,79) quando correlacionado com o índice MSI. Provavelmente pelo índice da água $SR_{1300,1450}$ proposto por Seelig (2008) ser baseado em um conjunto de dados

radiométricos em que as folhas tiveram uma progressiva perda no conteúdo de água, assim como proposto neste trabalho.

Datt (1999) encontrou um bom coeficiente de determinação (R^2=0,81) ao estimar o EEA de folhas de *Eucalyptus* pelo índice (R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928}), enquanto que este trabalho apresentou um baixo coeficiente de determinação para estimar o EEA (Figura 22-K). Apesar de os comprimentos de onda 1928 e 2218 possuírem uma alta correlação linear com os parâmetros da água.




E
Validação
Calibração
Linear (Validação)
CRA calculado
CRA observado
y = 10,14x + 0,383
Validação
R² = 0,7689
RMSE = 2,6%
F
EEA estimado (g/cm²)
EEA observado (g/cm²)
y = 0,1928x + 0,004
Validação
R² = 0,6403
RMSE = 0,000511 g/cm²
G
CRA estimado
y = 2,938x + 0,141
Validação
R² = 0,7788
RMSE = 2,5%
H
y = 0,061x - 0,001
Validação
R² = 0,8171
RMSE = 0,0004 g/cm²
I
y = 0,281x - 0,03166
Validação
R² = 0,7221
RMSE = 2,6%
J
y = 0,006x - 0,00508
Validação
R² = 0,8303
RMSE = 0,0003 g/cm²
K
y = 0,0514x - 0,0245
Validação
R² = 0,4657
RMSE = 0,0006 g/cm²
L
y =2,302x - 0,2959
Validação
R² = 0,7164
RMSE = 2,84%

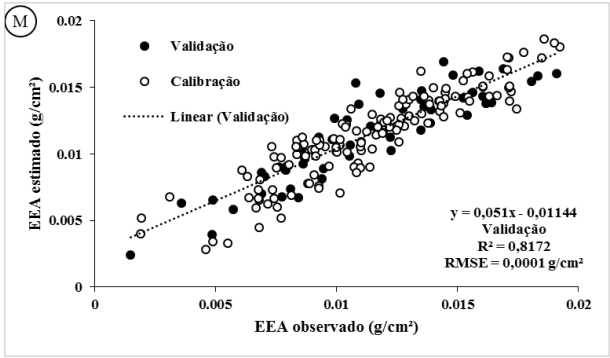


Figura 22 - Teste entre os parâmetros da água e os índices públicados na literatura (A) CRAxWI, (B) EEAx WI, (C) CRA x MSI, (D) EEA x MSI, (E) CRA x NDWI, (F)EEA x NDWI, (G) CRA x NDII, (H) EEA x NDII, (I) CRA x $SR_{1300, 1450}$, (J) EEA x $SR_{1300, 1450}$, (K) EEA x $(R_{850}-R_{2218})/(R_{850}-R_{1928})$, (L) CRA x $(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$ e (M) EEA x $(R_{850}-R_{1788})/(R_{850}-R_{1928})$

Os resultados do coeficiente de determinação encontrados na validação do modelo com o índice WI (Figura **22**-A e Figura **22**- B) apresentaram um R^2 moderado e inferior aos outros índices apresentados, tanto para o CRA quanto para o EEA. Peñuelas et al. (1997) afirmaram que a relação com o WI diminui com a queda da quantidade de água na folha. Peñuelas e Inoue (1999) encontraram uma alta correlação entre os mesmos parâmetros da água e o índice WI para folhas de amendoim e trigo e verificaram que a correlação diminui com a perda de água pela dessecação das folhas e varia de acordo com a espécie, devido a estrutura celular e a elasticidade da parede celular (PEÑUELAS et al., 1996).

Ranjan et al. (2015) calcularam alguns índices espectrais e correlacionaram com o CRA e o EEA de uma cultura de trigo,e encontraram um R^2 que variou de muito baixo a alto. Para o índice MSI, os autores encontraram um coeficiente de determinação R^2=0,85 para EEA e R^2= 0,81 para o CRA (Figura **22**- C e Figura **22**-D), enquanto este trabalho apresentou valores de R^2 próximos.

4.3.3 Construção do modelo espectral

Na construção do modelo foi utilizado o método de validação cruzada em que 70% dos dados são usados para a calibração do modelo e o restante (30%) é utilizado para a validação do mesmo. Porém, na fase de seleção de variáveis foi utilizado o conjunto de dados completo (n=322 amostras).

4.3.3.1 Seleção de variáveis preditoras

4.3.3.1.1 Seleção de variáveis preditoras pelo coeficiente de determinação

O resultado para o método de seleção de variáveis pelo coeficiente de determinação, permitiu encontrar quais os λ tem uma relação mais forte com os parâmetros da água, e foi representado por um gráfico de linhas (Figura **23**), assim como demonstrou Mobasheri e Fatemi (2013).

Ao avaliar a Figura **23** (A), notou-se que os valores de R^2 variam de quase nulo a muito alto, sendo que a região do infravermelho médio (1300 nm – 2500 nm) foi a que apresentou maior relação entre o CRA e os dados espectrais. O λ_{1882} apresentou maior coeficiente de determinação (R^2=0,8), e foi selecionado para gerar um modelo que estimasse CRA com uma única variável independente. Em contraposição, os menores valores encontrados ficam no infravermelho próximo, entre os λ_{726} à λ_{816} , sendo que o λ na região "*red-edge*" (λ_{748}) foi o que teve menor coeficiente de determinação (R^2=0,05).

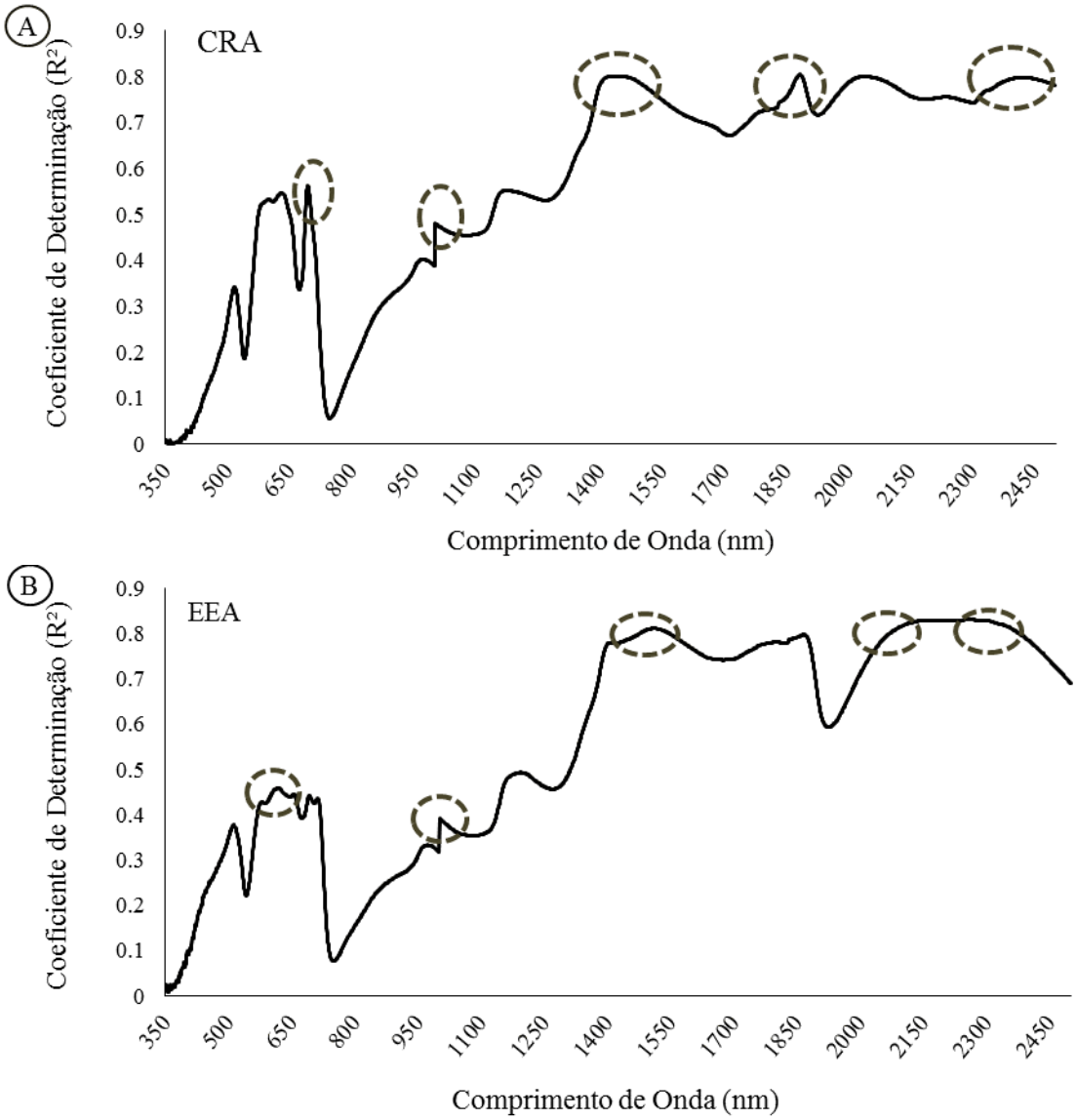


Figura 23 - Valores do coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear entre valores individuais de fator de reflectância das folhas de *Eucalyptus* (A)Conteúdo Relativo da Água- CRA e (B) Espessura Equivalente da Água- EEA

Na Figura **23** (B), pode-se verificar o coeficiente de determinação entre a espessura equivalente da água (EEA) e os dados hiperespectrais, assim como, na Figura **23** (A), os valores de R^2 variam de muito baixo à alto, sendo que o R^2 para o EEA apresentou melhores resultados que para o CRA em quase todo o espectro, essa diferença foi mais significativa entre os λ_{2300} à λ_{2500}. A partir do λ_{800} os dados espectrais têm um aumento progressivo da relação com o EEA, passando por algumas quedas nos valores de R^2 logo após um aumento de R^2 (aumento correspondente as bandas de absorção devido a água), porém o valor do coeficiente de determinação tem uma queda abrupta próximo ao λ_{1925}, mostrando que mesmo em regiões de absorção devido a água existem λ menos sensíveis a espessura equivalente de água na folha, após o λ_{1926}, os valores de R^2 voltam a ter um aumento progressivo. Mobasheri

e Fatemi (2013) estudaram a relação do EEA com dados espectrais (350 nm – 2500 nm) de 320 amostras espectrais de 80 diferentes espécies, e obtiveram valores mais altos R^2 na região do infravermelho médio (1300 nm – 2500 nm), assim como, os resultados apresentados nesse estudos em que o EEA passa a ter uma maior relação com o espectro a partir do λ_{1340}. Mobasheri e Fatemi (2013) também identificaram uma queda abrupta do R^2 próximo ao λ_{1928}.

O menor valor de R^2 (0,07) para a Figura **23** (B) é para o λ_{749}, enquanto que Mobasheri e Fontami (2013) encontraram o menor valor de R^2 (0,00001) no λ_{1350}. A relação entre o EEA e dados hiperespectrais em folhas de *Eucalyptus* para o λ_{1350} foi de R^2=0,61. Neste trabalho percebeu-se que o maior valor para o coeficiente de determinação (R^2=0,83) ocorre no λ_{2258}, próximo ao λ_{2200} importante ponto de absorção de energia devido a água. O λ_{2258} foi selecionado para gerar um modelo com uma única variável independente capaz de predizer EEA.

A Figura **23** permitiu encontrar os valores de R^2, em seguida foram selecionados os maiores resultados dentro das em cinco classes: VIS, IVP, IVPI, IVPII, IVPIII (Tabela **9**).

Tabela 9 - Valores de regressão linear (R^2) máximos baseado em diferentes regiões do espectro: VIS (350 nm-720 nm), IVP (721 nm - 1100 nm), IVPI (1101 nm - 1700 nm), IVPII (1701 nm -2100 nm), IVPIII (2101 nm - 2500 nm)

Regiões do Espectro	CRA		EEA	
	λ (nm)	R^2	λ (nm)	R^2
VIS	694	0,562	616	0,459
IVP	1001	0,480	1004	0,390
IVPI	1439	0,800	1510	0,811
IVPII	1883	0,804	2100	0,817
IVPIII	2423	0,798	2258	0,832

Ao analisar a Tabela **9**, verificou-se que as regiões do VIS e IVP apresentaram maior coeficiente de determinação em λ semelhantes para os dois parâmetros. Na região do VIS o CRA teve maior correlação com o comprimento de onda de λ_{694} (próximo à banda do vermelho) e o parâmetro EEA com o comprimento de onda de λ_{616} (próximo à banda do vermelho), apesar de pertencerem a bandas diferentes, os dois λ são próximos e fortemente influenciados pela absorção de REM devido à pigmentos fotossintetizantes. Na região do IVP, os λ que apresentaram maior coeficiente de determinação com os parâmetros da água se

encontram próximo ao λ_{1000}, porém estes apresentaram um coeficiente de determinação baixo, sendo que o parâmetro EEA possui menor relação com essa região do espectro. A partir da região IVPI, o coeficiente de determinação passa a ter um valor mais relevante que as regiões anteriores, e o EEA apresentou maior R^2 que o CRA ao ser correlacionado com os dados espectrais dessas regiões.

O CRA apresentou maior R^2 com os comprimentos de onda próximos as bandas da água nas regiões IVPI e IVPII, o valor de R^2 diminuiu na última região do infravermelho (IVPIII). Para o EEA os valores de R^2 tiveram um aumento progressivo do IVPI para o IVPII, seguido pelo IVPIII, sendo que na última região do espectro foi encontrado um comprimento de onda próximo a banda de absorção devido a água (2200 nm) (Tabela **9**). Os modelos gerados por essa seleção de variáveis se encontram descritos na Tabela **10**.

4.3.3.1.2 Seleção de variáveis preditoras pelo método de *stepwise*

Para a seleção de variáveis espectrais pelo método *stepwise*, foi necessário reduzir a dimensão dos dados através do método sPLS, que geraram coeficientes que representam a importância de cada variável preditora (comprimentos de onda) do conteúdo de água (CRA e EEA), sendo que para este estudo foram selecionados os 12 λ com maior coeficiente para o CRA e os 12 λ com maior coeficiente para o EEA, mostrando a eficiência do método para a redução de dados espectrais.

Observou-se que a região do visível e do infravermelho médio foram as mais relevantes para a predição do CRA, enquanto que para predição do EEA todos os comprimentos de onda selecionados estão contidos na região do infravermelho médio (Tabela 10). O método mostrou-se bem eficiente na redução da dimensão dos dados espectrais, porém selecionou λ muito próximos em alguns casos. Ao selecionar as variáveis preditoras do CRA, o sPLS selecionou 5 λ que são consecutivas e pertencem a região do visível, e ao selecionar as variáveis preditoras do EEA, o método sPLS selecionou 10 dos 12 comprimentos de onda entre 1900 nm e 2000 nm.

A seleção de variáveis por *stepwise* se inicia com as variáveis encontradas pelo método de redução dos dados sPLS. A técnica é caracterizada por remover as variáveis menos significativas de forma gradativa. Este processo ocorre até que restem apenas as variáveis mais relevantes para o modelo. Para o parâmetro CRA restaram apenas cinco variáveis para a posterior calibração do modelos, enquanto que para o parâmetro EEA restaram 7 das 12 variáveis pré-selecionados pelo método sPLS.

Os modelos gerados por esses λ estão descritos na Tabela 10. Ao analisar os comprimentos de onda selecionados pelo método *stepwise* para predizer EEA, nota-se que todos se encontraram próximos ao comprimento de onda de 1900 nm, e espera-se que mudanças na quantidade de água por cm² na folha seja melhor diagnosticada pelos comprimentos de onda próximos a essa região, caracterizada por banda da água

Tabela 10 - Desempenho dos modelos espectrais para a predição do conteúdo relativo de água e espessura equivalente da água usando quatro diferentes métodos de seleção de variáveis

		CRA		EEA	
		Variáveis independentes (nm)	Modelos	Variáveis Independentes (nm)	Modelos
Seleção de Bandas	Única Banda	1883	$y = 1{,}213062 - 3{,}00447*\lambda$	2258	$y = 0{,}024691 - 0{,}07832*\lambda$
	Regiões do Espectro	$\lambda_1 = 694$ $\lambda_2 = 1001$ $\lambda_3 = 1439$ $\lambda_4 = 1883$ $\lambda_5 = 2423$	$y = 1{,}366438 - 0{,}94477*\lambda_1 - 0{,}36067*\lambda_2 + 1{,}509241*\lambda_3 - 3{,}86283*\lambda_4 - 0{,}47854*\lambda_5$	$\lambda_1 = 616$ $\lambda_2 = 1004$ $\lambda_3 = 1510$ $\lambda_4 = 2100$ $\lambda_5 = 2258$	$y = 0{,}018622 - 0{,}01733*\lambda_1 + 0{,}037395*\lambda_2 - 0{,}11801*\lambda_3 + 0{,}183768*\lambda_4 - 0{,}14377*\lambda_5$
	Stepwase	$\lambda_1 = 382$ $\lambda_2 = 385$ $\lambda_3 = 1697$ $\lambda_4 = 1731$ $\lambda_5 = 1732$ $\lambda_6 = 2090$	$y = 1{,}123 - 7{,}793*\lambda_1 + 9{,}417*\lambda_2 - 30{,}871*\lambda_3 + 458{,}232*\lambda_4 - 425{,}116*\lambda_5 - 5{,}274\lambda_6$	$\lambda_1 = 1783$ $\lambda_2 = 1907$ $\lambda_3 = 1924$ $\lambda_4 = 1925$ $\lambda_5 = 1950$ $\lambda_6 = 1968$ $\lambda_7 = 1990$	$y = 0{,}01856 + 0{,}046787*\lambda_1 + 0{,}352485*\lambda_2 - 24{,}5672*\lambda_3 + 25{,}6335*\lambda_4 - 6{,}08906*\lambda_5 + 7{,}887383*\lambda_6 - 3{,}32621*\lambda_7$

4.3.3.2 Calibração de Modelos para a predição do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus*

A quantificação de parâmetros bioquímicos da vegetação por meio de técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral, tem se tornado uma ferramenta útil no monitoramento do ambientes agrícola e florestal.

Na Figura **24** apresentou o desempenho dos modelos em determinar o conteúdo relativo de água e a espessura equivalente da água de folhas de *Eucalyptus* por dados hiperespectrais. O modelo com um única banda (Figura **24**-A) utilizou o método de regressão linear simples, em que a variável independente foi o comprimento de onda de maior R² ao ser correlacionado com o CRA. Este modelo apresentou um R² de validação aceitável de acordo com Sayes et al. (2005) que considerou modelos de predição com um R² de 0,66 a 0,81 como aceitáveis. O

RMSE foi baixo e igual a 6,84%, enquanto que o seu RE foi de aproximadamente 20%. Ao analisar o modelo desenvolvido através das variáveis de região do espectro (Figura **24**-C), nota-se que este apresentou resultados similares aos do modelo de uma única banda, mostrando que acrescentar mais quatro variáveis ao modelo não altera muito a qualidade deste. Porém, ao avaliar os resultados apresentados pelo modelo que passou inicialmente por um método de redução e posteriormente seleção de variáveis *stepwise* (Figura **24**-E), foi possível observar um aumento no valor do coeficiente de determinação (R^2=0,86) que de acordo com Sayes et al. (2005) modelos com um R^2 de 0,82 à 0,90 são considerados bons; este método de seleção de variáveis apesar de ter apresentado um RMSE maior que os outros modelos, apresentou um RE um pouco inferior aos modelos apresentados.

Para o parâmetro EEA também usou-se a mesma metodologia de seleção de variáveis gerando três modelos, através do método de regressão linear. Os três modelos apresentaram resultados muito promissores. Os índices de desempenho do modelo para uma única banda (Figura **24**-B) apresentou resultados satisfatórios, apesar de ser o modelo menos robusto quando comparado com os outros dois, este apresentou um R^2=0,82 caracterizado por satisfatório por Sayes et al. (2005), porém com o mais alto RMSE (RMSE=0,0013 g/cm²) e o erro relativo (RE) acompanhou esse desempenho. O modelo desenvolvido pelas variáveis selecionadas de acordo com as regiões do espectro (Figura **24**-D) foi o que apresentou melhores resultados de desempenho para predizer o parâmetro EEA, pois teve R^2 satisfatório e superior aos outros resultados e um RMSE inferior ao dos outros modelos, mesmo apresentando maior erro relativo que o modelo de *stepwise* (Figura **24**-F), o modelo proposto a partir das regiões do espectro continua sendo o modelo mais promissor em predizer água, pois os índices de desempenho do modelo tiveram uma avaliação categorizada nessa ordem de importância: R^2, RMSE e RE. Observando-se os resultados apresentados pelos modelos de predição de água, foi possível afirmar que os dados hiperespectrais apresentam resultados mais satisfatórios ao predizer a quantidade de água por centímetro quadrado de folha que o conteúdo relativo da água.

Assim como neste trabalho, Oumar e Mutanga (2010) também encontraram um R^2 satisfatório ao predizer o conteúdo de água em planta para a espécie *Eucalyptus grandis* (R^2=0,7) e um RMSE de 2,83% pelo método de regressão de *stepwise*, por bandas do satélite africano SumbandlaSat, e afirmaram que todas as bandas do sensor foram relevantes para este resultado, inclusive as bandas do visível.

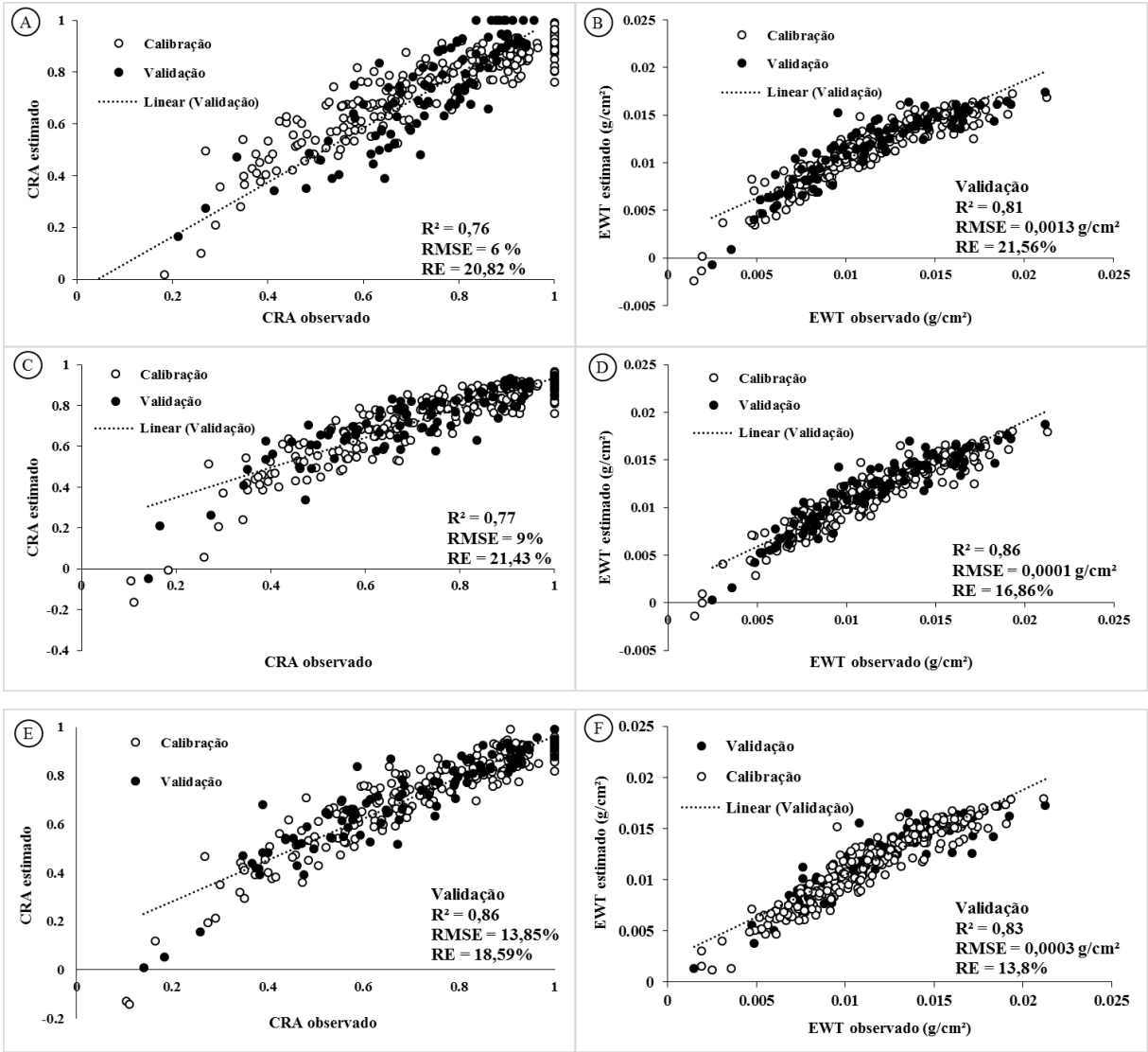


Figura 24 - Análise gráfica do resultado de calibração e validação dos modelos de regressão para a predição do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus* A) Predição do CRA por uma única banda, B) Predição do EEA por uma única banda, C) Predição do CRA pelas regiões do espectro, D) Predição do EEA pelas regiões do espectro, E) Predição do CRA pelo método de *stepwise* e F) Predição do EEA pelo método de *stepwise*

A metodologia aplicada se mostrou eficiente na seleção de variáveis e geração de modelos para predição do CRA e EEA a partir de dados hiperespectrais. Os resultados de calibração e validação dos modelos evidenciam a potencialidade do uso de informações de reflectância para o monitoramento da variação do conteúdo de água em folhas de *Eucalyptus.* Os estudos realizados em folhas dão suporte para que novas pesquisas sejam realizadas a nível de dossel ou mesmo orbital, portanto novos estudos usando diferentes níveis de aquisição de dados são necessários para corroborar com as informações apresentadas neste trabalho.

4.4 Conclusão

É possível predizer CRA e EEA, para o gênero *Eucalyptus* por meio de modelos matemáticos derivados de dados hiperespectrais.

De acordo com a metodologia empregada neste trabalho e os resultados obtidos é possível afirmar que os comprimentos de onda com maior correlação com os parâmetros de conteúdo de água são o λ_{1883} para o CRA e o λ_{2258} para o EEA.

Dos índices testados o índice $SR_{1300,1450}$ é o mais adequado para estimar o parâmetro EEA, enquanto que para o para o CRA o mais adequado é o MSI.

O método de seleção de variáveis *stepwise* é o de maior potencial em estimar o CRA, já para o EEA é o método de seleção pelas regiões do espectro.

Referências

ADAMI, M.; HASTENREITER, F.A.; FLAMIGNAN, D.L.; FARIA, R.T. Estimativa de área foliar de soja usando imagens digitais e dimensões foliares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007,. **Anais…** Florianópolis: SBRS, 2007. p. 9-14.

AHAMED, T.; TIAN, L.; TING, K.C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production, **Science Direct**, Amsterdam, v. 35, p. 2455–2469, 2011.

ARNDT, S.K.; IRAWAN, A.; SANDERS, G. Apoplastic water fraction and rehydration techniques introduce significant errors in measurements of relative water content and osmotic potential in plant leaves. **International Journal for Plant Biology**, Lund, v. 155, p. 355-368, 2015.

CAO, Z.; WANG, Q.; ZHENG, C. Best hiperespectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. **Ecological Indicators**, New York, v. 54, p. 96–107, 2015.

CARTER, G.A. Ratios of leaf reflectance in narrow wavebands as indicators of plant stress. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 15, p. 697–703, 1994.

_____. Reflectance wavebands and indices for remote estimation of photosynthesis and stomatal conductance of pine canopies. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 82, p. 198-207, 1998.

CARTER, G.A.; KNAPP, A.K. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. **American Journal of Botany***;* Baltimore, v. 88, n. 4, p. 677–684, 2001.

CECCATO, P.; FLASSE, S.; PINTY, B.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S.; GRÉGOIRE, J. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 77, p. 22–33, 2001.

CECCATO, P.; GOBRON, N.; FLASSE, S.; PINTY, B.; TARANTOLA, S. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data. Part 1: theoretical approach. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 82, p. 188-197, 2002.

CHUN, H.; KELES, S. Sparse partial least squares regression for simultaneous dimension reduction and variable selection. **Journal of the Royal Statistical Society**, London, v. 72, p. 3 – 25, 2010.

CHUNG, D.; CHUN, H. **An introduction to the "spls" Package, Version 1.0**. 2012. Disponível em: <http://cran.r-project.org/web/packages/spls/vignettes/spls-example.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2015.

CHUVIECO, E.; COCERO, D.; RIAÑO, D.; MARTIN, P.; MARTÍNEZ- VEGA, J.; DE LA RIVA, J. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuels moisture content in forest fire danger rating. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 3, p. 322–331, 2004.

CROFT, H.; CHEN, J.M.; ZHANG, Y. The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures. **Ecological Complexity**, Amsterdam, v. 7, p. 119–130, 2014.

DARVISHZADEH, R.; SKIDMORE, A.; SCHLERF, M.; ATZBERGER, C.; CORSI, F.; CHO, M. LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 63, n. 4, p. 409–426, 2008.

DATT, B. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. **Australian Journal of Botany**, East Melbourne, v. 47, p. 909-923, 1999.

DREYER, E.; BOUSQUET, F.; DUCREY, M. Use of pressure volume curves in water relation analysis on woody European oak species. **Annales des Sciences Forestières**, Amsterdam, v. 47, p. 285–297, 1990.

ESTES, L.D.; OKIN, G.S.; MWANGI, A.G.; SHUGART, H.H. Habitat selection by a rare forest antelope: a multi-scale approach combining field data and imagery from three sensors. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 112, p. 2033−2050, 2008.

FABRE, S.; LESAIGNOUX, A.; OLIOSO, A.; BRIOTTET, X. Influence of water content on spectral reflectance of leaves in the 3-15µm domain. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, New York, v. 8, n. 1, p. 143-147, 2011.

FERNANDES, E.T.; CAIRO, P.A.R.; NOVAES, A.B. Respostas fisiológicas de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 1, p. 29-34, 2015.

FERREIRA, M.M.C.; ANTUNES, A.M.; MELGO, M.S.; VOLPE, P.L.O. Quimiometria. I: Calibração multivariada, **Química Nova**, Campinas, v. 22, p. 724–731, 1999.

FONSECA, C.E.L.; CONDÉ, R.C.C. Estimativa da área foliar em mudas de mangabeira (*Hancornia speciosa* Gom.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 29, n. 4, p. 593-599, 1994.

GAO, B.C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 58, p. 257-266, 1996.

HARDISKY, M.A.; KLEMAS, V.; SMART, R.M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, New York, v. 49, p. 77-83, 1983.

HUNT, E.R.; ROCK, B.N. Detection of changes in leaf water content using near and middle: infrared reflectance. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 30, p. 43-54, 1989.

IMANISHI, J.; SUGIMOTO, K.; MORIMOTO, Y. Detecting drought status and LAI of two Quercus species canopies using derivative spectra. **Computers and Electronics in Agriculture,** Amsterdam, v. 43, p. 109–129, 2004.

LUCENA, R.R.M.; VASCONCELOS BATISTA, T.M. de; DOMBROSKI, J.L.D.; LOPES, W.D.A.R.; OLIVEIRA RODRIGUES, G.S. de. Medição de área foliar de aceroleira. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 40-45, 2011.

MIRZAIE, M.; DARVISHZADEH, R.; SHAKIBA, A.; MATKAN, A.A.; ATZBERGER, C.; SKIDMORE, A. Comparative analysis of different uni- and multi-variate methods for estimation of vegetation water content using hyper-spectral measurements. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 26, p. 1–11, 2014.

MOBASHERI, M.; FATEMI, S. Leaf equivalent water thickness assessment using reflectance at optimum wave lenghts. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Heidelberg, v. 25, n. 1, p. 196-202, 2013.

PACHECO, A.C.; CAMARGO, P.R.; SOUZA, C.G.M. Deficiência hídrica e aplicação de ABA nas trocas gasosas e no acúmulo dos flavonoides em calêndula (*Calendula officinalis* L.). **Acta Scientiarum.** Agronomy, Maringá, v. 33, n. 2, p. 275-288, 2011.

PEÑUELAS, J.; INOUE, Y. Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves. **Photosynthectica**, Praha, v. 36, p. 355-360, 1999.

PEÑUELAS, J.; PIÑOL, J.; OGAYA, R.; FILELLA, J.; Estimation of plant water concentration by the reflectance index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, Oxfordshire, v. 18, p. 2869-2875, 1997.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL, C.; SERRANO, L.; SAVE, R. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator water status. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 14, p. 1887-1895, 1993.

_____. Cell wall elasticity and water index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. **International Journal of Remote Sensing,** London, v. 17, p. 373-382, 1996.

PEÑUELAS, J.; GAMON, J.A.; FREDEEN, A.L.; MERINO, J.; FIELD, C.B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves, **Remote Sensing Environment**, New York, v. 48, p. 135-146, 1994.

RANJAN, R.; SAHOO, R.N.; CHOPRA, U.K.; PRAMANIK, M.; SINGH, A.K.; PRADHAN, S. Assessment of water status in wheat (*Triticum aestivum* L.) using ground based hyperspectral reflectance. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences,** Allahabad, v. 5, n. 20, p. 1–12, 2015.

SAYES, W.; MOUAZEN, A.M.; RAMON, H. Potential for onsite and analysis of manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 91, p. 393–402, 2008.

SEELIG, H.D.; HOEHN, A.; STODIECK, L.S.; KLAUS, D.M.; ADAMS, I.W.W.; EMERY, W.J. Relations of remote sensing leaf water indices to leaf water thickness in cowpea, bean, and sugar beet plants. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 112, p. 445-455, 2008.

SELLERS, P.J.; DICKINSON, R.E.; RANDALL, D.A.; BETTS, A.K.; HALL, F.G.; BERRY, J.A.; COLLATZ, G.J.; DENNING, A.S.; MOONEY, H.A.; NOBRE, C.A.; SATO, N.; FIELD, C.B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, New York, v. 275, p. 502–509, 1997.

SZILAGYI, J. Can a vegetation index derived from remote sensing be indicative of areal transpiration? **Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 127, p. 65–79, 2000.

TURNER, N.C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil**, Hague, v. 58, n. 3, p. 339-366, 1981.

VIDAL-TORRADO, P.; SPAROVEK, G. **Mapa pedológico detalhado do Campus Luiz de Queiroz.** Piracicaba: ESALQ, 1993. Escala 1: 10000.

WANG, J.; XU, Y.; YANG, S. Estimations of plant water content by spectral absorption features centered at 1450 nm and 1940 nm regions. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 157, p. 459-469, 2009.

WANG, Q.; LI, P. Identification of robust hiperespectral indices on forest leaf water content using prospect simulated dataset and field reflectance measurements. **Hydrological Processes,** Chichester, v. 26, p. 1230–1241, 2012.

WÓJTOWICZ, M.; WÓJTOWICZ, A.; PIEKARCZYK, J.;Application of remote sensing methods in agriculture, **International Journal of the Faculty of Agriculture and Biology**, Varsvia, v. 11, n. 1, p. 31-50, 2016.

YI, Q.; BAO, A.; WANG, Q.; ZHAO, J.; Estimation of leaf water content in cotton by means of hiperespectral indices. **Computer and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 90, p. 144-151, 2013.

ZARCO-TEJADA, P.J.; RUEDA, C.A.; USTIN, S.L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 85, p. 109-124, 2003.

ZHANG, F.; ZHOU, G.; Estimation of canopy water content by means of hyperspectral indices based on drought stress gradient experiments of maize in the north plain China. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 7, p. 15203–15223, 2015.

ZHANG, Q.; LI, Q.; ZHANG, G. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. **Journal of Spectroscopy**, New York, v. 27, n. 2, p. 93-105, 2012.

ZHANG, F.; ZHOU, G.; ZHANG, G.; MENG, Y.; CHEN, B.; WANG, Y. Monitoring cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaf ion content and leaf water content in saline soil with hyperspectral reflectance. **European Journal of Remote Sensing**, Basel, v. 47, p. 593-610, 2014.