

UMA ABORDAGEM GERAL SOBRE UM MODELO DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA APLICADO AO SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL

MARCELO LOPEZ LATORRE^{1,2}
OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO³
YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO¹

¹INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 – 12201-970 – São José dos campos – SP, Brasil)
(yosio,latav) @ltid.inpe.br

²IEAv – Instituto de Estudos Avançados, Rodovia dos Tamoios
Km 5,5, 12.228.890 São José dos Campos, SP, Brasil
Latorre@ieav.cta.br

³Departamento de Geografia da Universidade de Brasília – Campus
Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

Abstract: In the last two decades a new phase of data acquisition has appeared. It is denominated Hyperspectral Remote Sensing or Espectrometry by Imaging. This is a new concept of sensor system, which has overcome the known multispectral sensor. While these is base on the use of some areas of the spectrum, the Hyperspectral instruments are capable of acquiring dozens of images from the same area and generating a spectrum practically continuous for each pixel of the scene. This innovation generated, as a consequence, the development of methods of atmospheric correction addressed to its products, once, great part of the spectral channels of these sensors are affected by atmospheric gases (Gao *et al.*,1993), masking the subtler and crucial spectral variations for target identification (Leprier, 1995). This new phase of acquisition of data was motivated by the limitations of some sensors in the market, like TM/LANDSAT, in mineral identification of targets, mainly because of their low spectral resolution. Thus, given the importance of this new phase of data acquisition nowadays, this work has the objective to give a general description of Hyperspectral Remote Sensing, emphasizing the model of atmospheric correction (Green's Method) addressed for spectrometry imaging.

Keywords: Hyperspectral Remote Sensing, atmospheric correction

1.Introdução

O Sensoriamento Remoto, definido como a aquisição de informações sobre um objeto sem contato físico, desenvolveu-se, marcadamente, após 1960; principalmente, com o avanço na utilização de novas aplicações, as quais têm sido fundamentais para o desenvolvimento de grande parte dos países.

Desta evolução, surgiu nas duas últimas décadas uma nova fase de aquisição de dados, denominada de Espectrometria por Imageamento ou Sensoriamento Remoto Hiperespectral.

Este é um novo tipo de conceito de sistemas sensores, os quais têm se destacado em relação aos chamados sensores convencionais (multiespectrais). Enquanto estes baseiam-se no uso de algumas regiões do espectro definidas, os hiperespectrais são instrumentos capazes de adquirir, simultaneamente, dezenas de imagens de uma mesma área e de produzir um espectro de reflectância, praticamente contínuo para cada *pixel* da cena (Lillesand, 1994). Esta nova

geração de dados foi motivada pelas limitações na identificação mineral de alvos por parte de sensores existentes no mercado, como o TM/LANDSAT.

Esta inovação, teve como consequência, o desenvolvimento, em conjunto, de métodos de correção atmosférica direcionados aos seus produtos, uma vez que, grande parte da faixa espectral destes sensores ser afetada por gases atmosféricos (Gao *et al.*, 1993), mascarando as variações espectrais mais sutis e cruciais para a identificação de um alvo (Leprier, 1995).

Assim, dada a importância desta nova fase de aquisição de dados, bem como dos diversos métodos de correção desenvolvidos, este trabalho tem como objetivo estabelecer uma abordagem geral sobre o Sensoriamento Remoto Hiperespectral, dando ênfase ao modelo de correção atmosférica, denominado método Green, direcionado à Espectrometria por Imageamento.

2.Sensoriamento Remoto Hiperespectral

O propósito desses sistemas é permitir a discriminação entre alvos da superfície terrestre que possuem determinadas características de absorção e reflexão em estreitos intervalos de comprimentos de onda, as quais não são registradas nas bandas espectrais com intervalos relativamente amplos de um sensor multiespectral convencional.

O seu conceito está ilustrado na **Figura 1**, que mostra uma representação esquemática da transição do Sensoriamento Remoto multiespectral para hiperespectral.

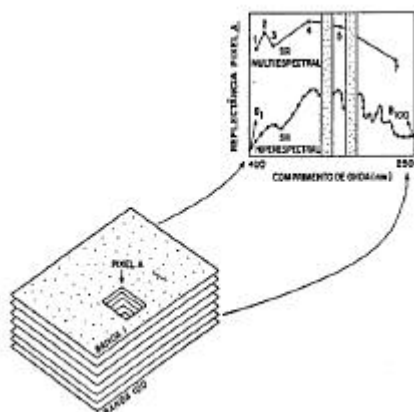


Fig. 1 – Representação esquemática do sensoriamento remoto Hiperespectral.
FONTE: Adaptado de Vane e Goetz (1988, p. 5).

Observa-se que, para uma mesma área, dezenas a centenas de imagens podem ser obtidas simultaneamente, o que possibilita a extração de um espectro de reflectância praticamente contínuo para cada *pixel* da cena. Nota-se que, o espectro obtido através do S.R. multiespectral (TM, por exemplo) não é capaz de reconstituir adequadamente as bandas de absorção mineral, limitando as possibilidades de identificação do material presente na superfície imageada.

Conforme indicado na **Figura 1**, no contexto hiperespectral, supondo a existência de um *pixel A*, os dados de reflectância aparente deste *pixel*, obtidos em cada um dos 100 canais, poderiam ser utilizados para reconstituir seu espectro de forma praticamente contínua. Já no contexto multiespectral, tomando como exemplo o sensor TM/Landsat 5, a amostragem deste mesmo *pixel* seria reconstituída com o uso de dados de reflectância de somente seis canais (TM1 a TM5, TM7), com larguras amplas variando de 60 nm (canal 3) até 270 nm (canal 7).

Portanto, o espectrômetro imageador pode produzir dados com resolução espectral suficiente para identificação direta dos materiais, ao passo que as bandas mais largas de sensores como o LANDSAT/TM e SPOT, não podem resolver essas diferenças espectrais diagnósticas. Assim, enquanto o sistema com bandas largas pode apenas discriminar diferenças genéricas entre os tipos de materiais, o espectrômetro imageador possibilita identificação do material, bem como a quantificação de sua abundância.

3 - Modelo de Correção Atmosférica Confeccionado à Espectrometria por Imageamento

Os modelos desenvolvidos para a espectrometria imageada buscam considerar a pronunciada variabilidade ao longo do tempo, espaço e altitude dos parâmetros atmosféricos. Desta forma, a correção baseia-se em um modelo distribuído (físicos), ou seja, com variações de *pixel* para *pixel*.

O conceito de absorção diferencial tem sido usado por vários autores, com objetivo de restaurar os efeitos da interferência atmosférica para imagens hiperespectrais, principalmente, para os valores de vapor d'água (Green, 1990, Barducci & Pippi, 1995). Essa nova concepção foi possível devido ao aumento da resolução espectral das imagens hiperespectrais que permite, por meio das feições de absorção dos gases, reconstituir sua quantidade e seu efeito. Dentre os diversos métodos correção atmosférica desenvolvidos para a espectrometria por imageamento, será abordado neste trabalho o método Green.

3.1 - O Método Green

Este método de correção atmosférica foi proposto por Green (1990), especificamente para as imagens hiperespectrais AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Spectrometer*). Suas principais características são descritas por diversos fatores:

- a) Calibração do Sensor;
- b) Calibração à bordo (ruído instrumental) (Green *et al.*, 1992b);
- c) Calibração em laboratório do sensor AVIRIS (Chrien *et al.* 1990);
- d) Calibração espectral; radiométrica; geométrica;
- e) Calibração em voo (Green *et al.*, 1988, 1992a); e
- f) Estimativa dos parâmetros atmosféricos e cálculo da reflectância aparente da superfície, usando o código de transferência radiativa em conjunto com um modelo de ajuste não linear por mínimos quadrados (Green *et al.*, 1991).

Esse algoritmo compensa, ainda, os seguintes efeitos: a absorção dos gases da atmosfera; o espalhamento molecular e aerossol; e o comportamento atmosférico latitudinal e sazonal. No entanto, o método Green não considera os efeitos topográficos, assumindo que a superfície é horizontal, com reflexão Lambertiana, onde uma aproximação da topografia é utilizada pelo emprego do valor médio da altitude.

3.1.1 - Estimativa dos Parâmetros Atmosféricos e a Conversão da Radiância em Reflectância Aparente da Superfície no Método Green

O sensor AVIRIS é calibrado em laboratório segundo suas características radiométricas, espectrométricas e geométricas antes e depois de cada sessão de voo. Deste modo, os dados de radiância total medidos pelo AVIRIS, previamente calibrados, são transformados para a reflectância aparente na superfície do terreno através de métodos de correção atmosférica.

Deste modo, o método Green estima os parâmetros atmosféricos e calcula a reflectância aparente da superfície usando o código de transferência radiativa MODTRAN3 em conjunto com um modelo de ajuste não linear por mínimos quadrados. Este método irá calcular para cada *pixel* da cena, o valor de vapor d'água, a espessura óptica da atmosfera e os aerossóis, a partir de suas respectivas feições de absorção.

Vapor D'água

A abundância de vapor d'água na atmosfera apresenta uma significativa variação espacial e temporal, onde a energia de transmitância do vapor d'água através do espectro é função de sua abundância (**Figura 2**).

O modelo para o cálculo do vapor d'água utiliza a radiância medida da banda 0,94 μ m, a qual é fortemente sensível à intensidade de vapor d'água na atmosfera. A abundância é obtida por intermédio de um ajuste não linear por mínimos quadrados entre a banda de vapor d'água obtida no AVIRIS e sua correspondente gerada pelo código MODTRAN3. Desta forma, o modelo realiza tanto a inversão dos dados de radiância para reflectância, como estima a abundância de vapor d'água para cada *pixel* (Green *et al.*, 1995).

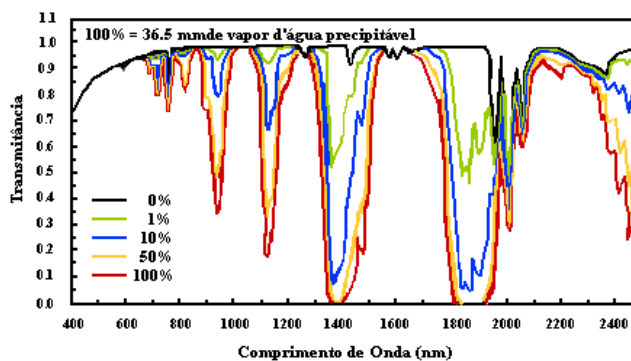


Fig.2 - Decréscimo da transmitância atmosférica em função do aumento do vapor d'água.

FONTE: Adaptada de Green e Conel (1995, p. 81).

Elevação da Pressão

Uma estimativa da superfície de elevação de pressão é requerida para compensar a absorção atmosférica devido à mistura de gases e do espalhamento atmosférico molecular. Essa estimativa pode ser obtida com o emprego da radiância medida pela banda de absorção de oxigênio em 0.76 μ m (Green *et al.*, 1993c). O modelo efetua um ajuste não linear entre a banda de oxigênio obtida no AVIRIS e a obtida pelo código MODTRAN3, determinando sua abundância.

Espessura Óptica do Aerossol

O espalhamento por aerossol pode ser estimado a partir da espessura óptica da atmosfera. A feição de absorção utilizada para a estimá-la localiza-se em 0,5 μ m (Green *et al.*, 1993c). Conforme os demais parâmetros, realiza-se um ajuste não linear entre a banda medida e a gerada pelo código MODTRAN3.

No presente algoritmo, parâmetros como a magnitude da reflectância e a inclinação da reflectância podem mudar de acordo com o ajuste obtido, variando de *pixel* para *pixel*.

Inversão da Radiância para Reflectância

O algoritmo para a inversão da radiância a partir da imagem captada pelo espectrômetro para a reflectância por meio de um código de transferência radiativa foi originalmente

desenvolvido para os dados do sensor AIS. Green *et al.* (1990) adaptaram esse algoritmo para os dados do sensor AVIRIS usando inicialmente o código de transferência radiativa LOWTRAN, e posteriormente o MODTRAN 3 (Green *et al.*, 1993). O uso do MODTRAN 3, em vez do LOWTRAN, fornece dados mais acurados para o modelo de absorção d'água (Carrere & Conel, 1991).

O algoritmo de inversão estabelece um ajuste de mínimos quadrados entre a radiância espectral medida no AVIRIS e a radiância espectral modelada através do código de transferência de radiância, permitindo a variação dos parâmetros *pixel a pixel*.

3.1.2 – Etapas do processamento

A correção atmosférica da imagem AVIRIS pelo Método Green é obtida pelo encadeado de quatro programas compilados em linguagem *FORTRAN*. Cada programa necessita tanto dos resultados gerados do programa anterior como de novos parâmetros (**Tabela 1**). Para cada etapa deve-se gerar um arquivo de entrada com todas as informações necessárias para a execução do programa. A especificação de cada arquivo de entrada pode ser verificada em Latorre (1998).

TABELA 1 - Seqüência Utilizada na Correção Atmosférica pelo Método Green

Rotina	Procedimentos efetuados
h2olut	Confecciona as tabelas de vapor d'água e aerossóis, efetuando cálculos de transmitância e radiância em arquivos chamados "tapes".
h2spl	Minimiza o resíduo entre a radiância modelada pelo método e a radiância observada pelo sensor. Nesta rotina o usuário define os valores de deslocamento (<i>shift</i>) e largura (<i>Full Width Half Maximum-FWHM</i>) a serem considerados nas bandas de vapor d'água existentes na faixa dos espectrômetros.
Vlsfit	Define a melhor largura e profundidade da banda de 0,94 μ a ser adotada. Gera uma imagem composta por 10 bandas, definida como imagem VLS (vapor, líquido e sólido).
Rfl	Inversão dos valores de radiância para reflectância

FONTE: Adaptada de Latorre (1998, p.150).

3.1.3 – Procedimentos para a Análise da Correção Atmosférica Realizada pelo Método Green

Para que se obtenha uma boa correção segundo o método Green, deve-se saber as condições atmosféricas durante o vôo. Desconhecendo esses valores deve-se realizar testes que possibilitem definir quais são os valores mais adequados a serem utilizados. Desta forma, realiza-se uma série de correções utilizando valores diferentes para os parâmetros de forma a compará-los. A eficiência da correção atmosférica pode ser avaliada por meio dos seguintes procedimentos (Latorre, 1998):

- a) Análise da imagem vapor d'água confeccionada na terceira etapa de processamento. Esta imagem deve apresentar um padrão homogêneo sem a existência de mudanças bruscas. Quanto maior o grau de homogeneidade melhor é a correção;

- b) Análise das bandas de absorção de vapor d'água em 0,94 μ m e 1,14 μ m. A melhor correção apresenta a menor profundidade para as bandas de vapor d'água em 0,94 μ m e 1,14 μ m; e
- c) Análise da superestimativa da influência atmosférica. Está intimamente relacionada com a visibilidade. Quando esse parâmetro é definido em proporções menores do que a realidade, ocorre uma superestimativa da influência atmosférica no modelo.

A eficiência para a definição da melhor correção aumenta com o emprego conjunto dos três procedimentos sugeridos.

Entre os parâmetros que devem sofrer uma análise mais detalhada ressalta-se a visibilidade e o deslocamento espectral (*shift*). Assim esses parâmetros, devido as suas dificuldades de ajustes, devem ser testados dentro de um intervalo de valores até a detecção de um valor ideal a ser adotado.

A visibilidade é inicialmente testada utilizando-se o padrão estipulado pelo modelo de aerossol pertinente a região em estudo. Para testar se esses valores são ideais, deve-se variar a visibilidade com valores acima e baixo em torno de 20km observando a ocorrência de um melhor ajuste.

Os valores de deslocamento possuem como padrão inicial o valor zero. A partir disso deve-se variá-los em intervalos de 0,1nm. Então efetua-se a comparação entre os espectros para definir o melhor valor para a correção atmosférica. A identificação de deslocamento ideal permite estabelecer uma menor diferença entre os valores da radiação modelada código de transferência e a obtida pelo sensor AVIRIS, possibilitando um ajuste mais eficiente do método Green.

3.1.4 - Vantagens e Desvantagens do Método Green

Pode-se destacar como principais vantagens do Método Green (Rotina de Green):

- Os erros do MODTRAN são suprimidos, devido à calibração de vôo ser realizada sistematicamente;
- Depois da calibração, esse método não requer de nenhuma medição *in situ* para os dados AVIRIS adquiridos; e
- O método Green compensa *pixel a pixel* os níveis de Oxigênio, Dióxido de Carbono e Água.

Desvantagens:

- O método requer um longo tempo computacional para a realização das quatro etapas de processamento, ficando extremamente limitada à necessidade de uma grande área em disco para a perfeita utilização e análise do método;
- Não corrige de maneira precisa ambientes saturados por aerossóis;
- O método tem uma tendência a superestimar a correção nas faixas iniciais do azul (corrige-as para zero); podendo desta forma, dificultar as análises de dados relativas à esta faixa espectral.

Segue abaixo um exemplo de correção atmosférica realizada pelo método Green, utilizando uma imagem AVIRIS da região de Cuiabá.

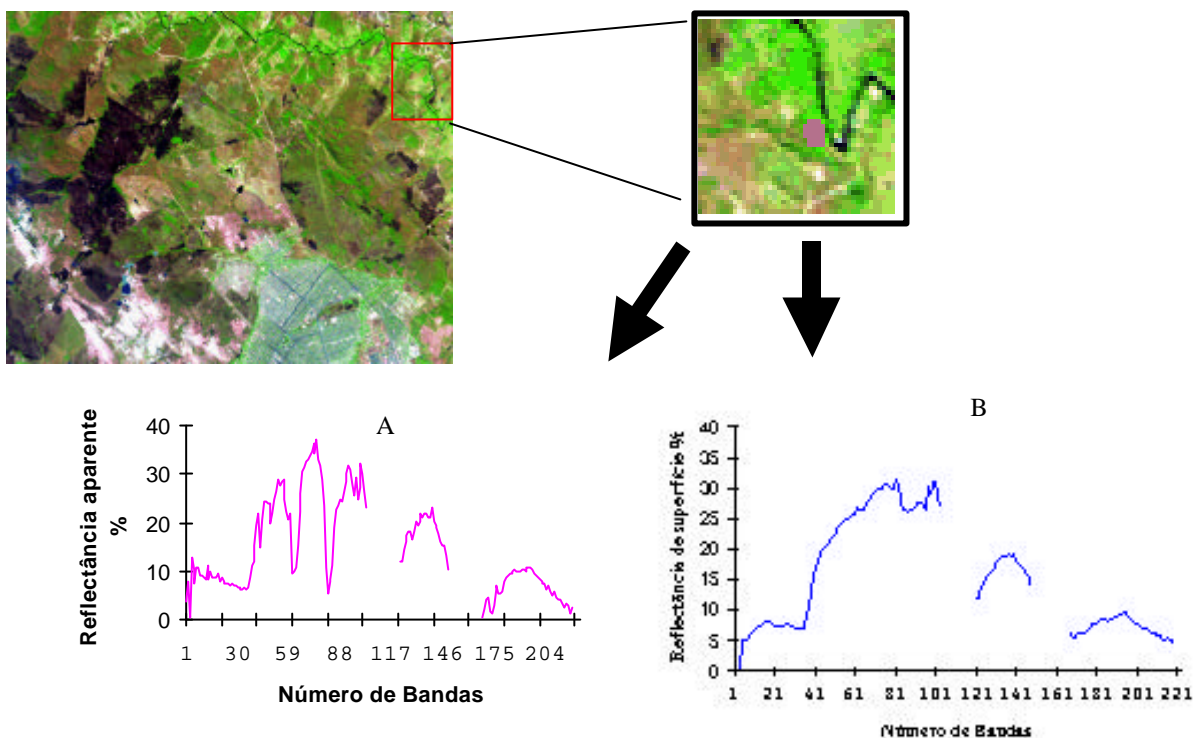


Fig.3 - Imagem AVIRIS da região de Cuiabá, composição colorida, canais 137 (1,650 μ m), 50 (0,830 μ m) e 29 (0,660 μ m) exibidos, respectivamente, em vermelho, verde e azul. A) O espectro de reflectância aparente (não corrigido para os efeitos atmosféricos) de uma amostra de vegetação ciliar. B) Espectro de reflectância de superfície (corrigido para os efeitos atmosféricos) da mesma amostra de vegetação ciliar, indicada em magenta na área de destaque.

4 – Referência Bibliográfica

- Barducci, A. & Pippi, I., , Retrieval of Atmospheric Parameters from Hyperspectral Image Data, **IEEE**, p.138-140, 1995.
- Carrere, V. & Conel, P. Recovery of Atmospheric Water Vapor Total Column Abundance from Imaging Spectrometer Data Around 940nm Sensitivity analysis and Application to Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data, **Remote Sensing of Environment**, n.44, p.179-204, 1993.
- Chrien, T. G.; Green, R. O. & Eastwood, M., 1990, Laboratory spectral and radiometric calibration of the Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), **SPIE** v. 1298, Imaging Spectroscopy of the terrestrial environment.
- Gao, B.G.; Goetz A. F. H. & Zamudio, J. A., 1993, Removing Atmospheric effects from AVIRIS Data for Reflectance Retrievals, **In: Proceeding of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop**, JPL Public 93-26. pp. 80-86.
- Green, R. O.; Vane, G. & Conel, J. E., 1988, Determination of aspects of the in-flight spectral, radiometric, spatial and signal to noise performance of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer over Mountain Pass, Ca., **In: Proceeding of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop**, JPL Pub. 88-38, p. 162-184.

- Green, R. O., 1990, Retrieval of Reflectance from Calibrated Radiance Imagery Measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) for Lithological Mapping
- Green, R. O.; Conel, J. E.; Margolis, J. S.; Bruegge, J. & Hoover, G. L., 1991, An inversion algorithm for retrieval at atmospheric and leaf water absorption from AVIRIS radiance with compensation for atmospheric scattering, **In:** Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication 91-28, p. 51-61.
- Green, R. O, Conel, J. E., Bruegge, C. J., Margolis, J. S., Carrere, V., Vane, G., Hoover, G., 1992a, **In-Flight Calibration of the Spectral and Radiometric Characteristics of AVIRIS in 1991**, In: Proc Third Annual Airborne GeoScience Workshop, JPL Public 92-14, p. 1-4.
- Green, R. O., Larson S., Novack, I., 1992b, Calibration of AVIRIS digitized data. **In:** Proceedings. Third Annual Airborne GeoScience Workshop, JPL Public 92-14, p.109-118.
- Green, R. O., Conel J. E. & Roberts, D. A., 1993c, Estimation of Aerosol Optical Depth, and Additional Atmospheric Parameters for the Calculation of Apparent Reflectance from Radiance Measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. **In:** Proceedings Fourth Annual Airborne GeoScience Workshop, JPL Public 93-26, p.83-86.
- Green, R. O. & Conel, J. E., 1995, Movement of Water Vapor in The Atmosphere Measured by an Imaging Spectrometer at Roger Dry Lake, CA. **In:** Proceedings Fifth Annual Airborne GeoScience Workshop, JPL Public 95-1 p. 79-82.
- Green, R. O., Conel, J. E. & Roberts, D. A., 1995, Measurement of Atmospheric Water Vapor, Leaf, Liquid Water and Reflectance with AVIRIS in the Boreal Exosystem – Atmosphere Study: Initial Results. **In:** Proceedings Fifth Annual Airborne GeoScience Workshop, JPL Public 95-1 p.87-90.
- Latorre, M. F. **Utilização de um método de correção atmosférica para o processamento de dados hiperespectrais do sensor AVIRIS em regiões tropicais.** Tese de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos,1998.
- Leprieur C., Carrere, V., & Gu, X. F. Atmospheric Corrections and Ground Reflectance Recovery for Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data: MAC Europe'91. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.61, n.10, p.1233-1238, 1995.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.M. **Remote sensing and image interpretation.** New York: J. Willey, 1994, 612 p.
- Wallace, M.P.; Enmark, H.T. A system overview of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) In: Airborne Earth Science Data Analysis Workshop, held at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1987. **Summaries.** Washington, D.C. NASA/JPL, 1987. V.1 AVIRIS Workshop. (JPL Publication 87-38).
- Vane, G., Goetz, A.F.H. Terrestrial Imaging Spectrometry: **Remote Sensing of Environment**, v.24, n.1, p.1-29, 1988.