

Relações entre variáveis dendrométricas de plantios de *Eucalyptus sp.* e valores de FRB de superfície de imagens do sensor TM/Landsat 5

Vanessa Canavesi¹
Flávio Jorge Ponzoni¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{vanessa, flavio}@ltid.inpe.br

Abstract. One of the most recent challenges is the analysis of the forest efficiency in to fix CO₂ using indirect measurements. Some scientific works have been performed exploring remote sensing, which have been based on the relation between radiometric and biophysical data. In spite of being achieved different success results, no mention has been made to the influence of the intrinsic illumination aspects caused by topography. The main objective of this work is to evaluate the influence of the topography in the relationship between radiometric data extracted from TM/Landsat 5 images and log volume data estimated from *Eucalyptus spp.* stands. The study area is covered by *Eucalyptus* stands from Votorantin Celulose e Papel, located in Capão Bonito town (SP). Slope and aspect data were utilized in the Illumination Factors determinations that were sliced in different illumination classes. The stands volumes were estimated from 89 sample plots defined in the field, including 11 different *Eucalyptus* species. Stand volume was correlated with radiometric data extracted from the TM/Landsat 5 images (BRF surface) considering two approaches: neglecting the illumination classes and considering them. Image from TM4 spectral band presented higher correlation between the mentioned variables. When the illumination classes were taking in account, the correlation coefficients increased from the dark to the better illuminated ones. Linear regression models were established considering both approaches and the stand volume as the dependent variable in order to make a thematic map with the spatial distribution of the volume. Comparing the two mentioned approaches by an error matrix, the coincidence level between these two set of data resulted in 51%, indicating that the illumination does influence the relationship between radiometric data and biophysical ones.

Palavras-chave: remote sensing, srtm, topography, sensoriamento remoto, srtm, topografia.

1. Introdução

A expressão “seqüestro de carbono” tornou-se evidente na Conferência de Kyoto, levada a cabo em 1997, que incluía dentro de seus objetivos avaliar com maior profundidade o ciclo do carbono atmosférico. Sabe-se que as florestas são grandes reservas de carbono e que a preservação da vegetação nativa e a implantação de reflorestamentos são ações que contribuem para a redução das emissões desse gás na atmosfera (Turner et al., 2004).

Segundo Maestri et al. (2004), inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos para estimar o conteúdo de carbono na vegetação e neles, a variável dendrométrica que comumente é relacionada com os teores de carbono é a biomassa florestal aérea, cuja determinação geralmente é feita pelo método direto ou destrutivo, nas quais as estimativas são feitas mediante observações de campo, seguidos de ajustes de modelos alométricos. Para isso são consideradas variáveis de fácil mensuração e que estão correlacionadas com a biomassa como DAP (Diâmetro a Altura do Peito) e altura das árvores (Muukkonen e Heiskanen, 2005).

Estudos envolvendo quantificação de biomassa de maneira indireta, ou seja, não destrutiva, tiveram início na década de 80 e no contexto da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, a biomassa pode ser estimada a partir de correlações com valores de Fatores de Reflectância (FRB) (Dong et al., 2003). Alguns trabalhos foram desenvolvidos para quantificar a biomassa utilizando imagens provenientes de sensores remotos ópticos (Zerbini, 1992; Lacruz et al., 2001; Foddy et al., 2003; Dong et al., 2003; Watzlawick, 2003), relacionando variáveis dendrométricas medidas em campo com dados radiométricos (principalmente FRB) extraídos das imagens orbitais. Esses trabalhos foram desenvolvidos

em florestas nativas e obtiveram diferentes graus de sucesso. No Brasil, destacam-se os trabalhos realizados por Bernardes (1998) e Sousa (1997).

Outros trabalhos foram realizados relacionando variáveis biofísicas com valores FRB extraídos de imagens orbitais. Utilizou-se a análise de regressão ou correlação para verificar a relação entre a resposta espectral e variáveis estruturais da floresta como área basal, DAP, altura das árvores e volume (Ardo, 1992; Trotter et al., 1997; Accioly et al., 2002; Dong et al., 2003; Lu et al., 2004; Muukkonen e Heiskanen, 2005). Os resultados desses trabalhos mostraram que as correlações foram mais significativas em formações florestais menos densas. Como exemplo, Ardo (1992) e Gemmell (1995) se depararam com saturação dos valores de FRB na região do infravermelho médio (Banda TM 5) para valores específicos de biomassa. Estes mesmos autores mencionaram que estudos anteriores mostraram que valores de FRB provenientes dessa mesma região espectral estão relacionados com o volume de madeira, mas de forma inversa.

Esses trabalhos não levaram em consideração a geometria de iluminação e a inclinação e orientação da vertente. Segundo Conese et al. (1993) e Gu e Gillespie (1998) a topografia pode exercer influência na radiação captada pelo sensor, pois vertentes voltadas para o sol no momento da aquisição da imagem tendem a apresentar pixels com valores mais elevados em relação as vertentes que ficam do lado oposto ao sol. Além do mais, terrenos inclinados podem produzir sombras dentro de um dossel florestal pelo posicionamento relativo das árvores.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da topografia nas relações entre a reflectância espectral obtida pelo satélite Landsat TM5 e o volume de madeira (m^3/ha) em um reflorestamento de *Eucalyptus spp.* no município de Capão Bonito – SP.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Capão Bonito, no Estado de São Paulo (**Figura 1**). O município está localizado na Zona Fisiográfica do Paranapiacaba, Vale do Alto do Paranapanema, à latitude sul $24^{\circ} 00' 14''$ e à longitude oeste $48^{\circ} 20' 54''$, em altitude média de 705 m, distando a 226 Km da capital (CEPAM, 2005).

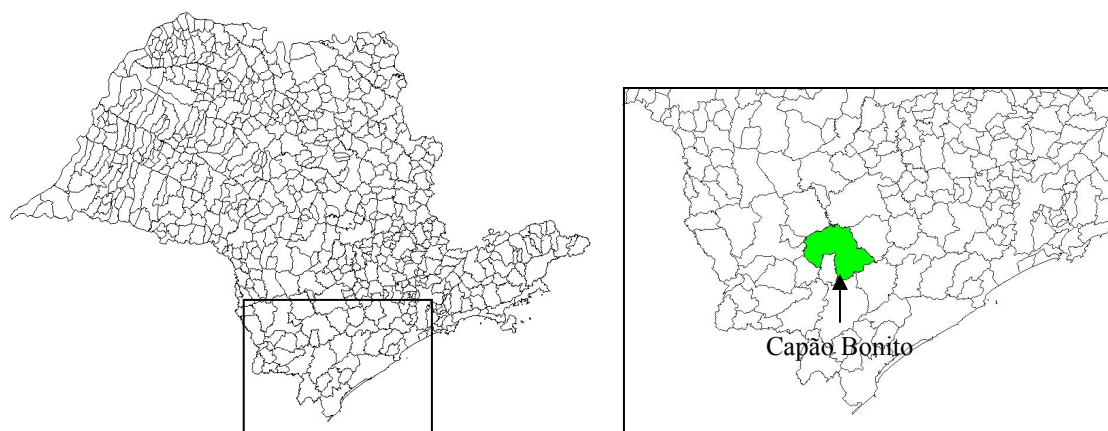


Figura 1: Localização da área de estudo.

Os solos da região compreendem duas unidades geomorfológicas: o planalto de Guapiara e a Serra de Paranapiacaba. Nos solos ocorrentes no município há predomínio de Latossolo

Vermelho, associado ao Argissolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo (Sgarbi, 2002).

Com base na classificação de Köppen, Setzer (1946) atribui para a região os tipos climáticos Cfa e Cfb, ambos sem estiagem. O clima Cfa definido como mesotérmico úmido, apresenta temperaturas superiores a 22°C no verão e pluviosidade acima de 30mm no mês mais seco, sendo o índice pluviométrico compreendido entre 1100 a 1700 mm. O clima Cfb é do tipo mesotérmico úmido, com a temperatura média do mês mais quente não atingindo a 22°C e precipitação de 1100 a 2000 mm, constituindo clima de região serrana.

Nesse município estão presentes plantios de *Eucalyptus sp.* pertencentes à indústria Votorantim Celulose e Papel (VCP), os quais ocupam uma área de 43.000 hectares.

2.2 Aquisição e processamento da imagem TM/Landsat 5

Foi utilizada uma imagem TM/Landsat 5, órbita/ponto 220/77, adquirida do dia 05/09/2006 (**Figura 2**), a qual foi georreferenciada ao sistema de projeção UTM, tomando como imagem de referência imagens georreferenciadas do Landsat 7 disponíveis no Mr. Sid (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>). O erro do georreferenciamento foi menor que 0,5 pixel e a reamostragem dos pixels foi feita pelo método vizinho mais próximo.

Os números digitais (ND) da imagem foram convertidos para valores de FRB aparente utilizando os coeficientes de calibração apresentados por Chander e Markhan (2003). Para essa conversão também foram considerados o zênite e a elevação solar no momento da aquisição da imagem.

A conversão dos valores de FRB aparente para valores de FRB de superfície foi feita utilizando como base o algoritmo de correção atmosférica 6S desenvolvido por Vermote et al. (1997).

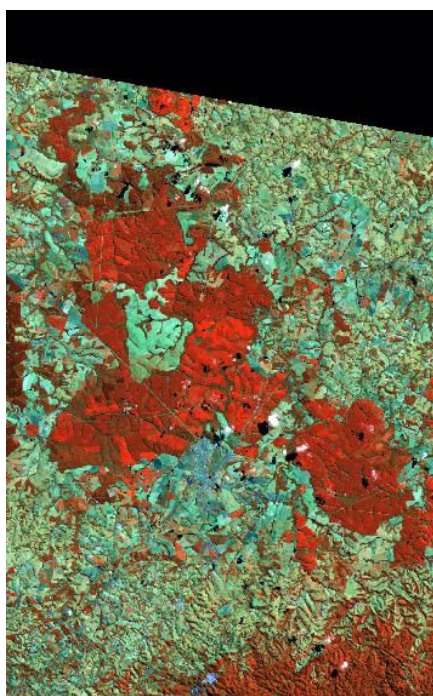


Figura 2: Composição colorida RGB (453) da imagem TM/Landsat 5

2.3 Cálculo das classes de iluminação

Primeiramente foi calculado o fator de iluminação utilizando a imagem orientação das vertentes, ou imagem azimutal, e imagem declividade, ou imagem zenital, as quais foram

geradas por Valeriano (2005) utilizando como base dados SRTM. A base de dados original, obtida no endereço da USGS (*United States Geological Survey*) com uma resolução de aproximadamente 90 m, foi modificada e foi gerado um novo Modelo Digital de Elevação (MDE) com uma resolução de 30 m, utilizando para isso o método de krigagem. Do MDE foram obtidas variáveis derivadas da altimetria, como a declividade e orientação das vertentes, por meio de operações de vizinhança (Valeriano, 2004).

Para gerar a imagem Fator de Iluminação (FI) foi utilizada a seguinte equação:

$$FI = (((\cos(\varphi_{x,y} - \varphi_s))^2 + (\cos(\theta_{x,y} - \theta_s))^2)^{1/2})$$

Onde:

$\varphi_{x,y}$ = orientação das vertentes (imagem azimutal)

φ_s = azimute solar

$\theta_{x,y}$ = declividade (imagem zenital)

θ_s = zênite solar no momento da aquisição da imagem

Essa equação foi inserida no aplicativo ENVI 4.2 e foi gerada a imagem “fator de iluminação”. Essa imagem foi fatiada em classes de iluminação no aplicativo SPRING 4.2.

A imagem obtida pelo cálculo do fator de iluminação contém valores variando de 0,65 a 1,39. Os valores menores que 1 indicam vertentes voltadas para o lado oposto ao sol, ou seja, pixels com pouca iluminação ou escuros. Valores maiores que 1 indicam vertentes voltadas para o sol, ou seja, pixels iluminados e valores em torno de 1 indicam locais planos. Essa imagem foi fatiada em cinco classes: muito iluminado (1,242 a 1,39), iluminado (1,094 a 1,242), plano (0,946 a 1,094), pouco iluminado (0,798 a 0,946) e escuro (0,650 a 0,798). A classe muito iluminado foi descartada, pois não haviam pixels representantes para algumas espécies.

2.4 Obtenção das variáveis biofísicas

Um banco de dados georreferenciados foi montado no aplicativo SPRING 4.2 e informações sobre os talhões como espécie, idade da planta, espaçamento e tipo de solo, fornecidas pela VCP, foram inseridas no banco de dados. De posse do mapa contendo as classes de iluminação, foram escolhidas 11 espécies, distribuídas em talhões com diferentes tipos de solo, em diferentes idades e que tivessem mais de uma classe de iluminação, originando 89 pontos amostrais e suas coordenadas foram anotadas.

O trabalho de campo foi realizado nos dias 14 a 18 e de 28 a 31 de agosto. Para cada ponto foi lançada uma parcela a qual foi localizada no campo por meio de suas coordenadas geográficas e um GPS (*Global Positioning System*). A parcela possuía tamanho variável e contemplava 60 árvores (10 árvores x 6 linhas). Em cada parcela foram medidos os CAPs (Circunferência a Altura do Peito) das 60 árvores, a altura das árvores da primeira linha e a altura das 5 árvores dominantes. Os valores de CAP foram obtidos utilizando uma fita métrica e as alturas foram medidas utilizando um hipsômetro de Haga. Estes dados serviram de base para o cálculo de volume de madeira ($m^3 \cdot ha^{-1}$) por meio de um programa computacional desenvolvido pela VCP.

2.5 Relação entre as variáveis biofísicas e a imagem Landsat

Cada parcela foi identificada na imagem TM/Landsat 5 por meio das suas coordenadas geográficas e os valores de FRB de superfície referentes a cada banda foram extraídos. Foram calculadas as correlações entre as variáveis biofísicas e os valores de FRB de superfície por

banda sem considerar as classes de iluminação. Depois foi realizado o mesmo procedimento considerando as classes de iluminação.

A análise de regressão foi realizada utilizando as imagens das bandas que apresentaram maiores correlações como variáveis independentes e as variáveis biofísicas como variáveis dependentes. A variável biofísica utilizada foi o volume por hectare, estimado a partir do volume encontrado na parcela. Esse procedimento também foi feito sem considerar as classes de iluminação e logo após considerando as classes de iluminação. Foram gerados mapas de distribuição dos volumes para os dois casos, os quais foram comparados por meio da exatidão de mapeamento global.

3. Resultados e Discussão

A correlação entre a variável biofísica e os valores de FRB de superfície em cada banda é apresentada na **Tabela 1**. A imagem da banda 4 foi a que apresentou maior correlação com o volume e esse resultado também foi encontrado por Lu et al. (2004). A correlação negativa ou inversa pode estar relacionada com a grande quantidade de sombras no dossel produzidas pelos indivíduos adultos dessa espécie e/ou pelos efeitos da topografia na resposta espectral da vegetação.

Tabela 1: Correlação entre a variável biofísica e os dados obtidos das imagens Landsat TM.

Bandas Landsat	Volume (m ³ /ha)
TM1	-0,04657293
TM2	-0,10076649
TM3	0,03142269
TM4	-0,63405632
TM5	-0,13052072
TM7	0,07269945

O mesmo foi feito para testar a influência da topografia na relação entre a variável biofísica e os valores de FRB de superfície obtidos em cada banda. Os resultados são apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2: Correlação entre a variável biofísica e os dados obtidos das imagens TM/Landsat 5 por classes de iluminação.

Bandas Landsat	Volume de Madeira (m ³ /ha)				
	Todas as Classes	Classes de Iluminação			
		Iluminado	Plano	Pouco Iluminado	Escuro
TM1	-0,04657293	0,03114513	-0,36718194	-0,11782879	0,24392040
TM2	-0,10076649	-0,07098948	-0,07550264	-0,04551434	-0,33347906
TM3	0,03142269	0,03468171	-0,04500411	0,11011874	0,02200477
TM4	-0,63405632	-0,80167376	-0,70335872	-0,58172299	-0,51658019
TM5	-0,13052072	-0,12029254	-0,10526874	0,00497108	-0,36219608
TM7	0,07269945	0,29786369	-0,05165588	0,22482892	-0,24498693

Na banda 4 pode-se observar aumento da correlação com o volume na classe mais iluminada em relação a correlação obtida sem considerar as classes de iluminação (**Tabela 1**). Esse valor vai diminuindo quando se caminha para as classes menos iluminadas.

De posse desses resultados optou-se por realizar a análise de regressão somente com os valores de FRB de superfície provenientes da banda 4, cujos dados foram considerados como

variável independente. Foram gerados dois modelos: um com todos os valores de FRB de superfície juntos (modelo 1) e outro somente com os valores de FRB de superfície obtidos em pixels iluminados (modelo 2). A equação resultante foi aplicada na imagem TM/Landsat 5 e obtiveram-se os mapas de volume para a área de estudo. O valor de R^2 para a equação gerada no primeiro modelo foi de 0,41 e para o segundo modelo foi de 0,64.

Para avaliar o resultado gerado pelos dois modelos foi feito um fatiamento das imagens em 10 classes de volume (0 a 120, 121 a 240, 241 a 360, 361 a 480, 481 a 600, 601 a 720, 721 a 840, 841 a 960, 961 a 1080 e 1080 a 1200 m³/ha). As mesmas classes foram aplicadas para as duas imagens e foi realizada uma operação de detecção de mudança tomando como imagem inicial a imagem gerada pelo modelo 1 e como imagem final a gerada pelo modelo 2.

Foi gerada a matriz de confusão a partir da qual foi calculado um índice de coincidência mediante a razão do somatório dos totais de pixels existentes na diagonal pelos totais de pixels de todas as classes de volume. O valor do índice foi de 51%, indicando que as espacializações do volume mediante os dois critérios (desconsiderando a considerando as classes de iluminação), gerariam resultados diferentes, comprovando a influência da iluminação nas correlações estudadas.

4. Conclusões

Os dados da banda 4 do sensor TM/Landsat 5 foram os que apresentaram as maiores correlações com o volume. Quando se considera as diferentes classes de iluminação, as correlações com os dados da banda 4 foram ainda maiores, especialmente nas classes mais iluminadas.

A coincidência de 51% entre as imagens contendo as classes de volume indicou que a iluminação exerce influência relevante quando do interesse em estabelecer correlações entre dados radiométricos orbitais e variáveis biofísicas da vegetação.

5. Referências

Accioly, L.J.O.; Pachêco, A.; Costa, T.C.C.; Lopes, O.F.; Oliveira, M.A.J. Relações empíricas entre estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 492-498, 2002.

Ardo, J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 9, p. 1779-1786, 1992.

Bernardes, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta de Tapajós-Estado do Pará**. 1996. 94 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

CEPAM – Centro de Estudos e Pesquisas de Administração Municipal. <http://www.cepam.sp.gov.br> acessado em 21/08/06.

Chander, G.; Markham, B. Revised Landsat 5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

Conese, C.; Gilabert, M.A.; Maselli, F.; Bottai, L., Topographic normalization of TM scenes through the use of an atmospheric correction method and digital terrain models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, p. 1745-1753, 1993.

Foddy, G.M.; Boyd, D.S.; Cutler, M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, n. 85, p. 463-474, 2003.

Dong, J.; Kaufmann, R.K.; Myneni, R.B.; Tucker, C.J.; Kauppi, P.E.; Liski, J.; Buermann, W.; Alexeyev, V.; Hughes, M.K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. **Remote Sensing of Environment**, n. 84, p. 393-410, 2003.

Gemmell, F.M. Effects of forest cover, terrain, and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky Mountain site. **Remote Sensing of Environment**, n. 51, p. 291-305, 1995.

Gu, D.; Gillespie, A. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun–canopy–sensor geometry. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, p. 166-175, 1998.

Lacruz, P.M.S.; Shimabukuro, Y.E.; Williams, M.; Rennó, C.D.; Herbert, D.; Rastetter, E.B. Utilização do sensoriamento remoto e dados de campo para modelagem das atividades biogeoquímicas na Floresta Nacional de Tapajós. In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2001. Artigos, p. 1699-1701. On-line . Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.10.28/doc/1699.1701.256.pdf>. Acesso em: 24 out. 2006.

Lu, D.; Mausel, P.; Brondízio, E.; Moran, E. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, v. 198, p. 149-167, 2004.

Maestri, R.; Sanqueta, C.R.; Machado, S.A.; Scolforo, J.R.S.; Côrte, A.P.D. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o seqüestro de carbono. **Revista Floresta**, vol. 34, n. 3, p. 347-360, 2004.

Muukkonen, P.; Heiskanen, J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. **Remote Sensing of Environment**, n. 99, p. 434 – 447, 2005.

Setzer, J. **Contribuição para o estudo do clima do Estado de São Paulo**. São Paulo: Escolas Profissionais Salesianas. 1946, 239 p.

Sgarbi, F. **Produtividade do Eucalyptus sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do Estado de São Paulo**. 2002. 114 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 2002.

Souza, C. L. **Uso de imagens-índice e de imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de Pinnus spp.** 1997. 133 p. (INPE-6398-TDI/614), Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1997

Trotter, C.M.; Dymond, J.R.; Goulding, C.J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 10, p. 2209-2223, 1997.

Turner, D.P.; Guzy, M.; Lefsky, M.A.; Ritts, W.D.; Tuyl, S.V.; Law, B.E. Monitoring forest carbon sequestration with remote sensing and carbon cycle modeling. **Environmental Management**, v. 33, n. 4, p. 457-466, 2004.

Valeriano, M.M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos. p. 3595-3602. On-line. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>. Acesso em 04 jun. 2006.

Valeriano, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**, São José dos Campos, SP INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p., 2004.

Vermote, E.F.; Tanre, D.; Deuze, J.L.; Herman, M.; Morcrette, J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

Watzlawick, L.F. **Análise e estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados do satélite IKONOS II**. 2003. 119 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003.

Zerbini, N.J. **Estimativa de fitomassa aérea em região de floresta tropical com uso de dados de TM-Landsat 5 e HRV-SPOT 1**. 1992. 127 p. (INPE-5500-TDI/515), Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1992.