

# Reflectância de Coberturas Vegetais na Amazônia

Jorge L. G. Pereira<sup>1</sup>  
Getulio T. Batista<sup>1</sup>  
Dar Roberts<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Divisão de Sensoriamento Remoto  
Caixa Postal 515, 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil  
gavina@ltid.inpe.br      getulio@ltid.inpe.br

<sup>2</sup>UCSB - University of California  
Department of Geography, EH3611  
Santa Barbara, CA, 93106, USA  
dar@pollux.geog.ucsb.edu

**Abstract.** Multitemporal acquisitions of satellite data have been largely used for monitoring land use and cover dynamics in the tropics. Most of the studies have used directly the original digital numbers recorded on the images without converting them into reflectance or making corrections due to atmosphere attenuation. Even though the digital numbers are related to radiance, they do not account for sensor performance and variability in attitude. Reflectance is a physical property of the land cover types. This paper describes and compares two methods for estimation of the reflectance (one using pre-launching calibration coefficients and the other using spectra of reference endmembers) with the original image digital numbers and the reflectance of a reference canopy obtained in controlled conditions in the field. The method using reference endmembers provided the best result for the estimation of the reflectance for all cover types of interest in the studied region in eastern Amazônia: undisturbed forest, secondary growth forest, and pasture. This method calibrates the image eliminating the atmosphere attenuation but requires however, strong analyst skill and extensive processing time.

**Keywords:** Reflectance, Amazonia.

## Introdução

A vegetação exerce um papel importante nos ciclos hidrológico e biogeoquímico do sistema terrestre. Em especial, as florestas tropicais têm um papel fundamental no ciclo do carbono e em consequência nos processos de Mudanças Globais. O sensoriamento remoto a nível orbital é essencial para mapear e monitorar a dinâmica das florestas tropicais e fornecer informações para uma maior compreensão do funcionamento deste ecossistema.

O sinal registrado por um sensor é dependente das características espectrais da superfície observada. Em se tratando de dosséis florestais, suas propriedades óticas dependem, sobretudo das folhas. A reflectância espectral de uma folha apresenta, em geral, as seguintes características: baixa (~ 10%) na faixa do visível (0,4 - 0,7  $\mu\text{m}$ ), relacionada à absorção pelos pigmentos (clorofila); elevada (50%) no infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ), relacionada à estrutura celular interna das folhas; e diminui progressivamente a partir de 1,3  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio) até apresentar valores muito baixos próximos a 2,7  $\mu\text{m}$ , sendo grande a influência da concentração de água nos tecidos (Knippling, 1970; Kumar, 1972).

A reflectância de um dossel, numa base percentual, é consideravelmente menor que a de uma folha individual, embora os formatos das curvas sejam semelhantes. Esta redução é devida à atenuação da radiação associada a fatores como: variações no ângulo de incidência da radiação, orientação das folhas, resposta de outros elementos do dossel (*e.g.*, troncos e galhos), sombras, e superfícies de fundo como o solo (Knippling, 1970; Guyot et al., 1989).

Os valores digitais brutos (número digital - DN) das imagens Landsat TM são comumente utilizados para classificar estatisticamente tipos de cobertura, criar mosaicos digitais de várias imagens e detectar mudanças em imagens sucessivas de uma mesma área. No entanto, os números digitais, embora relacionados, não representam quantitativamente valores físicos reais (*e.g.* reflectância, radiância), e são usados apenas por conveniência no processamento dos dados. Os níveis digitais são relacionados por um modelo linear (calibração) à intensidade da energia radiante refletida; contudo, não são diretamente comparáveis entre satélites diferentes (*e.g.* Landsat 4 e Landsat 5) devido às diferenças na calibração dos sensores. Além disso, a comparação ou combinação de imagens tomadas em

datas diferentes requer correção para os diferentes ângulos de iluminação solar em que as imagens foram obtidas (Robinove, 1982). Os valores físicos comumente derivados dos números digitais são: radiância ( $\text{mW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ); e reflectância (adimensional). A utilização de valores físicos, sobretudo da reflectância, possibilita um melhor monitoramento do comportamento de uma determinada cobertura, uma vez que mudanças na sua resposta espectral estariam relacionadas somente às mudanças nas propriedades estruturais/espectrais da cobertura e não às mudanças no ângulo de iluminação solar ou variações dos sensores (degradação).

O objetivo deste trabalho é comparar a resposta espectral de coberturas vegetais da Região de Marabá, PA - floresta, capoeira, pasto verde e pasto seco - caracterizadas por três tipos de imagens Landsat TM - imagem bruta (DN); imagem reflectância segundo Markham e Barker, 1987 (M&B); e imagem reflectância, segundo Roberts, 1991 (ROB), com a reflectância espectral de um dossel de *Quercus kelloggii* (Kelloggs Oak - decídua) obtido em campo.

### Área de Estudo

A área abrangida por este estudo localiza-se ao sul da cidade de Marabá, centro-leste do estado do Pará. Localizada entre  $48^{\circ}53'19''$  -  $49^{\circ}16'26''$  W; e  $5^{\circ}33'18''$  -  $6^{\circ}05'07''$  S. A região apresenta um relevo plano a levemente ondulado. O clima é tropical úmido (domínio climático **AWI**, segundo a classificação de Köppen), apresentando as seguintes características: temperatura média entre  $25,6$  e  $27,1^{\circ}\text{C}$ ; umidade relativa alta (variando de  $71$  a  $88\%$ ); precipitação anual em torno de  $1950$  mm (sendo os meses mais chuvosos fevereiro e março, e os mais secos julho, agosto e setembro). A precipitação média do mês mais seco é inferior a  $60$  mm (IDESP, 1977). Esta área é coberta pela imagem órbita/ponto 223/64 do sensor TM do satélite Landsat 5.

### Metodologia

A metodologia empregada pode ser dividida em três etapas: 1) geração das imagens reflectância segundo Markham e Barker (1987) e Roberts (1991); 2) obtenção e manipulação de valores espectrais de amostras das coberturas vegetais de interesse (floresta, capoeira, pasto verde e pasto seco) em todas as seis bandas das imagens bruta e de reflectância; e 3) comparação da resposta espectral das classes de cobertura vegetal com a reflectância espectral de um dossel de *Quercus kelloggii*, integrada para as bandas do sensor Landsat TM (tabela 1).

Tabela 1 - Bandas espectrais do sensor Landsat TM

Bandas	Faixa espectral ( $\mu\text{m}$ )	Centro da faixa (nm)
TM1	0,45 - 0,52	485
TM2	0,52 - 0,60	560
TM3	0,63 - 0,69	660
TM4	0,76 - 0,90	830
TM5	1,55 - 1,75	1650
TM7	2,08 - 2,35	2215

Neste trabalho foi utilizada a imagem de 20 de julho de 1993, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

A conversão dos dados digitais para radiância e reflectância, segundo Markham e Barker (1987), é obtida, respectivamente por:

$$L_{\lambda} = L_{\min\lambda} + \left( \frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{QCAL_{\max\lambda}} \right) QCAL \quad (1)$$

onde:

$L_{\lambda}$  = radiância espectral;

$L_{\min\lambda}$  = radiância espectral equivalente ao nível digital mínimo;

$L_{\max\lambda}$  = radiância espectral equivalente ao nível digital máximo;

$QCAL_{\max\lambda}$  = amplitude de variação dos níveis digitais; e

$QCAL$  = nível digital.

$$\rho_p = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{E_{\text{sol}\lambda} \cos\theta_s} \quad (2)$$

onde:

$\rho_p$  = reflectância aparente;

$L_{\lambda}$  = radiância espectral ( $\text{mW cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ );

$d$  = distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$E_{\text{sol}\lambda}$  = irradiância espectral média no topo da atmosfera ( $\text{mW cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ); e

$\theta_s$  = ângulo zenital solar, em graus.

Com a aplicação das equações 1 e 2, obtêm-se novas bandas com valores de reflectância aparente dos alvos, e não de reflectância real, pois em seu cálculo não são considerados os efeitos atmosféricos.

Na conversão dos valores digitais brutos dos pixels da imagem para reflectância aparente foram utilizados valores de  $L_{\lambda}$  obtidos na equação 1, com base nos valores (pré-lançamento) tabelados de  $L_{\min\lambda}$  e  $L_{\max\lambda}$  (Markham e Barker, 1987) e valores de  $\theta_s$  e  $d$  calculados a partir de dados extraídos do cabeçalho das imagens (data, latitude, longitude, etc.).

Roberts (1991) propõe a conversão de dados brutos de imagens Landsat TM para reflectância utilizando como referência espectros de elementos "puros" da superfície (e.g. diferentes tipos de folhas, dosséis, solos, rochas, etc.), medidos no laboratório ou no campo que não sofrem portanto, a interferência da

atmosfera. Os dados de radiância são calibrados para reflectância pela aplicação de uma equação linear relacionando a reflectância à radiância. O intercepto desta equação corresponde ao espalhamento atmosférico que é maior nos comprimentos de ondas curtas e também ao nível de ruído do instrumento que por sua vez é também função do comprimento de onda; e o termo inclinação reflete a variabilidade na sensibilidade instrumental, na transmitância atmosférica e no fluxo solar incidente.

O procedimento proposto por Roberts (1991), pode ser dividido em quatro etapas:

**1) Regressão linear.** Define-se alguns componentes “puros” na imagem, que são tratados como se fossem “totalmente puros”. Em seguida, é examinado um conjunto de espectros de reflectância obtidos previamente no laboratório ou em condições controladas de campo referentes a elementos puros (solo, vegetação, vegetação não-fotossinteticamente ativa, e sombra) e verifica-se a correspondência destes com os espectros “puros” da imagem. Realiza-se uma série de regressões entre os componentes puros da imagem e os seus correspondentes espectros de reflectância, a fim de determinar as combinações que melhor se ajustam. A regressão entre cada combinação de componentes puros da imagem e componentes puros de referência é testada com base no coeficiente de determinação médio ( $r^2$ ) (figura 1).

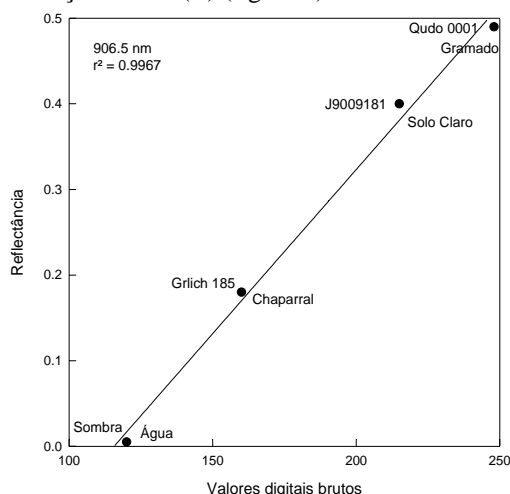


Figura 1 - Linha representando o melhor ajuste por mínimos quadrados entre reflectância de laboratório e radiância da imagem (valores digitais brutos) (Roberts, 1991).

**2) Avaliação espectral da regressão.** Para as combinações que resultaram em valores de  $r^2$  acima de um limiar pré-definido, os valores da inclinação e intercepto destas equações de regressão são examinados. Os componentes puros da imagem são calibrados para uma reflectância inicial,  $\rho_\lambda$ ,

multiplicando-se a radiância bruta da imagem,  $DN_\lambda$  por uma inclinação,  $inc_\lambda$ , e subtraindo-se um intercepto,  $int_\lambda$  (equação 3).

$$\rho_\lambda = DN_\lambda * inc_\lambda - int_\lambda \quad (3)$$

Os componentes puros da imagem são então subtraídos dos seus correspondentes do conjunto de espectros de reflectância de referência. Combinações de baixos valores de  $r^2$  ou diferenças grandes entre os componentes puros da imagem inicialmente calibrados e os componentes puros do conjunto de espectros de reflectância de referência indicam uma calibração ruim que, portanto, são interativamente descartadas.

**3) Seleção e avaliação dos componentes puros de referência.** Devido a heterogeneidade dos elementos “puros” da imagem, nesta etapa, a suposição de pureza é abandonada. Este procedimento visa identificar aqueles espectros do conjunto de referência que, quando modelados como misturas, correspondem aos espectros da cena em estudo. Cada membro do conjunto de espectros de referência selecionado é modelado como uma mistura dos componentes puros da imagem inicialmente calibrados. Um bom candidato a espectro de referência deve ter frações  $\geq 100\%$  para um determinado componente puro da imagem, e frações baixas ou negativas para os outros.

**4) Análise de regressão das misturas.** Os elementos “puros” da imagem inicialmente calibrados são modelados como frações dos espectros de referência, selecionados na 3ª etapa (figura 2). A raiz quadrada do erro médio (RMS) para todas as bandas é gerada para cada combinação, e se o valor obtido estiver acima de um limiar específico, um novo conjunto de componentes puros de referência, correspondendo a misturas lineares dos componentes puros de referência originais, é calculado. O processo de modificação, calibração, análise de mistura e cálculo da RMS continua até que seu valor seja menor que o limiar de aceitação. A RMS é dada por:

$$RMS = \sum_{j=1}^m \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_{ij} - \rho'_{ij})^2}{n}} \right) / m \quad (4)$$

onde  $\rho_{ij}$  é a reflectância calibrada e  $\rho'_{ij}$  é o modelo de reflectância na banda  $i$  de  $m$  bandas, para o componente puro  $j$  de  $n$  componentes puros.

Para a conversão do valor digital bruto da imagem de 1993 para reflectância foi utilizada a seguinte relação linear (Roberts, 1991):

$$\rho_{93,i} = inc_{93,i} * DN_{93,i} + int_{93,i} \quad (5)$$

onde:

$DN_{93,i}$  = valor digital bruto, na banda  $i$ ;

$inc_{93,i}$  = inclinação, para a banda  $i$ ;

$\text{int}_{93,i}$  = intercepto, para banda  $i$ ;  
 $93$  = imagem de 1993;  $i$  = bandas do TM.

Os valores de inclinação e intercepto utilizados encontram-se na tabela 2.

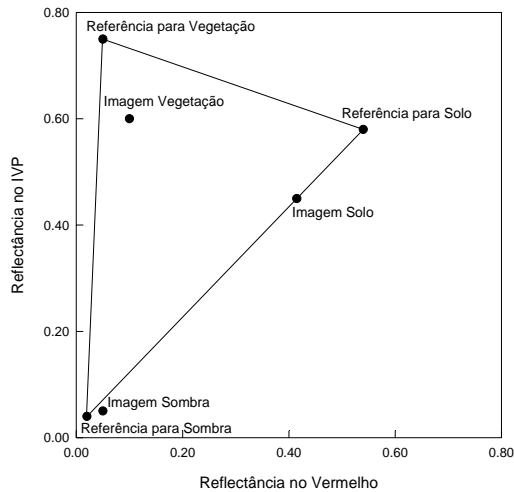


Figura 2 - Relação entre reflectância no infravermelho próximo (IVP) e reflectância no vermelho dos espectros de referência candidatos dos componentes vegetação, solo e sombra. Todos os pontos dentro do triângulo poderiam ser definidos como misturas destes três espectros de referência. Os componentes puros da imagem inicialmente calibrados são rotulados como Imagem Vegetação, Imagem Solo e Imagem Sombra (Roberts, 1991).

Tabela 2 - Valores de intercepto e inclinação utilizados na geração das imagens reflectância segundo Roberts (1991).

BANDA	INCLINAÇÃO	INTERCEPTO
1	3.480943e-03	-1.456680e-01
2	6.695876e-03	-9.022216e-02
3	6.189375e-03	-6.461913e-02
4	4.493055e-03	-9.696059e-03
5	3.287279e-03	-1.713069e-02
7	8.063425e-03	-4.304716e-03

A reflectância gerada (0 - 1) foi posteriormente transformada em percentagem (0 - 100).

As médias das classes analisadas foram obtidas a partir de amostras com área mínima de 30 pixels da imagem, para as 6 bandas dos três tipos de imagens (bruta, reflectância-M&B, e reflectância-ROB). Foram tomadas 14 amostras para cada classe de cobertura de interesse.

A reflectância espectral, integrada para as bandas do Landsat TM, de um dossel de *Quercus kelloggii*, foi utilizada como referência para a análise comparativa entre os dois métodos de estimativa de reflectância (M&B e ROB) e a imagem bruta.

## Resultados

As respostas espectrais das classes estudadas - floresta, capoeira, pasto verde e pasto seco - para imagens brutas, imagens reflectância segundo Markham e Barker (1987) e imagens reflectância segundo Roberts (1991), podem ser observadas nas figuras 3, 4 e 5.

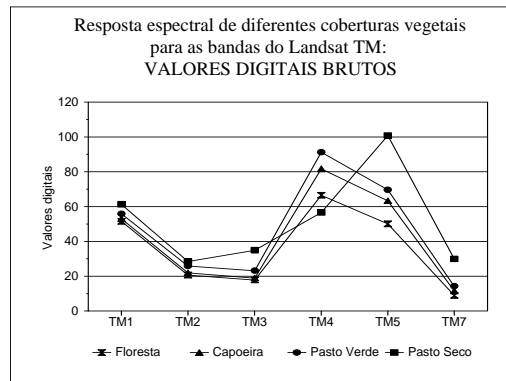


Figura 3 - Resposta espectral das classes de interesse nas imagens com valores digitais brutos.

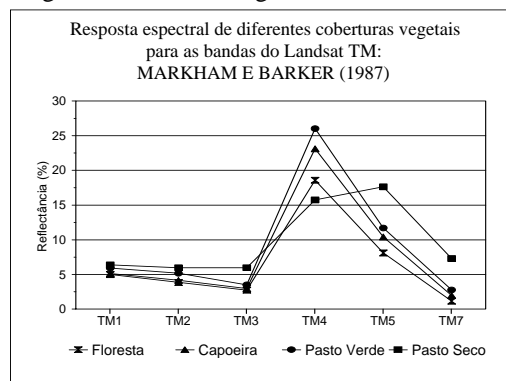


Figura 4 - Resposta espectral das classes de interesse nas imagens reflectância segundo Markham e Barker (1987).

De uma forma geral, observa-se para os três conjuntos de imagens (figuras 3, 4 e 5) um comportamento espectral típico de coberturas vegetais, com respostas baixas no visível (TM1, TM2 e TM3), aumentando no infravermelho próximo (TM4) e tornando a diminuir nas bandas do infravermelho médio (TM5 e TM7). No entanto, são observadas algumas respostas que diferem do padrão clássico de resposta da vegetação, sendo elas: resposta mais elevada na banda TM1 (faixa espectral do azul) do que na TM2 (faixa espectral do verde) para as imagens bruta e reflectância segundo Markham e Barker (1987); resposta mais elevada da classe pasto seco na banda TM5 (infravermelho médio) do que na TM4 (infravermelho próximo) nos três tipos de imagens.

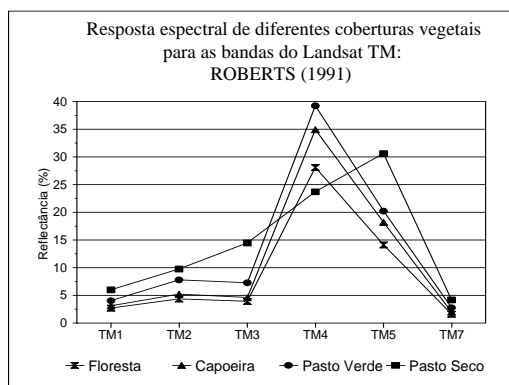


Figura 5 - Resposta espectral das classes de interesse nas imagens reflectância segundo Roberts (1991).

A resposta mais elevada da classe pasto seco na banda TM5 está associada a uma abundância de material não fotossinteticamente ativo, que possui uma resposta elevada nesta faixa espectral e a uma menor cobertura do solo. Os valores espectrais elevados da banda TM1 para as imagens bruta e reflectância segundo Markham e Barker (1987) são devidos ao espalhamento atmosférico, que é mais elevado para os menores comprimentos de onda, uma vez que essas duas imagens não sofreram nenhum processo de minimização dos efeitos atmosféricos. Tal comportamento não é observado na banda TM1 da imagem reflectância segundo Roberts (1991), já que imagens reflectância geradas a partir da integração de valores das imagens com espectros de laboratório/campo minimizam os efeitos atmosféricos.

Foi observado ainda, para os três tipos de imagens, uma maior resposta na banda TM4 do pasto verde, seguida respectivamente das respostas da capoeira, floresta e pasto seco. A resposta mais elevada do pasto verde nesta banda espectral relaciona-se mais ao menor sombreamento do dossel do que a sua fitomassa, da mesma forma que a menor resposta nesta faixa espectral da floresta deve-se a um maior sombreamento do dossel. Este fato fora também observado por outros pesquisadores (Moran et al., 1993; Mausel et al., 1994).

Utilizando-se a reflectância espectral de um dossel de *Quercus kelloggii*, integrada para as bandas do Landsat TM (figura 6), como referência para a reflectância da vegetação, verificou-se sempre uma melhor relação (maior coeficiente de determinação -  $r^2$ ) entre a assinatura deste dossel e a assinatura das classes floresta, capoeira e pasto verde das imagens reflectância segundo Roberts (1991), do que com as imagens bruta e reflectância segundo Markham e Barker (1987), como pode ser observado na tabela 3. Embora se saiba que há uma grande variedade na resposta espectral de folhas/dosséis de espécies vegetais distintas, e que há outros elementos do dossel que colaboram na resposta

do mesmo, observa-se, a partir dos resultados obtidos, que as imagens reflectância segundo Roberts (1991) representam melhor as características espectrais das classes de cobertura vegetal.

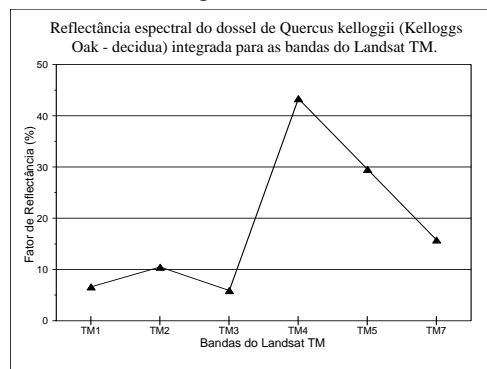


Figura 6 - Reflectância espectral do dossel de *Quercus kelloggii*.

Tabela 3 - Valores do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) obtidos através de uma regressão linear entre a reflectância espectral do dossel de *Quercus kelloggii* (QUKE0001) e resposta das classes de cobertura analisadas para os três tipos de imagens.

EIXOS DA REGRESSÃO	$r^2$
QUKE0001 X DN-FLORESTA	0,45
QUKE0001 X M&B-FLORESTA	0,79
<b>QUKE0001 X ROB-FLORESTA</b>	<b>0,96</b>
QUKE0001 X DN-CAPOEIRA	0,59
QUKE0001 X M&B-CAPOEIRA	0,84
<b>QUKE0001 X ROB-CAPOEIRA</b>	<b>0,90</b>
QUKE0001 X DN-PASTO VERDE	0,63
QUKE0001 X M&B-PASTO VERDE	0,85
<b>QUKE0001 X ROB-PASTO VERDE</b>	<b>0,88</b>

DN - imagem bruta.

M&B - reflectância segundo Markham e Barker (1987).

ROB - reflectância segundo Roberts (1991).

### Conclusões

Dos três tipos de imagens analisados neste estudo observou-se que a imagem reflectância segundo Roberts representa melhor fisicamente as coberturas vegetais estudadas uma vez que apresentou uma melhor relação com a reflectância do dossel de *Quercus kelloggii*, além de apresentar uma minimização dos efeitos atmosféricos. No entanto, a geração das imagens reflectância pelo método proposto por Roberts (1991) apresenta como desvantagem a necessidade de um processamento mais demorado e uma maior intervenção qualificada do analista.

### Referências

Guyot, G.; Guyon, D.; Riom, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, 4(3):3-18, sep., 1989.

Instituto de Desenvolvimento Econômico-Social do Pará (IDESP). **Diagnóstico do Município de Marabá**. Belém, IDESP, 1977. (Relatórios de Pesquisa, 5).

Knipling, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 1(3):155-159, 1970.

Kumar, R. **Radiation from plants: reflection and emission, a review**. Lafayette, Indiana, Purdue University, 1972. (Research Project n°. 5543).

Markham, B.L.; Barker, J.L. Radiometric Properties of U.S. processes Landsat MSS data. **Remote Sensing of Environment**, 22(?):39-71, 1987.

Mausel, P.; Wu, Y.; Li, Y.; Moran, E.F.; Brondizio, E. Spectral identification of successional stages following deforestation in the Amazon. **Geocarto International**, 8(4):61-71, 1993.

Moran, E.F.; Brondizio, E.; Mausel, P.; Li, H.Y. Assinaturas espectrais diferenciando etapas de sucessão secundária no Leste Amazônico. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1993, v. 2, p. 202-209.

Roberts, D.A. **Separating spectral mixtures of vegetation and soils**. (Ph.D. Thesis in Geological Sciences) - University of Washington, Seattle, 1991.

Robinove, C.J. Computation with physical values from Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 48(5):781-784, may, 1982.