

Estudo das relações entre tipos de solos, alteração, mineralogia e topografia por sensoriamento remoto hiperespectral

Lênio Soares Galvão¹
Antônio Roberto Formaggio¹
Eduardo Guimarães Couto²
Dar A. Roberts³

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 515, 12245-970 - São José dos Campos (SP).
{lenio, formag}@dsr.inpe.br

² Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Av. Fernando Correa, s/n, Boa Esperança, 78060-900, Cuiabá (MT).
couto@ufmt.br

³ University of California, Geography Department, Santa Barbara, CA, 93106-4060, USA.
dar@geog.ucsb.edu

Abstract. Principal components, band depth analysis and the Spectral Feature Fitting (SFF) technique were applied over hyperspectral data collected by the Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) in the vicinity of Campo Verde (MT) to characterize major variations in reflectance of different soil types; changes in the depth of major absorption bands due to kaolinite (2210 nm) and gibbsite (2260 nm); and the occurrence of these minerals in the scene, respectively. Laboratory-derived regression relationships between the silica/aluminum ratio and the absorption band depth values at 2210 nm (kaolinite) and 2260 nm (gibbsite) were used to estimate the Ki index ($1.7\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) in AVIRIS spectra as an indicator of the degree of soil weathering. Results were analyzed as a function of the topography obtained from an Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)-derived digital elevation model. Results showed that low reflectance soils predominated at higher elevations and high reflectance soils at lower elevations. The Ki results calculated on a per-pixel basis showed good correspondence with SFF mineral identification of kaolinite and gibbsite. Identification of these minerals and of the Ki index can be performed only with hyperspectral data

Palavras-chave: sensoriamento remoto hiperespectral, solos tropicais, AVIRIS, toposequência, análise por componentes principais, topografia.

1. Introdução

A gênese de solos tropicais está normalmente associada a um processo de intemperismo intenso que produz remoção de sílica e acúmulo de alumínio (Moniz et al., 1982; Curi e Franzmeier, 1984; 1987; Madeira et al., 1997; Macedo e Bryant, 1987; Baptista et al., 1998). A mineralogia destes solos é normalmente composta por minerais como quartzo, goetita, hematita, caulinita, gibbsita e opacos (p.ex., ilmenita e magnetita). Com exceção do quartzo e dos opacos, os outros minerais exibem bandas de absorção bem definidas no visível e infravermelho próximo (Visible/Near Infrared – VNIR) (goetita e hematita) e no infravermelho de ondas curtas (Shortwave Infrared – SWIR) (caulinita e gibbsita) que podem ser detectadas por sensores hiperespectrais.

Apesar do potencial do sensoriamento remoto hiperespectral para medir estas feições espectrais pixel-a-pixel, apenas um pequeno número de trabalhos tem abordado o uso destes dados em estudos de solos (Baptista et al. (1998), Palacios-Orueta e Ustin (1998), Ben-Dor et al. (2002), Galvão et al. (2001), Pizarro et al. (2001), Chabrilat et al. (2002) e Dehaan e Taylor (2004)). Sensoriamento remoto hiperespectral pode fornecer informações importantes

sobre a composição dos solos que pode ser relacionada com dados topográficos para facilitar o mapeamento dos solos.

O objetivo deste trabalho é utilizar imagens hiperespectrais coletadas pelo sensor Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) no município de Campo Verde (MT) e dados de laboratório obtidos pelo espectrômetro FieldSpec para caracterizar as relações entre tipos de solos, mineralogia, grau de alteração dos solos e topografia.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo (22 x 11 km) está localizada no município de Campo Verde (MT) entre as seguintes coordenadas: S15°30'20"/W55°17'21" (canto esquerdo superior), S15°35'54"/W55°17'18" (canto esquerdo inferior), S15°30'22"/W55°6'0" (canto direito superior), e S15°35'52"/W55°5'56" (canto direito inferior). De acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 1999), os principais tipos de solos da área de estudo são: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, LATOSSOLO AMARELO Distrófico, NEOSSOLO QUARTZARÊNICO e PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário.

O sensor hiperespectral AVIRIS coletou dados em 7 de Setembro de 1995, durante a estação seca, em 224 bandas posicionadas entre 350 e 2500 nm (10 nm de largura) (Green et al., 1998). Os dados foram adquiridos com uma aeronave ER-2 de uma altitude de 20 km, o que resultou em um Ground Instantaneous Field of View (GIFOV) de 20 m. Os dados de radiância foram convertidos para reflectância de superfície pelo algoritmo Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH), que tem como base o código MODTRAN4. Um modelo tropical/rural foi adotado com visibilidade de 60 km. As bandas posicionadas ao redor da faixa de absorção de vapor de água em 1130 nm foram utilizadas para fins de estimativa de vapor de água pixel-a-pixel.

O sensor FieldSpec (Analytical Spectral Devices – ASD) obteve dados de reflectância em laboratório sobre 86 amostras de solo da área de estudo coletadas nos horizontes A (0-20 cm; 43 amostras) e B (40-60 cm; 43 amostras). O instrumento fez medições entre 350 e 2500 nm com um intervalo de amostragem de 0,7 nm no VNIR e de 2 nm no SWIR. Uma placa de spectralon (Labsphere, NH) foi utilizada como referência. O sensor adquiriu dados ao nadir com uma distância de 30 cm das amostras. Uma lâmpada de tungstênio com 15° de ângulo zenital e 1 m de altura foi utilizada como fonte de iluminação.

Parte das amostras (50) foi enviada para laboratório (Agroanálise, Cuiabá, MT) para análises físico-químicas e mineralógicas. Além da percentagem de areia total, silte e argila, foram determinados ainda os conteúdos de matéria orgânica; SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, MnO e P₂O₅; Ca²⁺ e Mg²⁺; Al³⁺ e K₂O. Os métodos utilizados foram os de Camargo et al. (1986) e Embrapa (1997). A tabela Munsell foi utilizada em campo para caracterizar a cor dos solos e facilitar sua classificação preliminar, que foi confirmada posteriormente com a análise integrada dos dados de campo e de laboratório (físico-químicos).

Análise por componentes principais (ACP) e o método do contínuo espectral (Clark e Roush, 1984) foram aplicados sobre as imagens AVIRIS (reflectância de superfície) para caracterizar as variações na reflectância dos solos e na profundidade de suas principais bandas de absorção. ACP foi precedida pela criação de uma máscara para isolar os pixels de solo exposto, com base em limiares superiores ou iguais a 0,04 para a profundidade das bandas de absorção posicionadas em 2210 nm (caulinita) ou 2260 nm (gibbsita). As bandas de vapor d'água ao redor de 1400 e 1900 nm foram excluídas da ACP por não fornecerem dados úteis, mesmo após correção atmosférica.

A técnica "Ajuste de Feições Espectrais" (Spectral Feature Fitting – SFF; Clark et al., 1991; Dehaan e Taylor, 2002) foi utilizada para identificar caulinita e gibbsita na cena

AVIRIS usando como referências espectros destes minerais da biblioteca espectral do United States Geological Survey (USGS). Ambos os conjunto de dados (imagem e referências) foram normalizados pelo método do contínuo espectral.

Em levantamento de solos, o índice Ki ($1.7\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) fornece uma indicação do grau de alteração ou intemperismo de solos tropicais. Para os latossolos brasileiros, este índice é uma medida indireta das proporções relativas de caulinita e gibbsita (Resende e Santana, 1998). Ele pode ser estimado dos valores de reflectância associados com as bandas de absorção em 2210 nm (caulinita) e 2260 nm (gibbsita) (Madeira et al., 1995; Baptista et al., 1998). No presente estudo, os valores de Ki determinados das análises químicas foram plotados em função da profundidade das bandas de absorção em 2210 nm e 2260 nm. A relação de regressão foi aplicada na imagem AVIRIS para mapear o grau de alteração dos solos em Campo Verde, comparando-se os resultados com aqueles resultantes da identificação mineral de caulinita e gibbsita com a técnica SFF.

Para verificar possíveis associações entre os resultados e a topografia, um modelo de elevação digital (15 m de resolução) foi obtido a partir da utilização de imagens coletadas pelo sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) nas bandas 3N e 3B. O algoritmo ASTER_DTM (Sulsoft, 2004), que utiliza um método de correlação-cruzada, foi utilizado para esta finalidade.

3. Resultados e Discussão

A **Tabela 1** mostra valores médios e desvio-padrão dos parâmetros físico-químicas dos horizontes A (0-20 cm) e B (40-60 cm) dos principais tipos de solos da área de estudo. No horizonte A, LATOSSOLO VERMELHO apresentou os valores mais altos de SiO_2 e fração de argila. Do horizonte A para o B, todos os solos apresentaram um decréscimo no conteúdo de carbono orgânico, P_2O_5 e MnO e um aumento na fração de argila e de outros constituintes. De acordo com os resultados da difração de raio-X, quartzo, caulinita, gibbsita, hematita e goetita são os minerais mais comuns nas amostras.

Os espectros de laboratório mostraram (resultados não apresentados) que, do horizonte A para o B, a reflectância aumentou no visível devido à diminuição no conteúdo de carbono orgânico e o conseqüente realce de feições espectrais do ferro. Por outro lado, a reflectância diminuiu no SWIR devido ao aumento da fração de argila (**Tabela 1**). Estes resultados são concordantes com aqueles obtidos por Galvão et al. (1997) com solos do Estado de São Paulo.

Os resultados da análise por componentes principais (ACP) aplicada somente ao conjunto de pixels de solo exposto e plotados sobre o modelo de elevação digital são apresentados na **Figura 1**. Exemplos da ocorrência dos principais tipos de solos são indicados na composição colorida normal da **Figura 1a**. Na **Figura 1b**, os escores CP1 representam a reflectância média (área integrada abaixo das curvas dos pixels) ou o brilho dos solos, de acordo com a análise dos autovetores (resultados não apresentados). Em geral, solos de baixa reflectância (escores CP1 negativos; pixels em vermelho e amarelo na **Figura 1b**) tendem a ocupar as porções mais elevadas da cena, ocorrendo o contrário para solos de maior reflectância (escores CP1 positivos; pixels em azul). A relação entre topografia e distribuição espacial dos solos na área de estudo foi confirmada através de diagramas de espalhamento de dados de elevação com escores CP1 e valores de fração de argila que mostraram coeficientes de correlação de - 0,60 e + 0,62, respectivamente.

Tabela 1 – Valores médios e desvio-padrão (parênteses) dos parâmetros físico-químicos dos solos estudados nos horizontes (Hz) A (0-20 cm) e B (40-60 cm). As abreviações dos solos são: LV (LATOSSOLO VERMELHO), LVA (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO), LA (LATOSSOLO AMARELO), PP (PLINTOSSOLO PÉTRICO) e NQ (NEOSSOLO QUARTZARÊNICO). As abreviações dos minerais são: Q (quartzo), K (caulinita), G (gibbsita), H (hematita) e Gt (goetita).

Solo	Hz	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	CO (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	SiO ₂ (g/kg)	Fe ₂ O ₃ (g/kg)	MnO (g/kg)	Al ₂ O ₃ (g/kg)	TiO ₂ (g/kg)	Mineralogia (Difração de raio-X)	N
LV	A	38.17 (29.22)	10.21 (4.34)	51.61 (24.93)	25.45 (7.33)	0.52 (0.22)	109.21 (61.98)	41.05 (23.88)	0.08 (0.05)	63.59 (34.28)	5.46 (2.69)	Q-K-H-G-Gt	8
	B	34.44 (27.53)	9.39 (2.49)	56.17 (2.52)	12.42 (3.47)	0.33 (0.12)	122.87 (68.19)	67.47 (21.58)	0.05 (0.05)	120.41 (74.04)	8.51 (4.03)	Q-K-H-G-Gt	8
LVA	A	41.70 (23.63)	10.45 (3.97)	47.85 (19.66)	26.22 (5.63)	0.55 (0.14)	63.67 (25.25)	45.27 (21.77)	0.07 (0.04)	92.37 (51.7)	6.65 (3.03)	Q-G-K-H-Gt	4
	B	40.05 (22.44)	8.35 (2.31)	51.60 (20.14)	12.90 (3.47)	0.31 (0.09)	72.60 (36.69)	71.90 (33.46)	0.04 (0.03)	155.92 (111.69)	11.62 (6.21)	Q-G-K-H-Gt	4
LA	A	56.04 (20.40)	8.16 (3.20)	35.79 (17.46)	26.24 (4.20)	0.48 (0.19)	74.94 (21.96)	20.85 (10.45)	0.05 (0.03)	68.02 (33.74)	4.51 (1.86)	Q-G-K-H-Gt	11
	B	50.32 (19.59)	7.83 (2.24)	41.85 (17.59)	13.75 (3.62)	0.26 (0.11)	82.36 (25.26)	47.04 (23.61)	0.03 (0.02)	118.44 (37.00)	7.15 (1.93)	Q-G-K-H-Gt	11
PP	A	50.90 -	8.30 -	40.80 -	24.50 -	0.40 -	63.30 -	34.90 -	0.05 -	95.40 -	6.30 -	Q-G-K	1
	B	50.90 -	6.70 -	42.40 -	17.80 -	0.34 -	93.00 -	88.90 -	0.04 -	187.10 -	13.80 -	Q-H-K-G	1
NQ	A	87.30 -	3.40 -	9.30 -	14.70 -	0.28 -	28.20 -	5.10 -	0.04 -	10.40 -	1.00 -	Q-K	1
	B	86.60 -	3.30 -	10.10 -	8.30 -	0.19 -	27.50 -	5.90 -	0.03 -	11.30 -	1.20 -	Q-K	1

A **Figura 2** mostra a relação entre os valores de Ki determinados das análises químicas e a profundidade das bandas de absorção em 2210 nm e 2260 nm, calculada dos espectros de laboratório pelo método do contínuo espectral. Visto que o Ki representa a variabilidade relativa nos conteúdos de SiO₂ e Al₂O₃ associados com caulinita (Al₂SiO₅(OH)₄) e gibbsita (Al₂O₃·3H₂O), este índice mostra correlação positiva com a profundidade destas bandas de absorção. Quando aplicada na imagem AVIRIS, esta relação de regressão produziu resultados consistentes com a identificação de caulinita e gibbsita com a técnica SFF. Isto é mostrado na **Figura 3** para uma porção da cena localizada próxima à seção A-B indicada na **Figura 1a**. Em resumo, áreas caulínicas (cor vermelha na **Figura 3a**) estão associadas a valores altos de Ki (cores vermelho e amarelo na **Figura 3b**), ocorrendo o contrário para áreas gibbsíticas. Conforme mencionado anteriormente, o índice Ki é um indicador do processo de dessilificação dos solos ou do grau de alteração.

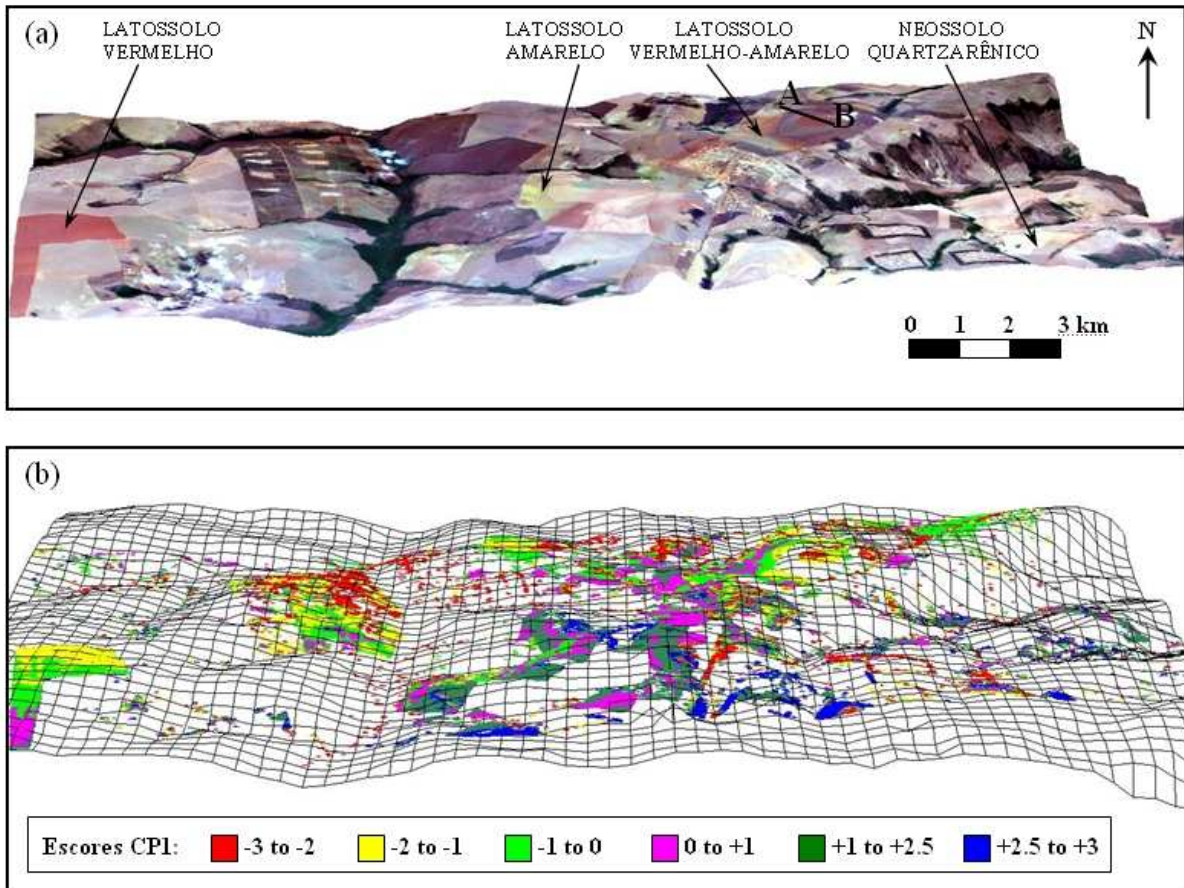


Figura 1 – (a) Composição colorida normal com as bandas do sensor AVIRIS posicionadas em 677 nm (vermelho), 569 nm (verde) e 480 nm (azul) sobrepostas ao modelo de elevação digital resultante do uso das bandas 3N e 3B do sensor ASTER; (b) Variações nos escores CPI (reflectância média) para pixels de solo exposto. Áreas em branco representam outros componentes de cena ou mistura espectral. A seção A-B indicada em (a) é discutida no texto.

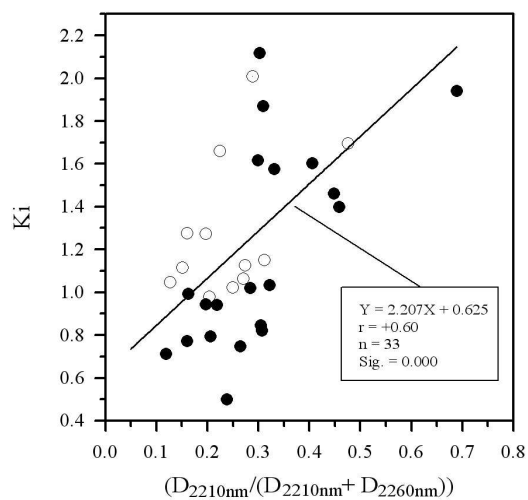


Figura 2 – Relação entre o índice K_i ($1.7SiO_2/Al_2O_3$) e a profundidade (D) das bandas de absorção centradas em 2210 nm (caulinita) e 2260 nm (gibbsita) para dados de laboratório dos horizontes A (símbolos claros) e B (símbolos escuros).

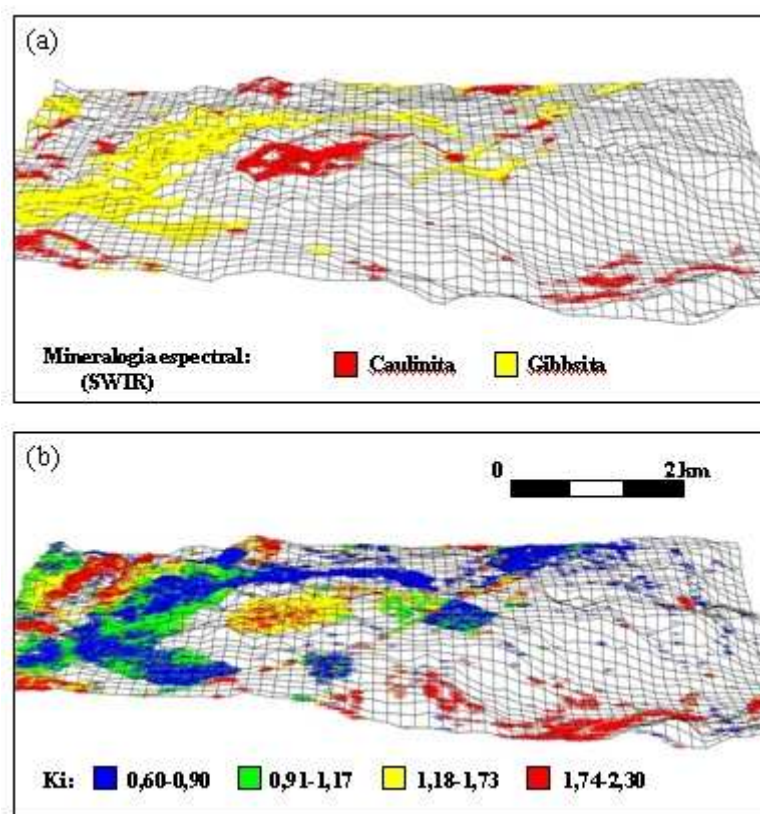


Figura 3 - (a) Identificação de caulinita e gibbsita com a técnica Spectral Feature Fitting (SFF); (b) Variações nos valores de Ki para pixels de solo exposto. Áreas em branco em (a) indicam não-classificação e em (b) mistura espectral ou não-exposição de solos.

4. Conclusões

As seguintes conclusões foram obtidas:

(a) existe uma relação na área de estudo entre a distribuição espacial dos tipos de solos e a topografia. Solos de baixa reflectância (p.ex., LATOSSOLO VERMELHO com escores CP1 negativos, textura argilosa e maior conteúdo de carbono orgânico, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2) predominam em maiores elevações, ocorrendo o contrário para solos de alta reflectância (p.ex., NEOSSOLO QUARTZARÊNICO com escores CP1 positivos, textura arenosa e conteúdos mais baixos destes constituintes);

(b) a identificação mineral de caulinita e gibbsita na cena AVIRIS com a técnica SFF apresentou resultados consistentes com a variação de valores do índice Ki obtido pixel-a-pixel a partir de uma relação de regressão de laboratório entre dados químicos e de profundidade das bandas de absorção centradas em 2210 nm (caulinita) e 2260 nm (gibbsita).

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento do projeto (05/01737-0) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Referências

- Baptista, G. M. M.; Madeira Netto, J. S.; Meneses, P. R. Determinação da relação sílica-alumina a partir dos dados do sensor AVIRIS (JPL/NASA) para discretização espacial do grau de intemperismo de solos tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. Artigos, p. 1345-1355. CD-ROM.
- Ben-Dor, E.; Patkin, K.; Banin, A.; Karnieli, A. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data: a case study over clayey soils in Israel. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, p. 1043-1062, 2002.
- Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986 (IAC Publicação 106).
- Chabrillat, S.; Goetz, A. F. H.; Krosley, L.; Olsen, H. W. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 431-445, 2002.
- Clark, R. N.; Swayze, G. A.; Gorelick, N.; Kruse, F. A. Mapping with imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials. In: Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 3., 1991, Pasadena, CA. **Proceedings...**Pasadena: JPL, 1991, p. 2-3 (JPL Technical Report 91-28).
- Clark, R. N.; Roush, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, p. 6329-6340, 1984.
- Curi, N.; Franzmeier, D. P. Toposequence of oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 341-346, 1984.
- Curi, N.; Franzmeier, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 153-158, 1987.
- Dehaan, R. L.; Taylor, G. R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 406-417, 2002.
- Dehaan, R. L.; Taylor, G. R. A remote-sensing method of mapping soils and surficial lags from a deeply weathered arid region, near Cobar, NSW, Australia. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 4, p. 99-112, 2004.
- Embrapa. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1987. 212 p.
- Embrapa. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 412 p.
- Galvão, L. S.; Vitorello, I.; Formaggio, A. R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p. 24-33, 1997.
- Galvão, L. S.; Pizarro, M. A.; Epiphany, J. C. N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 245-255, 2001.
- Green, R. O.; Eastwood, M. L.; Sarture, C. M.; Chrien, T. G.; Aronsson, M.; Chippendale, B. J.; Faust, J. A.; Pavri, B. E.; Chovit, C. J.; Solis, M. S.; Olah, M. R.; Williams, O. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p. 227-248, 1998.
- Macedo, J.; Bryant, R. B. Morphology, mineralogy, and genesis of a hydrosequence of oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 690-698, 1987..

Madeira, J.; Bédidi, A.; Pouget, M.; Cervelle, B.; Flay, N. Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in lateritic soils. **Comptes Rendus de L'Academie des Sciences**, v. 321, p. 119-127, 1995.

Madeira, J.; Bédidi, A.; Cervelle, B.; Pouget, M.; Flay, N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasília, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 2835-2852, 1997.

Moniz, A. C.; Buol, S. W.; Weed, S. B. Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil: II. Lateral dynamics of chemical weathering. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 1234-1239, 1982..

Palacios-Orueta, A.,; Ustin, S. L. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica mountains: I. spectral analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, p. 170-183, 1998.

Pizarro, M. A.; Epiphanyo, J. C. N.; Galvão, L. S. Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1277-1286, 2001.

Resende, M.; Santana, D. P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para classificação dos latossolos. In: **Reunião de Classificação, Correlação dos Solos e Interpretação da Aptidão Agrícola** (Embrapa, Ed.). Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1998, p. 225-232.

Sulsoft. **ASTERDTM 2.2: installation and user's guide**. Porto Alegre: Sulsoft, 2004. 38 pp.