

COMPORTAMENTO ESPECTRAL (450-2.450 nm) DE SOLOS TROPICAIS DE SÃO PAULO⁽¹⁾

A. R. FORMAGGIO⁽²⁾, J. C. N. EPIPHANIO⁽²⁾, M. M. VALERIANO⁽³⁾
& J. B. OLIVEIRA⁽⁴⁾

RESUMO

O presente trabalho visou analisar as relações entre características pedológicas, em regiões tropicais sob intemperismo intenso, e o comportamento espectral dos solos. Contou-se com 109 amostras, de superfície e de subsuperfície, providas de 52 perfis correspondentes a 13 classes de solos, as quais representam os solos de maior ocorrência e significância pedológica e agrícola do Estado de São Paulo. Obtiveram-se as curvas dos fatores de reflectância bidirecional (FRB), medidos sobre amostras de solos em condições de terra fina seca ao ar, na faixa espectral de 450 a 2.450 nm, com um espectrorradiômetro em condições de laboratório. Quatro padrões de curvas espectrais foram identificados, segundo a forma das curvas e a intensidade de influência dos parâmetros teor de óxidos de ferro, teor de matéria orgânica e material de origem. Os agrupamentos das classes de solos estudados, segundo o critério de comportamento espectral, não obedeceram às mesmas compartimentações estabelecidas pelo sistema de classificação taxonômica de solos. As rochas básicas dão origem aos solos de mais baixo albedo, seguidas das intermediárias e das ácidas, cujos valores de reflexão, em geral são os mais altos.

Termos de indexação: comportamento espectral, espectrorradiometria, solos tropicais, fator de reflectância bidirecional, sensoriamento remoto.

SUMMARY: *SPECTRAL BEHAVIOR (450-2450 nm) OF TROPICAL SOILS FROM SÃO PAULO STATE, BRAZIL*

The objective of this research was to study the influence of characteristics of highly weathered tropical soils on their spectral behavior. A total of 109 surface and subsurface soil samples from 52 profiles and 13 agriculturally and pedologically most important soil classes from São Paulo State, Brazil, were used. The curves of the Bidirectional Reflectance Factors (BRF) in the 450 to 2,450 nm spectral range were obtained, using a lab spectroradiometer. Four types or standards of spectral curves were identified, according to the curve shapes and the intensity of influence of the parameters iron oxides content, organic matter content and type of parent material. The clustering of the studied soil classes according to the spectral behavior criterion didn't followed the same type of compartmentation established by the soil taxonomic classification system. Overall reflectance intensities of the soils decreased, when comparing those derived from acid, to those derived from intermediate, to those derived from basic igneous rocks.

Index terms: spectral behavior, spectroradiometry, tropical soils, bidirectional reflectance factor, remote sensing.

(1) Pesquisa financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Recebido para publicação em junho de 1995 e aprovado em setembro de 1996.

(2) Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCT), Caixa Postal 515, CEP 12201-970 São José dos Campos (SP). Bolsista do CNPq.

(3) Pesquisador do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP).

(4) Professor visitante do Depto. de Água e Solos da UNICAMP. Campinas (SP). Bolsista do CNPq.

INTRODUÇÃO

O levantamento, a catalogação, a experimentação, a formação de bibliotecas espectrais de referência e o estudo do comportamento espectral dos principais solos brasileiros constituem subsídios necessários às atividades de sensoriamento remoto (SR) atuais e às vindouras, no País e nas regiões tropicais em geral.

Nos próximos anos, deverão estar operacionais novos sistemas sensores a bordo de satélites e de estações espaciais, com resoluções cada vez melhores (Asrar & Dozier, 1994). Programados para o fim da presente década, a bordo de plataformas espaciais deverão estar espectrômetros imageadores, com resolução espectral de dezenas de bandas. Assim, a utilização plena de tal disponibilidade de dados exige um conhecimento espectral cada vez mais detalhado dos alvos, ou seja, os objetos da superfície terrestre observados pelos sensores remotos.

Outro aspecto de amplo interesse para estudar o comportamento espectral dos solos é que eles, dada sua ampla ocorrência na superfície terrestre, geralmente contribuem significativamente no sinal eletromagnético refletido pela maioria dos alvos naturais terrestres. Assim, uma parcela dos esforços da pesquisa em SR é dirigida ao entendimento da influência das características dos solos na resposta espectral dos alvos em geral, bem como ao desenvolvimento de métodos para sua análise (Huete et al., 1994). Além disso, muitos modelos têm na resposta espectral dos solos uma variável significativa (Myneni et al., 1992).

Atualmente, a disponibilidade de estudos espectrais com solos tropicais do Brasil restringe-se a poucos autores que trabalharam com instrumentos operando em bandas largas e apenas na região do visível e do infravermelho próximo (400-1.000 nm) (ex.: Formaggio, 1983; Epiphanyo et al., 1987; Formaggio & Epiphanyo, 1988). Até 1991, em relação a solos brasileiros, havia menos de uma dezena de curvas espectrais abrangendo toda a região entre 400 e 2.500 nm, realizadas por Stoner et al. (1980). Epiphanyo et al. (1992) apresentaram um estudo contendo 111 curvas espectrais de catorze tipos de solos paulistas. Valeriano et al. (1995) fizeram uso desses dados, discutiram a variabilidade dos dados físico-químicos e das respostas espectrais dos solos, e analisaram as diferenças espectrais entre horizontes superficiais e subsuperficiais. Em 1991, Madeira Netto apresentou as curvas de reflectância difusa (400-2.500 nm) de 56 amostras de solos do Brasil central.

Considera-se que a reflectância dos solos é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento espectral intrínseco devido às heterogêneas combinações de matéria mineral, orgânica e fluída que compõem os solos minerais (Stoner & Baumgardner, 1981). Muitos são os estudos que descrevem as contribuições relativas dos parâmetros dos solos para o seu comportamento espectral e, dessa maneira, modelamentos quantitativos dessas interações são complexos. Quando os solos são estudados em condições de laboratório, os principais fatores que interferem nas

curvas espectrais são: o teor de matéria orgânica, a granulometria, o teor de óxidos de ferro, o tipo de mineralogia de argila e o conteúdo de umidade. Se as medidas espectrais forem obtidas em condições de campo, as condições de superfície (rugosidade, presença de restos culturais, porcentagem de cobertura vegetal) também constituem fatores interferentes (Obukhov & Orlov, 1964; Bowers & Hanks, 1965; Baumgardner et al., 1970; Mathews et al., 1973; Montgomery, 1976; Costa, 1979; Stoner, 1979; Stoner & Baumgardner, 1981, Formaggio, 1983).

Hunt & Salisbury, 1970; 1971; 1976a, b; Hunt et al., 1971a,b; 1973a,b,c; 1974 e Hunt, 1977; descreveram as variações características na reflectância visível e infravermelho próximo de minerais e de rochas. Concluíram que as bandas de absorção e determinadas declividades das curvas espectrais estão entre as feições mais informativas e são causadas por processos vibracionais e eletrônicos devidos a interações entre a radiação e as partículas. Entre as mais evidentes, estão as bandas de absorção devidas à presença de água, localizadas em 1.450 e em 1.950 nm, podendo, ocasionalmente, aparecer bandas fracas em 970, em 1.200 e em 1.770 nm. Em 2.200 nm, ocorre uma banda atribuída a um modo vibracional do íon hidroxila (Hunt & Salisbury, 1970; Irons et al., 1989). A hidroxila causa também, com a água líquida, uma banda em 1.450 nm. Assim, a presença de uma banda em 1.450 nm e a ausência de banda em 1.950 nm indicam a presença de grupos hidroxila e não de água.

Condit (1970, 1972), tendo realizado medições espectrais (na faixa entre 320 e 1.000 nm) de 160 amostras de solos provindos de 36 estados americanos, classificou os espectros obtidos em três padrões gerais segundo as formas das curvas. Ele não confrontou tais padrões com os parâmetros influenciadores sobre o comportamento espectral dos solos ou com aspectos de sua classificação.

Stoner & Baumgardner (1981) realizaram medições espectrais (520 a 2.320 nm) para um total de 485 amostras dos Estados Unidos (e inclusive 4 amostras de latossolo roxo provindas do Estado do Paraná), representando 30 subordens das 10 Ordens da Soil Taxonomy. Concluíram que ocorrem cinco padrões de curvas espectrais de solos (Figura 1), considerando a forma das curvas, a presença ou a ausência de bandas de absorção e, ainda, a predominância de influência de matéria orgânica ou de óxidos de ferro. Concluíram, ainda, que as medições do fator de reflectância bidirecional espectral de solos podem ser informativas quanto à classificação, gênese e levantamentos de solos. O que se observa é que na região tropical ainda ocorre grande lacuna de conhecimentos sobre o comportamento espectral dos solos, especialmente na faixa compreendida entre 1.000 e 2.500 nm.

Objetiva-se, no presente trabalho, analisar as relações entre comportamento espectral dos solos e seus principais fatores determinantes, p. ex., presença de matéria orgânica e de óxidos de ferro; e propor um agrupamento das classes de solos estudadas em padrões espectrais gerais.

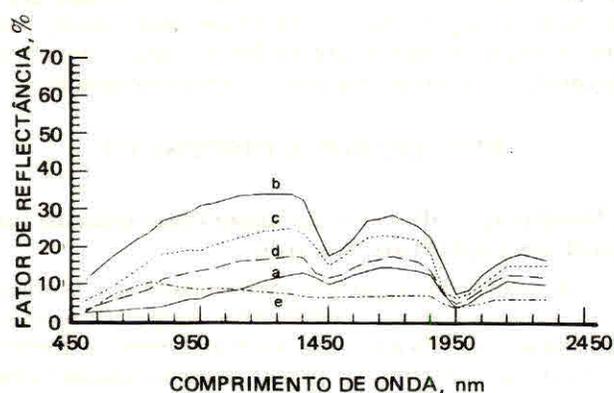


Figura 1. Curvas representativas de cinco padrões espectrais de solos minerais, segundo Stoner & Baumgardner (1981), sendo o respectivo comportamento espectral: (a) dominado pela matéria orgânica (representado por um solo com elevado conteúdo de matéria orgânica, textura moderadamente fina); (b) minimamente alterado (baixo teor de matéria orgânica, médio teor de óxidos de ferro); (c) afetado por óxidos de ferro (baixo teor de matéria orgânica e médio teor de óxidos de ferro); (d) afetado por matéria orgânica (elevado teor de matéria orgânica, textura moderadamente grosseira); e (e) dominado por óxidos de ferro (elevado teor de óxidos de ferro, textura fina).

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema sensor utilizado para as medições espectrais, neste trabalho, foi o "Dual Field of View Mark IV Infra-Red Intelligent Spectroradiometer" (IRIS), (GER, s.d.). Cobre uma janela espectral entre 300 e 3.000 nm, numa varredura contínua, em que adquire dois espectros, sendo um em cada campo de visada ("fov" — field of view) (um "fov" na amostra e o outro na placa de referência). A resolução espectral é de 2 nm entre 300 nm e 1.000 nm e de 4 nm na região entre 1.000 nm e 3.000 nm. Descrições mais detalhadas sobre o equipamento podem ser encontradas em Epiphany et al. (1992) e em Valeriano et al. (1995).

O fator de reflectância bidirecional (FRBD) num dado comprimento de onda λ , é dado pela seguinte expressão:

$$FRBD_{\lambda} = \frac{L_{a,\lambda}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{L_{p,\lambda}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)} \quad (1)$$

onde:

L_a, L_p = radiância ($w m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) do alvo e da placa de referência respectivamente;

θ_i, ϕ_i = ângulos zenital e azimutal de incidência;

θ_r, ϕ_r = ângulos zenital e azimutal de reflexão.

O procedimento é medir a radiância proveniente do alvo e compará-la com a de uma placa de referência com padrão lambertiano de reflexão e de reflectância

máxima (ou conhecida). As medições no alvo e na placa de referência devem ser executadas sob condições angulares (incidência e reflexão) idênticas.

Para este trabalho, contou-se com 109 amostras de solos, providas de horizontes de 52 perfis, correspondendo a 13 classes de solos: latossolo roxo (LR, 13 perfis), latossolo vermelho-escuro (LE, 6 perfis), latossolo vermelho-amarelo (LV, 5 perfis), latossolo variação una (LU, 4 perfis), latossolo húmico (LH, 2 perfis), podzólico vermelho-amarelo (PV, 6 perfis), podzólico vermelho-escuro (PE, 3 perfis), podzol (PZ, 1 perfil), terra roxa estruturada (TE, 4 perfis), brunizém avermelhado (BV, 1 perfil), areia quartzosa (AQ, 2 perfis), cambissolo (Cb, 3 perfis), e hidromórfico (Hi, 2 perfis de glei húmico). Essas 13 classes estão entre aquelas que representam os solos de maior ocorrência e de maior significância pedológica e agrícola do Estado de São Paulo. As amostras provieram de levantamentos pedológicos executados pelo Instituto Agrônomo de Campinas nas quadrículas de Campinas (Oliveira et al., 1979), Araras (Oliveira et al., 1982), São Carlos (Oliveira & Prado, 1984), Ribeirão Preto (Oliveira & Prado, 1987), Piracicaba (Oliveira & Prado, 1989), e Guaíra (Oliveira & Prado, 1991). Dispõe-se, portanto, de análises físicas, químicas e mineralógicas, bem como das descrições morfológicas próprias desses levantamentos. As amostras consideradas foram preferencialmente as dos horizontes superficiais e subsuperficiais (A e B), para cada perfil.

As amostras de solo foram passadas em peneiras de malha de 2 mm e estudadas na condição de terra fina seca ao ar. Para as medições espectrorradiométricas, as amostras foram acondicionadas em recipientes de PVC quadrados, de 13 x 13 cm, com profundidade de 1 cm e com a parte interna pintada com tinta preta fosca a fim de evitar reflexões de fundo. A camada de solo em cada recipiente era suficientemente espessa para assegurar que somente solo estava sendo visado pelo sensor.

Na aquisição das medidas (Figura 2), foram obtidas quatro leituras espectrorradiométricas sobre cada amostra de solo, em quatro posições diferentes (dadas por giros de 90° do recipiente que continha a amostra). As repetições de leituras tiveram como finalidade suavizar os ruídos aleatórios intrínsecos aos detectores (p.ex., aqueles devidos a sua temperatura interna). A cabeça sensora do IRIS estava colocada numa posição vertical a 61 cm de distância sobre a amostra, definindo uma área amostrada retangular de aproximadamente 5 x 2 cm sobre a amostra. A fonte de iluminação, uma lâmpada halógena de iodeto de tungstênio de 600 W de potência, com feixe não colimado para o plano visado, estava posicionada a cerca de 90 cm do recipiente amostral e com um ângulo zenital de 15°.

Usou-se como padrão de referência uma placa de *spectralon* cinza (~50% de reflectância e calibrada segundo padrão internacional) (Labsphere, 1991), sobre a qual eram realizadas quatro leituras a título de repetição. A reflectância da placa cinza (em média, próxima de 50%), adaptada para os 875 comprimentos

de onda do IRIS, foi utilizada como fator de calibração absoluta (FCA). Além disso, era necessário intercalibrar as duas cabeças sensoras do IRIS. Para a obtenção deste fator de intercalibração (FIC), foi feita a média de quatro repetições sobre uma placa de *spectralon* branca (~100% de reflectância, calibrada segundo padrão internacional). Tais repetições visaram reduzir os efeitos de eventuais singularidades na distribuição espacial da reflectância pela superfície da referida placa.

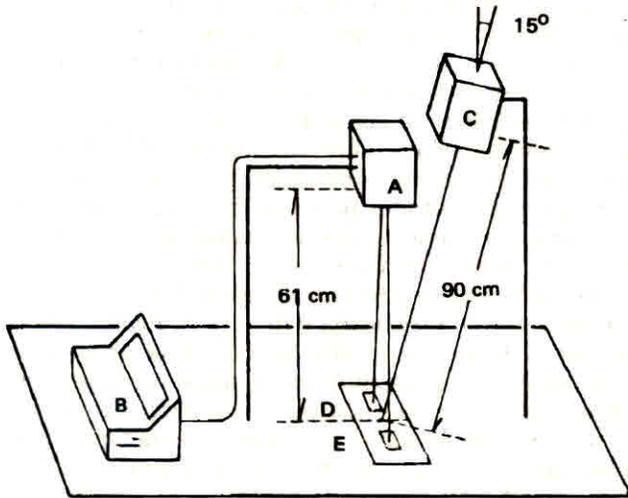


Figura 2. Sistema de medição. Unidade de medição (a); microcomputador (b); iluminação (c); referência (d); alvo (e).

Dado o grande número de amostras de solos, foram feitas várias sessões de medições. Para cada sessão, foi gerado um fator de intercalibração, cujas finalidades foram: a: uniformizar possíveis diferenças de respostas fornecidas pelas duas cabeças sensoras internas do IRIS, e b: controlar efeitos de interferências de fontes externas (ambiente do laboratório) que pudessem causar incidência de radiação difusa diferencialmente sobre o plano amostral (ou seja, a placa de referência e a amostra de solo). Para cada sessão de medições, foram feitas as seguintes leituras: a: quatro repetições sobre a placa branca de *spectralon*, para a obtenção do fator de intercalibração dos detectores (FIC), e b: quatro repetições sobre cada conjunto "amostra de solo + placa cinza", para a obtenção do fator de reflectância relativo à placa cinza (FRR). Com esses dados, foram feitas as médias das repetições, a fim de se obterem os valores FIC médio e FRR médio. Assim, o fator de reflectância bidirecional de uma amostra "i" de solos (FRBDi) é dado por:

$$FRBDi = [(FRRi \text{ médio}) / (FIC \text{ médio}) \times (FCA)]$$

A partir dos valores de FRBDi, foram obtidos 109 gráficos (correspondentes às 109 amostras de solos estudadas), os quais são apresentados no trabalho de Epiphanyo et al. (1992). Destes, foram mostradas apenas as curvas representativas e típicas dos padrões específicos de comportamento espectral de interesse

do presente trabalho. As análises e discussões apresentam agrupamentos espectrais específicos, bem como considerações sobre os fatores que interferem gerando feições espectrais nas curvas estudadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Classificação das curvas espectrais quanto aos padrões espectrais dos solos

A análise dos espectros obtidos para as 109 amostras de solos revelou a existência de quatro padrões distintos, identificados segundo critérios de formas das curvas, bem como da presença ou da ausência das bandas de absorção.

Inicialmente, pode ser apresentada a curva considerada típica dos latossolos roxos (LR) (Figura 3a). Esses solos têm como características intrínsecas mais influenciantes no seu comportamento espectral os

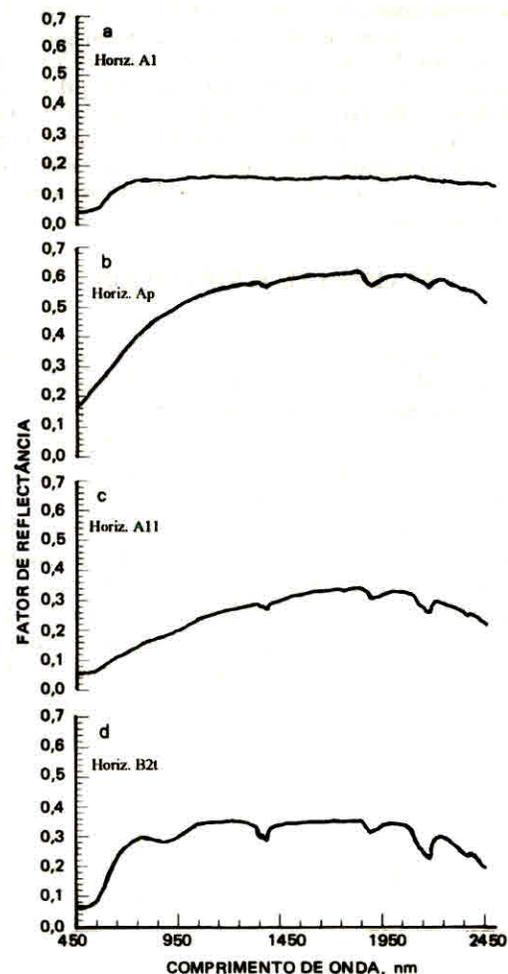


Figura 3. Curva espectral típica do horizonte A1 de um latossolo roxo da região de Araras (SP) (a); curva espectral do horizonte "Ap" de um podzólico vermelho-amarelo da região de Piracicaba (b); curva espectral do horizonte A11 de um latossolo húmico da região de Campinas (c); curva espectral do horizonte B2t de um podzólico vermelho-escuro (PE) da região de Tietê (d). As características dos solos estão no quadro 2.

elevados teores de óxidos de ferro totais ($> 180 \text{ g kg}^{-1}$ e $< 400 \text{ g kg}^{-1}$), MnO e TiO_2 . Em geral, são muito argilosos e com elevados teores de hematita (que lhes confere cores mais vermelhas que 3,5 YR), de ilmenita e de magnetita, dado que são solos provenientes do intemperismo de rochas básicas (Quadro 1).

Como conseqüência, as curvas espectrais dos latossolos roxos são de albedo bem baixo (Figura 3a), com valores de reflectância bem pequenos nas regiões do visível e do infravermelho e, portanto, praticamente sem a presença de feições de absorção. As bandas da água, p. ex., não se manifestam em função de que os valores de reflectância estão abaixo do seu ponto de mínimo. Além disso, no presente estudo, as amostras estavam, ao serem medidas, em condições de TFSA.

As baixas refletividades no visível e no infravermelho são devidas à presença da magnetita, principalmente, como expõem Stoner & Baumgardner (1980). De fato, seguindo Hunt et al. (1971a), magnetita e ilmenita são minerais tipicamente opacos e praticamente sem eventos ou feições espectrais no visível e no infravermelho próximo. A forte absorção nos comprimentos de onda menores que 550 nm deve-se à presença de formas trivalentes de ferro (Fe^{3+}) em grandes quantidades (Quadro 1). Estas são responsá-

veis, conforme Hunt et al. (1971a), por uma banda de absorção devida a transferências de carga metal-ligante ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{O}^{2-}$) centralizada no ultravioleta, mas cujo flanco de baixa energia se situa no domínio do visível.

Em seguida a essa forte banda de absorção devida às formas trivalentes de ferro presentes (região entre 450 e 550 nm), ocorre um aumento abrupto de reflectância, com uma inflexão entre 650 e 750 nm, sendo responsável pela cor vermelha desses solos. Em seguida à referida inflexão (na região entre 650 e 750 nm), há uma reflectância constante e relativamente baixa (da ordem de 13% a 20%) até o final da região espectral estudada (cerca de 2.450 nm). Essa região posterior a 900 nm é conhecida como uma zona de absorção devida a uma banda de condução atribuída aos óxidos de ferro, presentes em altos teores em tais solos, principalmente em função da opacidade e da absortividade espectral da magnetita.

Além dos latossolos roxos, há outros solos com comportamento espectral semelhante ao da figura 3a. Entre as classes de solos estudados na presente pesquisa, a terra roxa estruturada (TE), o latossolo vermelho-escuro (LE), o latossolo variação una (LU) e o brunizém avermelhado (BV) apresentam curvas es-

Quadro 1. Características físicas e químicas de solos representativos dos quatro padrões espectrais mais significativos encontrados na presente pesquisa (Obs.: Os padrões espectrais - Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 e Tipo 4 - citados abaixo estão representados nas curvas da figura 3a, b, c, d respectivamente)

| Características | Padrões espectrais | | | |
|--|--------------------------|-----------------------|--|---|
| | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 | Tipo 4 |
| Classe taxonômica | Latossolo Roxo | Podzól. Verm.-Amarelo | Latossolo Húmico | Podzól. Verm.-Escuro |
| Número do perfil | 1245 | 1387 | 1176 | 1388 |
| N.º da curva em Epiphany et al. (1992) | 1 | 73 | 61 | 78 |
| Localização | Quadrícula Araras | Quadrícula Piracicaba | Quadrícula Campinas | Tietê (SP) |
| Horiz. amostrado | A1 | Ap | A11 | B2t |
| Material de origem | Decomposição de diabásio | --- | Sedimentos argilosos/ Grupo Tubarão | Folhelhos e Siltitos/ Grupo Passa Dois Formação Irati |
| Areia grossa, g kg^{-1} | 60 | 120 | 120 | 30 |
| Areia fina, g kg^{-1} | 230 | 720 | 330 | 290 |
| Silte, g kg^{-1} | 170 | 80 | 80 | 40 |
| Argila, g kg^{-1} | 540 | 80 | 470 | 640 |
| pH | 7,3 | 5,3 | 4,8 | 5,2 |
| S, $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ | 178 | 17 | 15 | 46 |
| T, $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ | 185 | 39 | 157 | 71 |
| Carbono, g kg^{-1} | 30 | 6 | 36 | 6 |
| Nitrogênio, g kg^{-1} | 3,2 | ... | 3,2 | 0,8 |
| Fe_2O_3 , g kg^{-1} | 213 | 8 | 53 | 59 |
| Al_2O_3 , g kg^{-1} | 105 | 28 | 160 | 200 |
| SiO_2 , g kg^{-1} | 115 | 29 | 168 | 268 |
| TiO_2 , g kg^{-1} | 74 | 3 | 9 | 13 |
| Cor Munsell | 2,5 YR 3/4 | 7,5 YR 8/2 | 5 YR 3/3 | 2,5 YR 5/8 |

pectrais similares à da figura 3a. Contudo, há que se destacar que, em geral, tais solos apresentam albedos superiores aos do latossolo roxo na faixa entre 900 e 2.450 nm. Enquanto, nesta faixa, os latossolos roxos apresentam reflectância praticamente constante e da ordem de 15%, os outros solos citados possuem valores na faixa próxima dos 20% (Figura 4a), provavelmente em função de uma granulometria mais arenosa, dada a seus materiais de origem. Mesmo assim, o aspecto geral da curva é sempre praticamente igual ao da figura 3a, em função da forte contribuição e influência dos componentes de alteração de rochas básicas e ultrabásicas sobre esses solos.

A figura 3b apresenta um segundo padrão de curva espectral, entre os padrões encontrados para os tipos de solos estudados na presente pesquisa. Trata-se da curva espectral de um horizonte superficial de um podzólico vermelho-amarelo da região da Piracicaba (SP). Em geral, tais solos apresentam, nos horizontes mais superficiais, predominância de texturas arenosas e médias, e baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de ferro e titânio (opacos escuros). São muitas vezes provenientes de sedimentos arenosos e arenoargilosos oriundos do retrabalhamento de arenito, podendo ser, ainda, ocasionalmente derivados de argilitos e siltitos.

Como conseqüência dessas características, suas curvas espectrais são de albedos altos, com fatores de reflectância atingindo picos próximos a 60%, localizados em comprimentos de onda próximos de 1.800 nm. As altas reflectâncias devem-se aos materiais componentes desses solos, que são de alta refletividade, como os arenitos, uma vez que, em geral, são de textura arenosa. Somando-se a isso, o fato de terem baixos teores de óxidos de ferro e de titânio (Quadro 1), além de baixos teores de matéria orgânica, contribuem para propiciar altos valores de reflexão.

As duas principais bandas de absorção devidas à água (1.450 e 1.950 nm) aparecem claramente, embora com profundidades e larguras reduzidas, tendo em vista que as amostras usadas estavam em condições de terra fina seca ao ar. Ao contrário do que foi feito na presente pesquisa, Stoner & Baumgardner (1981) usaram amostras umedecidas a 0,01 MPa, o que sempre provocou forte diminuição do albedo e também a presença de pronunciadas bandas de absorção conseqüentes à água.

Dos solos estudados aqui, podem ser enquadrados como pertencentes a este agrupamento espectral: o podzólico vermelho-amarelo (PV), proveniente de produtos derivados de argilitos e siltitos da formação Tatuí; o cambissolo (CB), oriundo de sedimentos fluviais e os provenientes de retrabalhamento de sedimentos do grupo Tubarão; as areias quartzosas (AQ), originadas de sedimentos arenosos oriundos do retrabalhamento de arenitos da formação Pirambóia, e ainda um podzol (PZ), da região de Piracicaba (SP).

O terceiro tipo de agrupamento espectral pode ser representado pela curva - Figura 3c, que corresponde à de um latossolo húmico (LH) da região de Campinas (SP).

Além do latossolo húmico, enquadram-se também nessa tipologia os hidromórficos (glei húmicos), os quais têm a matéria orgânica como característica mais marcante a conferir-lhes influência espectral. Nesses, encontram-se, em geral, teores de matéria orgânica acima dos 20 g kg⁻¹ (Quadro 1). Como conseqüência, os seus valores de albedo podem ser considerados intermediários. Principalmente na faixa entre 450 e 1.450 nm, para este solo, ocorre uma concavidade onde geralmente as curvas espectrais dos outros agrupamentos apresentam um típico comportamento convexo.

De fato, ao conteúdo e à composição dos constituintes orgânicos atribui-se forte influência sobre a reflectância dos solos. À medida que ocorrem aumentos no teor de matéria orgânica, a reflectância do solo diminui no intervalo entre 400 e 2.500 nm (Hoffer & Johannsen, 1969). A ausência de convexidade neste terceiro tipo espectral, ocasionando até certa concavidade na faixa compreendida no primeiro terço da curva, vem confirmar Mathews et al. (1973); estes concluíram que a matéria orgânica influencia mais determinantemente no intervalo entre 500 e 1.200 nm.

O quarto padrão de curvas espectrais (Figura 3d) é um tipo composto, ou seja, apresenta, no segmento de curva entre 450 e 1.000 nm, semelhanças com o primeiro padrão (o dos LR) anteriormente citado. Isso porque há influência dos óxidos de ferro, porém em teores relativamente baixos (5 a 6 g kg⁻¹) (Quadro 1), manifestando-se numa banda de absorção centrada próximo de 850 nm e influenciando esta primeira parte da curva espectral. No restante (1.000 a 2.450 nm), apresenta semelhanças com a curva do segundo padrão espectral (o dos PV). O quarto padrão pode ser representado pela curva do podzólico vermelho-escuro (PE) da região de Tietê (SP), proveniente de produtos derivados de folhelhos e siltitos do grupo Passa Dois, formação Irati. É interessante assinalar que, quanto maior for o teor de óxidos de ferro presente, mais acentuada será a semelhança no primeiro segmento de curva deste quarto padrão com os latossolos roxos. Isso também se evidencia quando há contribuição de materiais provenientes de rochas eruptivas básicas e ultrabásicas.

Espectralidade e classificação de solos

Comparando os quatro padrões espectrais encontrados, entre si, verifica-se que os critérios ditados pelo comportamento espectral para agrupar os solos estudados não obedecem correlacionadamente às mesmas formas de compartimentações estabelecidas pelo sistema de classificação taxonômica de solos; existe um número pequeno de padrões espectrais para um número relativamente grande de classes de solos.

Um mesmo tipo de solo pode comportar-se espectralmente de acordo com determinado padrão espectral quando oriundo de determinado local e/ou material de origem. Por outro lado, a mesma classe de solo pode comportar-se segundo outro agrupamento espectral, noutras condições. Por exemplo, um latossolo vermelho-escuro (LE) proveniente de rochas íg-

neas básicas/ultrabásicas (curva a, Figura 4) enquadra-se no primeiro padrão apresentado aqui, no agrupamento espectral dos LR. Entretanto, um LE proveniente de sedimentos arenosos recentes da formação Tubarão (curva b, Figura 4) enquadra-se mais no quarto agrupamento espectral do presente trabalho, o qual corresponde ao padrão dos podzólicos vermelho-escuros (PE).

Outro fator que afeta a tendência de determinado solo ser enquadrado espectralmente num dos quatro padrões encontrados é a matéria orgânica. Como ilustração desse aspecto, podem-se citar as curvas 43 e 44 de Epiphanyo et al. (1992), correspondentes ao horizonte A11 e ao B21 de um latossolo vermelho-amarelo respectivamente (Figura 5). Verifica-se que a curva do A11 deve ser enquadrada como pertencente ao terceiro padrão espectral apresentado no presente trabalho (o dos solos com altos teores de matéria orgânica (Figura 3c), enquanto a do horizonte B21 do mesmo LV deve ser enquadrada no quarto padrão espectral, ou seja, o dos PE (Figura 3d).

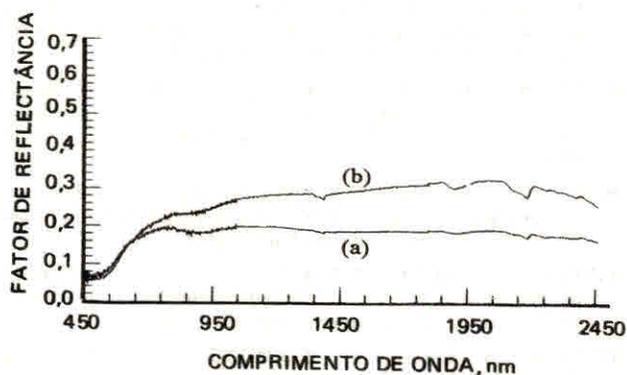


Figura 4. Curvas espectrais correspondentes aos horizontes superficiais: de um LE proveniente de rochas básicas (a), e de um LE proveniente de sedimentos arenosos da formação Tubarão (b). As características físico-químicas dos solos estão no quadro 2.

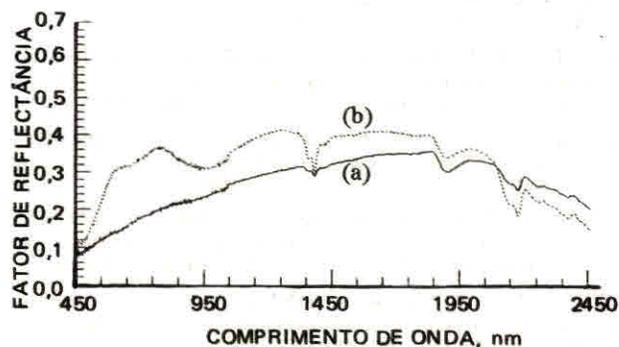


Figura 5. Curva espectral representativa: do horizonte A11 (alto teor de matéria orgânica e intermediário de Fe_2O_3) (a), e do horizonte B21 (baixo teor de matéria orgânica e intermediário de Fe_2O_3) (b). As características físico-químicas dos solos estão no quadro 2.

Quadro 2. Características físico-químicas empregadas nas figuras 3, 4 e 5

| Figura | Fe_2O_3 | Carbono | Areia grossa | Areia fina | Silte | Argila |
|--------------------|-----------|---------|--------------|------------|-------|--------|
| g kg ⁻¹ | | | | | | |
| 3a | 213 | 30 | 60 | 230 | 170 | 540 |
| 3b | 8 | 6 | 120 | 720 | 80 | 80 |
| 3c | 53 | 36 | 120 | 330 | 80 | 470 |
| 3d | 59 | 6 | 30 | 290 | 40 | 640 |
| 4a | 104 | 11 | 340 | 190 | 60 | 410 |
| 4b | 27 | 7 | 330 | 460 | 20 | 190 |
| 5a | 59 | 51 | 80 | 90 | 50 | 700 |
| 5b | 81 | 6 | 70 | 80 | 40 | 800 |

CONCLUSÕES

1. As treze classes de solos tropicais estudadas na presente pesquisa podem ser enquadradas em quatro padrões espectrais, definidos principalmente pela forma das curvas.

2. Um mesmo tipo de solo pode ser enquadrado ora num padrão espectral, ora noutro, em função de sua proveniência e conseqüentes características físicas e químicas.

3. Um mesmo tipo de solo pode ter seu horizonte superficial enquadrado em determinado padrão espectral, enquanto seu horizonte subsuperficial pode ser agrupado noutro padrão, em função da intensidade de influência dos "fatores espectrais" (principalmente o teor de óxidos de ferro e o de matéria orgânica).

4. Os "fatores espectrais" de influência mais marcante foram, em ordem decrescente, o teor de óxidos de ferro, o teor de matéria orgânica, o material de origem e a granulometria. Os dois primeiros fatores imprimem influência espectral tão significativa que chegam, quando presentes em certas concentrações, a determinar o enquadramento de um solo em determinado agrupamento espectral.

5. As rochas básicas dão origem aos solos de mais baixo albedo, seguidas das intermediárias e das ácidas, cujos valores de reflexão, em geral, são os mais altos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), o financiamento, fundamental à realização desta pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) a bolsa concedida ao Eng.º-Agr.º Márcio de Morisson Valeriano. Agradecem, ainda, as valiosas observações dos revisores.

LITERATURA CITADA

- ASRAR, G. & DOZIER, J. EOS: science strategy for the Earth Observing System. Woodbury, American Institute of Physics, 1994. 119p.
- BAUMGARDNER, M.F.; KRISTOF, S.J.; JOHANNSEN, C.J. & ZACHARY, A.L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *Proc. Ind. Acad. Sci., West Lafayette*, 79:413-422, 1970.
- BOWERS, S.A. & HANKS, R.J. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci., Baltimore*, 100:130-138, 1965.
- CONDIT, H.R. The spectral reflectance of American soils. *Photogram. Eng., Falls Church*, 36:955-966, 1970.
- CONDIT, H.R. Application of characteristic vector analysis to the spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of American soils. *Appl. Optics, New York*, 11:74-86, 1972.
- COSTA, L.M. Surface soil color and reflectance as related to physico-chemical and mineralogical soil properties. Columbia, University of Missouri, 1979. 154p. (Tese de Doutorado)
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALERIANO, M.M. & OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo. São José dos Campos, INPE/MCT, 1992. 132p.
- EPIPHANIO, J.C.N.; LAMPARELLI, R.A.C.; BERTOLDO, M.A. & FORMAGGIO, A.R. Bandas termal e refletidas do TM/Landsat no estudo do comportamento espectral de três latossolos. São José dos Campos, INPE/MCT, 1987. 33p.
- FORMAGGIO, A.R. Comportamento espectral de quatro solos do Estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e de laboratório. São José dos Campos, INPE, 1983. 110p. (Dissertação de Mestrado)
- FORMAGGIO, A.R. & EPIPHANIO, J.C.N. Reflectance pattern from Brazilian Oxisols and their physical and chemical characteristics. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ISPRS, 16., Proceedings. Kyoto, Japan, ISPRS, 1988. v.27. p.497-505.
- GER (Geophysical Environmental Research Corp.) Mark V Dual Field of View IRIS Manual. New York, 147p. s.d.
- HOFFER, R.M. & JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L., ed. Remote sensing in ecology. Athens, Univ. of Georgia Press, 1969. p. 1-19.
- HUETE, A.R.; JUSTICE, C. & LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sens. Environ., New York*, 49:224-234, 1994.
- HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics, Tulsa*, 42:501-551, 1977.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals. *Mod. Geol., London*, 1:283-300, 1970.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates. *Mod. Geol., London*, 2:23-30, 1971.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectral of minerals and rocks: XI. Sedimentary rocks. *Mod. Geol., London*, 5:211-217, 1976a.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks. XII. Metamorphic rocks. *Mod. Geol., London*, 5:219-228, 1976b.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. *Mod. Geol., London*, 2:195-205, 1971a.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulfides and sulfates. *Mod. Geol., London*, 3:1-14, 1971b.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates. *Mod. Geol., London*, 4:85-106, 1973a.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VII. Acid igneous rocks. *Mod. Geol., London*, 4:217-224, 1973b.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VIII. Intermediate igneous rocks. *Mod. Geol., London*, 4:237-244, 1973c.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IX. Basic and ultrabasic rocks. *Mod. Geol., London*, 5:15-22, 1974.
- IRONS, J.R.; WEISMILLER, R.A. & PETERSEN, G.W. Soil reflectance. In: ASRAR, G. ed. Theory and applications of optical remote sensing. New York, John Wiley, 1989. 734p.
- LABSPHERE, INC. Calibration Certificate (for a spectralon standard). North Sutton, Labsphere, 1991. s.p.
- MADEIRA NETTO, J.S.M. Étude quantitative des relations constituants minéralogiques — réflectance diffuse des latossols brésiliens/application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (region de Brasília). Paris, Université Pierre et Marie Curie, 1991. 260p. (Tese de Doutorado)
- MATHEWS, H.L.; CUNNINGHAM, R.L. & PETERSEN, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison*, 37:421-424, 1973.
- MONTGOMERY, O.L. An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical and genetic characteristics of soils. West Lafayette, Purdue University, 1976. 185p. (Tese de Doutorado)
- MYNENI, R.B.; GANAPOL, B.D. & ASRAR, G. Remote sensing of vegetation photosynthetic and stomatal conductance efficiencies. *Remote Sens. Environ., New York*, 42:217-238, 1992.
- OBUKHOV, A.I. & ORLOV, D.S. Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations. *Sov. Soil Sci., Washington*, 2:174-184, 1964.
- OLIVEIRA, J.B.; MENK, J.R.F. & ROTA, C.L. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Campinas. Rio de Janeiro, FIBGE, 1979.
- OLIVEIRA, J.B.; MENK, J.R.F.; BARBIERI, J.L.; ROTA, C.L. & TREMOCOLDI, W. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Araras. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1982. (Boletim técnico, 71)
- OLIVEIRA, J.B. & PRADO, H. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de São Carlos. II. Memorial descritivo. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1984. (Boletim técnico 98)
- OLIVEIRA, J.B. & PRADO, H. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Ribeirão Preto. II. Memorial descritivo. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1987. (Boletim técnico 7)
- OLIVEIRA, J.B. & PRADO, H. Carta pedológica do Estado de São Paulo: quadrícula de Piracicaba, escala de 1:100.000. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1989.
- OLIVEIRA, J.B. & PRADO, H. Carta pedológica do Estado de São Paulo: quadrícula de Guaiara, escala de 1:100.000. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1991.
- STONER, E.R. Physicochemical, site, and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils. West Lafayette, Purdue University, 1979. (Tese de Doutorado)
- STONER, E.R. & BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J., Madison*, 45:1161-1165, 1981.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; BIEHL, L.L. & ROBINSON, B.F. Atlas of soil reflectance properties. West Lafayette, Purdue University, 1980. 75p.
- VALERIANO, M.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. & OLIVEIRA, J.B. Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil. *Int. J. Remote Sensing, London*, 16:113-128, 1995.