

Validação de modelos espectrais para a predição de conteúdo relativo de água (CRA) em folhas de *Eucalyptus* spp.

Hugo Tameirão Seixas¹
Peterson Ricardo Fiorio¹
Bruna Mariani Polez¹
Taila Fernanda Strabeli¹

¹Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” –
USP/ESALQ
Caixa Postal 9 – 13418-900 – Piracicaba – SP, Brasil
{hugo.seixas, fiorio, bruna.polez, tailastrabeli}@usp.br

Abstract. There will be an increasing demand for wood products in the next years, being necessary to develop new technologies to improve the efficiency of the forestry production. The water status of the plant is an important factor in the productivity, and can have great impacts on the culture. Remote sensing can be considered as a useful tool to measure water content of leaves, being applicable over a variety of scales. The objective of this study was to evaluate the efficiency of three spectral models over their capacity of predicting relative water content of *Eucalyptus* spp. leaves. The water content data was obtained through gravimetric analysis of fresh, saturated and dry leaves, and by hyperspectral measures in laboratory. This methodology found the average values of relative water content was similar between the observed data and the estimated data from the stepwise model, however, it showed a big difference when compared to the single band and spectrum regions models. However, none of the data generated by the models presented significant correlation with the observed RWC values, which the stepwise model showed the highest coefficient of determination ($R^2=0.012$) and the single band and spectrum regions the lowest ($R^2=0.004$) and ($R^2=0.002$) respectively. The results indicate that these models couldn't predict relative water content values to individual leaves, but the average RWC obtained by the stepwise model can be considered similar to the observed RWC.

Palavras-chave: remote sensing, plant physiology, spectral behaviour, sensoriamento remoto, fisiologia de plantas, comportamento espectral.

1. Introdução

O Brasil apresenta uma área de floresta plantada de *Eucalyptus* spp. de 5,56 milhões de hectares, o que representa 71,9% do total (Indústria Brasileira de Árvores, 2015). O país apresenta uma produtividade elevada dessa cultura, sendo uma atividade importante para a economia nacional. Porém, devido ao acelerado crescimento populacional, é previsto um aumento na demanda de madeira nas próximas décadas, o que traz o desafio de se utilizar com maior eficiência os recursos naturais, como a água, sem que os altos índices de produtividade sejam afetados. Por ser um recurso fundamental para o desenvolvimento da cultura, é necessário ter conhecimento do comportamento da água na planta, e como a falta dela pode ter impacto na produção.

A análise do teor de água em folhas exerce grande importância no monitoramento de áreas de risco de incêndios florestais (Datt, 1999, Peñuelas et al. 1993, 1996), sendo que a baixa disponibilidade de água pode causar morte de plantas e aumento de matéria seca sobre o solo, aumentando o risco de incêndios (Carlson & Burgan, 2003). A umidade foliar é um fator determinante no fator de risco de queimadas, e pode ser usado para analisar seu comportamento (Agee et al. 2002), e índices de teor de água na folha podem ser utilizados para identificar áreas vulneráveis a incêndios (Maki et al. 2004). A disponibilidade de água também é um dos principais fatores limitantes ao desenvolvimento de *Eucalyptus*, estando diretamente relacionado com níveis de produção de madeira (Stape et al. 2004), sendo que uma maior disponibilidade e alta eficiência do uso da água são relacionadas a maiores índices de

produtividade. O estresse hídrico pode acarretar em menor produção de madeira por ano em plantas de *Eucalyptus* (Stape et al. 2010), podendo causar perdas de área foliar e fechamento de estômatos (Silva et al. 2004), redução da atividade fotossintética (Gindaba et al. 2014), redução no crescimento e maiores taxas de mortalidade de mudas (Nautiyal et al. 1994).

Para determinar o estado hídrico das plantas, são usados índices de teor de água foliar, como CRA (Conteúdo Relativo de Água) e EWT (*Equivalent Water Thickness*), porém são técnicas caracterizadas por serem processos lentos, destrutivos e pontuais (Cao et al. 2015; Fedotov et al. 2016), e podem sofrer alterações devido a transpiração das folhas, que resulta em perda de massa, e pela dificuldade de se obter sua saturação absoluta (Ardnt et al. 2015). O uso de técnicas de sensoriamento remoto mostram ser uma alternativa eficaz para estimar conteúdo de água foliar, tendo as vantagens de ser um processo não destrutivo, rápido, e que pode ser utilizado de pequena a larga escala.

Existem diversos estudos que apontam boas relações entre índices espectrais e valores de conteúdo de água foliar, Bayat et al. (2016) estudou a resposta de dossel da gramínea *Poa Pratensis* ao efeito de seca, observando que houve respostas ao estresse hídrico nas bandas de absorção de água (1440nm e 1930nm) e na faixa do vermelho (775nm), observando que essa técnica foi eficiente na detecção de estresse hídrico antes mesmo da aparição de sintomas visuais. González-Fernández et al. (2015) encontrou boa correlação entre EWT de folhas de videira e comprimentos de onda de 1200nm, 1450nm e 1950nm, utilizando análise foliar por um espectroradiômetro de campo. Mobasheri & Fatemi (2013) sugeriram que uma grande variedade de bandas que podem ser usadas na predição de EWT, e que além das bandas mais conhecidas como as de absorção de água, outras bandas podem ser usadas para obter melhores resultados. Porém, há uma escassez de pesquisas testando modelos espectrais em amostras independentes das usadas na calibração dos mesmos, ou utilizando matérias de características heterogêneas.

Procurando entender melhor como as respostas de índices espectrais se comportam em diferentes amostras, o presente trabalho analisou a eficiência de três modelos propostos por Strabeli (2016), para isso foram utilizadas amostras foliares da mesma área experimental, porém em diferente estágio fenológico, relacionando valores de CRA obtidos por gravimetria com os valores calculados pelos modelos matemáticos.

2. Metodologia de Trabalho

O material analisado neste experimento foi coletado na Fazenda Areão, pertencente à Universidade de São Paulo, e localizada em Piracicaba. A área experimental faz parte do programa TECHS (Tolerância de Clones de Eucalipto a Estresses Hídrico e Térmico), que é formado por uma cooperativa entre o grupo de empresas do projeto BEPP (Brasil Eucalyptus Produtividade Potencial), a ESALQ/USP e a North Carolina State University, com o objetivo de analisar a adaptabilidade de diferentes clones em diversas regiões com diferentes condições edafo-climáticas (Stape et al. 2014). A área experimental do presente estudo é composta por 18 clones do gênero *Eucalyptus* spp.

A amostragem foi feita no dia 08 de setembro de 2016 às 9 horas da manhã, coletando-se um ramo de uma árvore aleatória dentro da parcela de cada clone, foram selecionadas 10 folhas saudáveis. As folhas foram identificadas e armazenadas em caixa térmica com gelo e posteriormente foram levadas para o laboratório de geoprocessamento da ESALQ. O dia da coleta apresentou uma umidade relativa média de 63%, temperatura média de 17.7°C e precipitação nula (Posto meteorológico de Piracicaba, 2015).

As folhas coletadas foram identificadas para o controle das amostras e posterior processamento dos dados. Em seguida foi realizada a leitura espectral da refletância relativa das folhas utilizando o espectroradiômetro FieldSpec[®] 3, acoplado ao acessório LeafClip, uma sonda de contato específica para análise de vegetação. A calibração do instrumento foi feita no

início da leitura de cada clone utilizando a placa branca presente no acessório LeafClip como padrão. As folhas foram analisadas com a parte adaxial voltada para o sensor, e foram feitas três leituras em diferentes regiões de cada folha.

Após a leitura espectral as folhas foram pesadas em uma balança de precisão para se obter o peso fresco individual. Seguidamente foram submergidas em água por 24 horas, para posteriormente serem obtidos os pesos túrgidos destas. Finalmente foram levadas para a estufa a uma temperatura de 60°C por 72 horas e novamente pesadas para se obter o peso seco. A ordem da obtenção de dados é retratada no fluxograma da Figura 1.

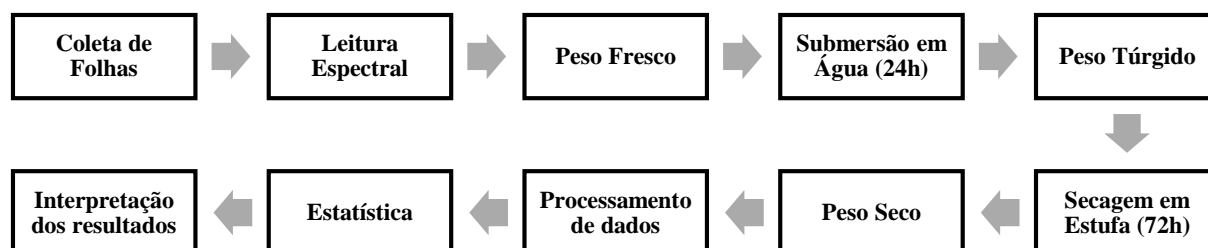


Figura 1. Fluxograma do procedimento de amostragem, obtenção de CRA e de curvas de refletância em laboratório, processamento e interpretação dos dados.

Após a análise em laboratório, os dados foram exportados para uma planilha no software Excel 2016, realizando-se o cálculo do CRA com base nos pesos obtidos, e a média individual das curvas espectrais de cada folha analisada. Para a obtenção do CRA foi usada o cálculo proposto por González & González-Vilar (2001), Smart & Bingham (1973), e Yamasaki & Dillenburg (1999), (Fórmula 1).

$$CRA = \frac{PF-PS}{PT-PS} * 100 \quad (1)$$

Sendo que PF é igual ao peso da folha fresca, PS é o peso da folha seca, e PT é o peso da folha saturada, os pesos são dados em gramas (g), e o resultado do CRA em porcentagem (%). Em seguida foi feito um tratamento inicial dos dados a fim de se encontrar valores incoerentes (*outliers*), tanto dos dados de refletância quanto de teor de água na folha, sendo que os valores atípicos foram removidos do conjunto de dados.

Para o cálculo de CRA através do uso de modelos espectrais, foram usadas três diferentes fórmulas propostas por Strabeli (2016), cada uma obtida por diferentes métodos de seleção de variáveis, como é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Fórmulas dos modelos espectrais propostos por Strabeli (2016) para a predição de CRA em folhas de *Eucalyptus spp.*

Modelos espectrais	Fórmulas
Única Banda	$y = 1,213062 - 3,00447 * (\lambda_{1883})$
Regiões do Espectro	$y = 1,366438 - 0,94477 * (\lambda_{694}) - 0,36067 * (\lambda_{1001}) + 1,509241 * (\lambda_{1439}) - 3,86283 * (\lambda_{1883}) - 0,47854 * (\lambda_{2423})$
Stepwise	$y = 1,123 - 7,793 * (\lambda_{382}) + 9,417 * (\lambda_{385}) - 30,871 * (\lambda_{1697}) + 458,232 * (\lambda_{1731}) - 425,116 * (\lambda_{1732}) - 5,274 * (\lambda_{2090})$

Os modelos de única banda e de regiões do espectro são compostos pelas bandas que apresentaram maior correlação em relação ao CRA observado, sendo que eles se diferem pelo número de bandas selecionadas. Já o modelo obtido pelo método stepwise, a escolha das bandas se deu pela metodologia *sparse Partial Least Square* (sPLS), que foi usado para identificar bandas com maior significância estatística.

A análise estatística dos dados foi feita através do software Excel 2016. A estatística descritiva foi realizada com o objetivo de comparar a média, desvio padrão e variância dos dados de CRA, também foi realizado o teste t pareado bicaudal, ao nível de significância de 5%, em que a hipótese nula infere que não há diferença significativa entre a média do CRA observado em relação aos dados estimados, já a hipótese alternativa sugere que existe diferença significativa entre as médias. Para avaliar a precisão dos modelos analisados com os dados obtidos, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro relativo (RE%).

3. Resultados e Discussão

Analisando-se a estatística descritiva dos dados (Tabela 2), é notável que os indicadores do CRA observado foram semelhantes aos estimados através do método stepwise. Já os indicadores dos modelos de banda única, e de seleção de regiões do espectro, apresentaram maior diferença em relação ao CRA observado, havendo uma subestimação da média dos valores do teor relativo de água nas folhas. Os valores obtidos variaram de 0.65 até 0.97, o que sugere que os dados obtidos pelos modelos espectrais estão em uma faixa normal, segundo Mullan & Pietragalla (2012), os níveis de CRA em plantas de trigo podem variar de 0.98 para folhas turgidas até 0.40 para folhas em estado de senescência ou apresentando secagem severa.

Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de CRA observado, e de CRA estimado.

	CRA Observado	CRA Estimado		
		Única Banda	Regiões do Espectro	Stepwise
Média	0.8617	0.7862	0.7941	0.8610
Desv. Pad.	0.0406	0.0597	0.0556	0.0494
Variância	0.0016	0.0035	0.0030	0.0024

Para avaliar se as médias de CRA observados e estimados se diferem entre si, foi realizado um teste t (Figura 3). De acordo com os valores obtidos pelo teste de hipóteses, é possível inferir que há diferença significativa entre a média do CRA estimado pelos modelos de única banda e regiões do espectro em relação ao observado, considerando-se um nível de significância de 5%. Já para o modelo stepwise, não se pode rejeitar a hipótese nula, ou seja, não é possível provar que há diferença entre o CRA estimado por este modelo em relação ao observado, já que o valor de T calculado é menor que o T crítico. Embora não seja possível avaliar a eficiência desses modelos pelo teste de hipóteses, fica claro que o método stepwise gerou valores de CRA mais próximos em relação aos observados.

Tabela 3. Resultados do teste t para os valores de CRA estimados em relação aos de CRA observado.

	Única Banda	Regiões do Espectro	Stepwise
T Calculado	9.5701	8.9307	0.1049
T Crítico	1.9908	1.9908	1.9908
P(T<=t)	8.4914*10 ⁻¹⁵	1.4702*10 ⁻¹³	0.9166

Para avaliar a precisão dos modelos testados, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro relativo (RE%), o primeiro é usado para medir a proporção de uma variabilidade em relação a outra, nesse caso a correlação entre dados de CRA obtidos pela pesagem das folhas com os estimados por modelos espectrais, o segundo para expressar a precisão de um conjunto de dados numéricos, e o último para

descrever a diferença relativa entre os valores observados e os estimados. O modelo que apresentará maior eficiência em prever o teor de água em folhas, será aquele que obtiver os maiores valores de R^2 , o que indica maior correlação, e o menor RMSE, que significa maior acurácia dos dados estimados (Cao et al. 2015). Para o presente experimento os três modelos testados apresentaram uma correlação em relação ao CRA observado muito baixa (Tabela 4), sendo que o maior deles foi pelo método stepwise ($R^2=0.012$), já pelos métodos de única banda e de regiões do espectro apresentaram correlação de $R^2=0.004$ e $R^2=0.002$, respectivamente. Já os valores de RMSE podem ser considerados baixos nos três casos, sendo de 0.10 para o método de banda única, 0.09 para regiões do espectro, e 0.06 para stepwise, Cao et al. (2015) obteve um RMSE de 0.08 para seu modelo mais eficiente. Os resultados de RE (%) também podem ser considerados satisfatórios, sendo que foi observado um erro relativo de 13.94% para o modelo de única banda, 12.74% para regiões do espectro, e 7% para stepwise, a literatura indica que modelos que apresentam valores de erro relativo menores que 10% são considerados excelentes, e entre 10% e 20% são considerados bons (Ranjan et al. 2015; Zhu et al. 2006).

Tabela 4. Coeficientes de determinação e erros encontrados para os valores de CRA estimados pelos modelos espectrais em relação ao CRA observado.

	Única Banda	Regiões do Espectro	Stepwise
R^2	0.004	0.002	0.012
RMSE	0.10	0.09	0.06
RE (%)	13.94%	12.74%	7.00%

Vários experimentos foram conduzidos com o objetivo de calibrar e testar modelos espectrais capazes de estimar teor de água em folhas, utilizando sensores terrestres em condições de laboratório e sensores orbitais, e obtendo altas correlações. Oumar & Mutanga (2010) obtiveram $R=0.74$ estimando teor de água na planta pela extrapolação de dados obtidos em laboratório para sensores orbitais. Cao et al (2015) encontraram R^2 de 0.95 e 0.97 para os melhores índices usados para estimar CRA e espessura equivalente da água (EEA), respectivamente. Ranjan et al. (2015) analisou modelos espectrais na cultura do trigo, obtendo a melhor resposta com $R^2=0.91$ na predição de EEA. Os experimentos citados acima fizeram a calibração e a validação de modelos espectrais utilizando um conjunto de dados, o que os diferencia do presente trabalho, que tem como objetivo avaliar a eficiência de modelos criados com base na mesma área experimental, mas realizando as coletas de dados em diferentes estádios fenológicos da planta, o que causa uma maior heterogeneidade nos dados em relação aos trabalhos.

No presente experimento, o modelo que apresentou melhor precisão foi pelo método stepwise ($R^2=0.012$, $RMSE=0.06$ e $RE=7\%$), apresentando maior valor de coeficiente de determinação e menores valores da raiz quadrada do erro médio e do erro relativo. Já os modelos gerados por única banda e por regiões do espectro apresentaram valores muito similares, tanto na estatística descritiva, quanto nos valores de correlação, essa característica também é visível nos gráficos de dispersão presentes na Figura 2, sendo que a distribuição dos pontos dos dois modelos é muito semelhante. Isso reforça a observação de Strabeli (2016) de que não há diferença significativa entre esses modelos, que foram gerados pelo mesmo método, mas com números diferentes de bandas, sendo que a adição de 5 bandas no modelo de regiões do espectro não gerou melhores resultados em relação ao de única banda. Portanto os resultados mostram que a metodologia usada para a geração de modelos espectrais tem maior influência nos resultados do que o número de bandas utilizadas.

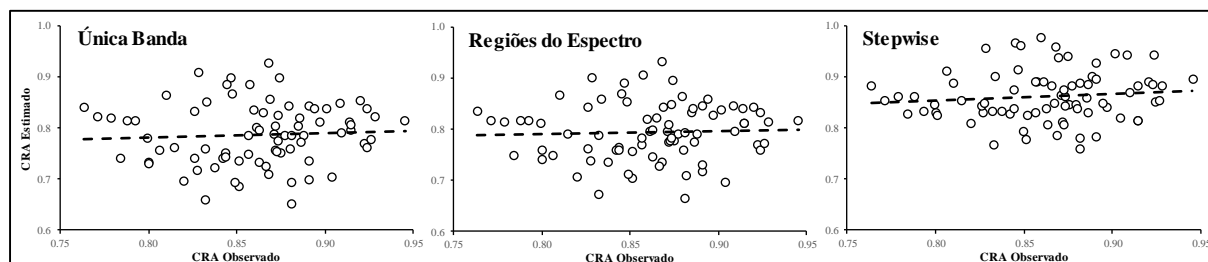


Figura 2. Gráfico de dispersão da relação linear entre CRA observado e CRA estimado utilizando-se três modelos espectrais diferentes.

O uso de modelos espectrais para a predição de teor de água em folhas apresenta diversas fontes de variabilidade que podem dificultar a estabilidade das respostas desses modelos. A obtenção de valores de CRA em laboratório pode sofrer grandes variações dependendo da metodologia empregada, por exemplo na hidratação das folhas (Arndt et al. 2015; González & González-Vilar, 2001), podendo influenciar fortemente nos resultados de CRA dependendo da espécie analisada. Segundo Datt (1999), a refletância de folhas pode sofrer grandes variações devido a fatores fisiológicos como potencial hídrico, potencial osmótico e de turgor, fechamento de estômatos, transpiração e taxa de fotossíntese. Resultados obtidos por Wang & Li (2011) indicam que fatores como espécie analisada, localização da amostra no dossel, condições de crescimento e estágio de desenvolvimento influenciam a precisão de índices espectrais, e acrescentam que maiores conjuntos de dados incluindo dados obtidos em diferentes ambientes e condições de plantas deveriam ser usados na calibração de modelos mais abrangentes.

4. Conclusões

O objetivo central da presente pesquisa foi avaliar a eficiência de três modelos espectrais utilizando amostras foliares de uma mesma população de árvores, porém, em diferentes estádios de desenvolvimento.

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que não foi possível estimar os dados de CRA das folhas com precisão através dos modelos espectrais, sendo que a correlação encontrada entre os dados observados e os estimados foi muito baixa.

Apesar da baixa correlação, a média dos valores de CRA preditos pelo método stepwise não apresenta diferença significativa em relação aos valores de CRA observado, o que pode indicar que este modelo foi efetivo na predição da média do CRA do conjunto total de folhas.

Estudos complementares devem ser feitos, afim de analisar alternativas para calibrar modelos que apresentem estabilidade para a predição de valores de teor de água na folha em condições heterogêneas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - Processo nº 2013/22435-9), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ao projeto PROSENSAP e ao projeto TECHS.

Referências Bibliográficas

- Agee, J. K.; Wright, C. S.; Williamson, N.; Huff, M. H. Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behaviour. **Forest Ecology and Management**, v. 167, p.57–66, 2002.
- 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.
- Bayat, B.; Tol, C.; Verhoef, W. Remote sensing of grass response to drought stress using spectroscopic techniques and canopy reflectance model inversion. **Remote Sensing**, v. 557, p.1-24, 2016.
- Cao, Z.; Wang, Q.; Zheng, C. Best hyperspectral indices for tracing leaf water status as determined from leaf dehydration experiments. **Ecological Indicators**, v. 54, p.96–107, 2015.
- Carlson, J.D.; Burgan, R.E. Review of user needs in operational fire danger estimation: the Oklahoma example. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p.1601–1620, 2003.
- Datt, B. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. **Australian Journal of Botany**, v. 47, p.909-923, 1999.
- Fedotov, Y.; Bullo, O.; Belov, M.; Gorodnichev, V. Experimental Research of Reliability of Plant Stress State Detection by Laser-Induced Fluorescence Method. **International Journal of Optics**, v.2016, 6 p., 2016.
- González, L.; González-Vilar, M. (2001) Determination of relative water content. In: Roger, M.J.R. (Eds.). **Handbook of plant ecophysiology techniques**. Kluwer Academic Publishers, p. 207–212.
- González-Fernández, A.B.; Rodríguez-Pérez, J.R.; Marcelo, V.; Valenciano, J.B. Using field spectrometry and a plant probe accessory to determine leaf water content in commercial vineyards. **Agricultural Water Management**, v. 156, p.43-50, 2015.
- Gindaba, J.; Rozanov, A.; Negash, L. Response of seedlings of two Eucalyptus and three deciduous tree species from Ethiopia to severe water stress. **Forest Ecology and Management**, v. 201, p.119-129, 2004.
- Indústria Brasileira De Árvores. Indústria Brasileira de Árvores. [Brasília]: Iba, 2015. Disponível em: <http://www.iba.org/shared/iba_2015_pt.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2016.
- Maki, M.; Ishihara, M.; Tamura, M. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p.441–450, 2004.
- Mobasheri, M.R.; Fatemi S.B.; Leaf Equivalent Water Thickness assessment using reflectance at optimum wavelengths. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 23, p.196-202, 2013.
- Mullan, D.; Pietragalla, J. Leaf relative water content. In: Pask, A.J.D.; Pietragalla, J.; Mullan, D.; Reynolds, M. (Eds.). **Physiological breeding II: A field guide to wheat phenotyping**. Mexico: CIMMYT, 2012. cap. 20, p.25-27.
- Nautiyal, S.; Badola, H.K.; Pal, M.; Negi, D.S. Plant responses to water stress: changes in growth, dry matter production, stomatal frequency and leaf anatomy. **Biologia Plantarum**, v. 36, p.91-97, 1994.
- 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**, v. 12, p. 158-164, 2010.
- 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**, v. 14, p.1887-1905, 1993.
- Peñuelas, J.; Filella, I.; C.; Serrano, L.; Save, R. Cell wall elasticity and water index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. **International Journal of Remote Sensing**, v.17. p. 373-382, 1996.

Posto Meteorológico de Piracicaba. **Série de Dados Climatológicos do Campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/postoaut.html>>. Acesso em: 16/09/2016.

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**, v. 5, n.20, p.1-12, 2015.

Silva, F.C.; Shvaleva, A.; Maroco, J.P.; Almeida, M.H.; Chaves, M.M.; Pereira, J.S. Responses to water stress in two *Eucalyptus globulus* clones differing in drought tolerance. **Tree Physiology**, v. 24, p.1165-1172, 2004.

Stape, J.L.; Binkley, D.; Ryan, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p.17-31, 2004.

Stape, J.L.; Binkley, D.; Ryan, M.G.; Fonseca, S.; Loos, R.A.; Takahashi, E.N.; Silva, C.S.; Silva S.R.; Hakamada, R.E.; Ferreira J.M.A.; Lima, A.M.N.; Gava, J.L.; Leite, F.P.; Andrade, H.B.; Alves, J.M.; Silva, G.G.C.; Azevedo, M.R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p.1684-1694, 2010.

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...Curitiba: Embrapa Florestas**, 2014. p. 81-98.

Strabeli, T.F. **Resposta hiperespectral na determinação do conteúdo de água na folha em diferentes espécies de Eucalyptus spp.** 2016. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Universidade de São Paulo/ Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba. 2016.

Wang, Q.; Li, P. Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water content using prospect simulated dataset and field reflectance measurements. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 1230-1241, 2012.

Zhu, Y.; Li, Y.; Feng, W.; Tian, Y.; Yao, X.; Cao, W. Monitoring leaf nitrogen in wheat using canopy reflectance spectra. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, p.1037-1046, 2006.