

AVALIAÇÃO ESPECTRAL DE SOLOS DESENVOLVIDOS EM UMA TOPOSEQUÊNCIA DE DIABÁSIO E FOLHELHO DA REGIÃO DE PIRACICABA, SP¹

JOSÉ ALEXANDRE M. DEMATTÊ², ROGÉRIO C. CAMPOS³ e MARCELO C. ALVES⁴

RESUMO - Este trabalho teve como objetivo estudar as alterações de solos desenvolvidos numa topossequência composta por diabásio e folhelho (Piracicaba, SP), e sua relação com os dados espectrais. Ocorrem na topossequência os solos Latossolo Roxo (LR), Latossolo Vermelho-Escuro (LE), Podzólico Vermelho-Escuro (PE), Litossolo (Li) e Aluvial (Al) dos quais foram coletadas amostras a três profundidades. Foram obtidos dados de reflectância bidirecional dessas amostras em laboratório com espectrorradiômetro na faixa de 350 a 2.500 nm. As alterações da reflectância das amostras de solo das camadas superficiais e subsuperficiais foram relacionadas às diferenças nos teores de matéria orgânica e argila, que foram parâmetros importantes na caracterização espectral dos solos. Ao longo da topossequência, ocorreram alterações nas características dos solos, principalmente nos teores de ferro e silte e na mineralogia, que influenciaram nos dados espectrais. Os solos desenvolvidos de diabásio apresentaram altos teores de ferro, o que refletiu em concavidades mais acentuadas nas curvas espectrais em 850 nm, e intensidades de reflectância menores, ao contrário dos solos desenvolvidos de folhelho. A reflectância do PE apresentou-se mais intensa do que o LR e LE. Os solos menos intemperizados Li e Al apresentaram intensidades de reflectância mais elevadas que os mais intemperizados, LR e LE.

Termos para indexação: sensoriamento remoto, radiometria, reflectância, intemperismo.

SPECTRAL REFLECTANCE OF SOILS DEVELOPED ON A TOPOSEQUENCE OF DIABASE AND SHALE IN PIRACICABA, SP, BRAZIL

ABSTRACT - The objective of the present research was to study the spectral reflectance of soils developed on a toposequence composed by diabase and shale, in Piracicaba region, São Paulo State, Brazil. Soil samples were collected at three depths along a transection, as they were, Typic Haplorthox (TH), Rhodic Paleudult (RP), Lithic Distrochrept (L) and Typic Fluvent (TF). Bidirectional spectral reflectance factors of the soil samples were obtained by using a spectroradiometer from 350 to 2,500 nm in laboratory conditions. Spectral alterations observed between the surface and sub-surface layers were related to their organic matter and clay content differences; and these soil parameters were important on the spectral characterization of the soils. Along the toposequence, alterations on the soil characteristics occurred, mainly on iron, silt and mineralogy, that influenced variations of the spectral data. Soils developed by diabase presented higher content of iron, that influenced the spectral curve, with a deeper concavity shape at 850 nm, and lower reflectance intensity, differently of the soils developed by shale. The spectral curves of RP presented higher reflectance intensities from TH. The less weathered soils, L and TF, presented higher reflectance intensity than the more weathered soil, TH.

Index terms: remote sensing, meteorological instruments, weathering.

¹ Aceito para publicação em 26 de janeiro de 2000.

² Eng. Agrôn., Dr., Dep. de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), USP, Av. Pádua Dias, 11, CEP 13 418-900 Piracicaba, SP.
E-mail: jamdemat@carpa.ciagri.usp.br

³ Eng. Agrôn., mestrando, ESALQ-USP. Bolsista da FAPESP.
E-mail: rccampos@carpa.ciagri.usp.br

⁴ Analista de Sistemas, Setor de Informática, ESALQ-USP.
E-mail: macalves@carpa.ciagri.usp.br

INTRODUÇÃO

Uma nação moderna necessita dispor de informações adequadas a respeito dos complexos aspectos inter-relacionados de suas atividades agrícolas, como auxílio à tomada de decisões. O uso do solo é apenas um desses aspectos, mas o seu conhecimento torna-se cada vez mais importante, na medida em que a nação planeja superar os problemas do desenvol-

vimento ao acaso, descontrolado e da deterioração da qualidade ambiental, principalmente devido ao seu uso inadequado. Nesse aspecto, torna-se importante o conhecimento da base do sistema agrícola, o solo.

O desenvolvimento de novos e modernos sensores vêm proporcionando maior exploração científica como contribuição relevante para o estudo dos solos (Madeira Netto, 1996). Essas novas técnicas vêm sendo desenvolvidas para auxiliar o estudo ambiental, onde o conhecimento do comportamento espectral torna-se importante para que os produtos de sensores remotos possam ser utilizados de maneira mais eficiente.

O solo é um dos objetos de maior complexidade desse estudo, principalmente no nível orbital, haja vista a superfície quase sempre recoberta pela vegetação. Contudo, com o advento de sensores remotos, que podem ser utilizados para realizar medições no campo ou em laboratório, formou-se uma importante linha de pesquisa para a caracterização dos solos através de sua energia refletida. O aprofundamento dessas pesquisas no aspecto terrestre poderá auxiliar pesquisas futuras no nível orbital (Huete, 1996), uma vez que se espera a melhoria da qualidade dos dados obtidos com sensores instalados a bordo de satélites pelo fato de sua evolução resultar em ganho de poder de resolução espectral (Asrar & Dozier, 1994).

O estudo de características dos solos por meio de técnicas espectrais, principalmente em laboratório, tem auxiliado técnicos e pesquisadores no seu reconhecimento (Formaggio et al., 1996). Um melhor entendimento de como tais características dos solos atuam na reflectância deve ser buscado cada vez mais e nos mais diferentes ambientes, como mostram os trabalhos de Stoner et al. (1980) e Henderson et al. (1989). Por outro lado, poucos trabalhos relacionaram as alterações de solos numa topossequência com os respectivos dados espectrais, como realizado por Demattê et al. (1998a).

O conhecimento da variabilidade do solo é considerado de grande valia na definição das unidades de mapeamento de solos (Oliveira, 1988). Da mesma forma, o estudo dos solos é extremamente importante no entendimento da sua gênese, que, por sua vez, irá auxiliar no seu diagnóstico (Demattê & Marconi, 1991). Em termos de sensoriamento remoto, porém,

verifica-se que muitos trabalhos atuam mais na caracterização espectral dos solos (Formaggio, 1983; Epiphany et al., 1992), sem, entretanto, estabelecer relações com as características genéticas do solo (que variam ao longo do relevo) e sua energia refletida. Portanto, o desenvolvimento de técnicas que venham a contribuir na avaliação de solos ao longo de vertentes, mostra-se como uma importante contribuição para a comunidade, pois poderá auxiliar em levantamentos de solos.

Sabendo-se que as características dos solos variam numa paisagem (Demattê & Marconi, 1991) e que tais características afetam os dados espectrais (Demattê, 1995), supõe-se que a análise da reflectância seja capaz de detectar as alterações dos solos numa topossequência.

O presente trabalho teve por objetivos caracterizar e avaliar os solos desenvolvidos ao longo de uma topossequência composta por diabásio e folhelho da região de Piracicaba, com base em dados espectrais obtidos por espectrorradiômetro em laboratório.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área e delineamento do experimento

A área em que se encontra a topossequência (Fig. 1) está localizada no Estado de São Paulo, na região de Piracicaba, em uma longitude de 47°35' 0"W e uma latitude de 22°40' 0"S. A composição geológica é o diabásio da formação Serra Geral e o folhelho da formação Irati. O clima é o CWA (Köppen), tropical com inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média anual é de 1.200 mm, e a temperatura média é de 21,4°C (Sentelhas et al., 1998).

Os solos foram classificados (Camargo et al., 1987; Estados Unidos, 1990), como: Latossolo Roxo (LR) distrófico textura muito argilosa (Typic Haplorthox), Latossolo Vermelho-Escuro (LE) eutrófico textura muito argilosa (Typic Haplorthox), Podzólico Vermelho-Escuro (PE) distrófico textura muito argilosa (Rhodic Paleudult), Litossolo (LI) distrófico textura média (Lithic Distochrept), Aluvial (Al) eutrófico textura argilosa (Typic Fluvent).

De acordo com a Embrapa (1999), os solos são classificados como LR-Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso, LE-Latossolo Vermelho eutrófico, PE-Argissolo Vermelho distrófico, Li-Neossolo Litólico distrófico, Al-Neossolo Flúvico Tb eutrófico.

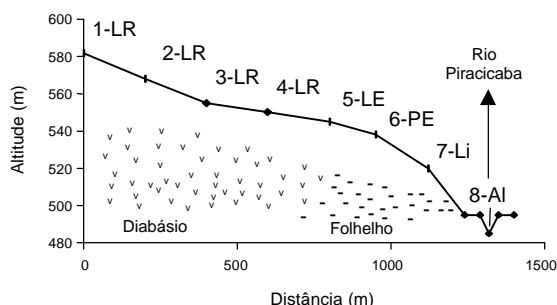


FIG. 1. Esquema da toposeqüência e a posição das amostragens de solo.

Foi estabelecido um transecto na toposeqüência desde a cota mais alta até a mais baixa, numa distância de 1.240 m, no qual amostras de solos foram coletadas em três profundidades, 0-20, 40-60 e 80-100 cm, e distanciadas entre si em aproximadamente 150 metros. Foram abertos perfis de solos em locais de melhor representação das classes de solos presentes na área, para a sua classificação (Lemos & Santos, 1996).

Análise de solos

Nas amostras de solos foram realizadas análises químicas, a saber: pH (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹), matéria orgânica (método colorimétrico), fósforo (resina trocadora de ânions), cálcio, magnésio e potássio (resina trocadora de cátions), alumínio (extrator KCl, 1 mol L⁻¹) e hidrogênio mais alumínio (solução tamponada SMP de acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0) (Raij et al., 1987). Pela análise granulométrica, foram determinadas areia, silte e argila (Camargo et al., 1986). O ferro total foi determinado pelo ataque sulfúrico (Camargo et al., 1986) e o Ki pela relação molecular SiO₂/Al₂O₃. Para caracterização dos solos, foram realizadas análises mineralógicas da fração argila (Jackson, 1969).

Obtenção dos dados espectrais

Para a obtenção dos dados espectrais, foi utilizado o sensor Infra-Red Intelligent Spectroradiometer, IRIS (Geophysical & Environmental Research Corporation, 1996), que recobre a faixa espectral entre 350 e 2.500 nm em laboratório. As amostras de solos foram secadas em estufa a 45°C por 24 horas, moídas e peneiradas (malha de 2 mm), para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade (Epiphanyo et al., 1992). Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em placas de Petri e iluminadas por uma lâmpada halógena de 650 W. Utilizou-se

uma placa padrão, com 100% de reflectância calibrada pela Labsphere (1996). A geometria utilizada foi: 61 cm lâmpada-alvo e alvo-sensor: 27 cm. Posteriormente, os dados passaram por um software (Conviris), que calibrou os dados da placa de referência e realizou uma filtragem destes, eliminando o excesso de ruídos, para facilidade de interpretação (Demattê et al., 1998c). A relação entre a energia refletida pelo alvo e a energia refletida pela placa de referência gerou o fator de reflectância bidirecional (Nicodemus et al., 1977). Foram realizadas três leituras em cada amostra, sendo utilizada a curva espectral média nas discussões.

Análise descritiva das curvas espectrais

Para as análises descritivas das curvas espectrais foram avaliadas as seguintes características: a) tipo de curva: realizado pela comparação descritiva entre as curvas espectrais obtidas por Stoner & Baumgardner (1981); b) inclinação: determinada pela utilização de um transferidor, por meio do qual mediu-se o ângulo formado pela curva espectral e uma reta traçada perpendicularmente ao eixo “x” (comprimento de onda). Esses valores foram obtidos em relação às bandas centradas em 400, 500, 600 e 1.600 nm (Fig. 2a). A escolha dessas bandas deveu-se ao fato de estarem posicionadas em locais que permitem diagnosticar a inclinação da curva ao longo de todo o espectro óptico; c) intensidade das bandas: nos intervalos de 400 a 600 nm e 780 a 1.000 nm, foi avaliada a intensidade de absorção na curva espectral, utilizando-se os parâmetros: concavidade forte, média, fraca, ou nula, e convexidade forte, média, fraca ou nula (Fig. 2b). Além disso, nas bandas de absorção centradas em 1.400, 1.900, 2.200, 2.265 e 2.365 nm, foram estabelecidos parâmetros comparativos da intensidade de absorção, sendo elas designadas como: nula, muito fraca, fraca, fraca moderada, moderada, moderada intensa ou intensa.

Análise estatística dos dados espectrais

Com o objetivo de definir grupos homogêneos mediante a união de células em função de seus valores quantitativos, foi utilizada a análise de agrupamentos ou “Cluster Analysis” (Average Linkage), utilizando o Statistical Analysis System (SAS Institute, 1989). A análise de agrupamentos consiste numa variedade de técnicas e algoritmos cujo objetivo é o de separar unidades em grupos semelhantes. Curi (1983) menciona que cada indivíduo pertence a uma amostra multivariada e pode ser considerado como um ponto dentro de um espaço euclidiano multidimensional, quando são realizadas em uma unidade diversas medidas. O presente método foi escolhido pela

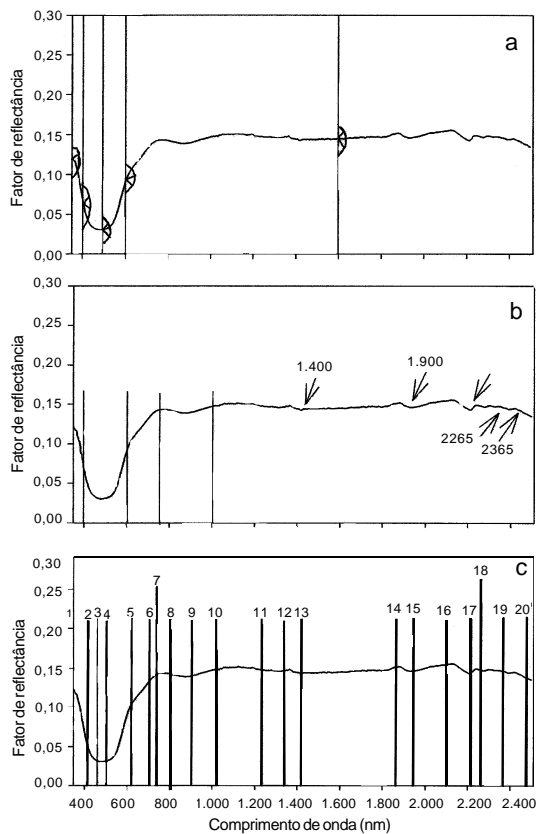


FIG. 2. Esquematização da metodologia aplicada na avaliação das curvas espectrais: a) comprimentos de onda onde foram avaliadas as angulações; b) faixas espectrais e bandas de absorção onde foram avaliadas as intensidades de absorção; c) comprimentos de onda (nm) cujos valores de reflectância foram utilizados para agrupamento estatístico das curvas (análise de cluster), sendo: 1 (350), 2 (405), 3 (460), 4 (540), 5 (611), 6 (710), 7 (750), 8 (800), 9 (901), 10 (1.026), 11 (1.240), 12 (1.376), 13 (1.414), 14 (1.860), 15 (1.923), 16 (2.129), 17 (2.211), 18 (2.253), 19 (2.281) e 20 (2.498).

possibilidade de construção de grupos hierárquicos e aglomerativos, onde, por meio de fusões sucessivas dos n objetos, vão sendo obtidos $n-1$, $n-2$, ..., grupos, até que todos os objetos sejam reunidos em um grupo. Essa análise consistiu em avaliar, comparativamente, os dados espectrais das amostras de solos, verificando as semelhanças e as diferenças estatisticamente. Para tanto, primeira-

mente foram determinadas, mediante avaliação de todas as curvas espectrais dos solos, as principais bandas que poderiam auxiliar na sua discriminação, bem como indicar as tendências da forma das curvas. Os comprimentos de onda (nm) escolhidos recobrem todo o espectro eletromagnético e as bandas de absorção, e estão representados na Fig. 2c. Nessa análise, participaram os fatores de reflectância de cada amostra de solo, das três profundidades. A partir disso, o programa analisou os fatores de reflectância e realizou o agrupamento (clusters) das curvas dos solos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização espectral dos solos

Normalmente o LR está localizado nas cotas mais altas, com relevo plano a suave ondulado, sem gradiente textural e boa micro-agregação. São solos profundos, intemperizados e muito argilosos (Tabela 1). O LE é muito similar ao LR, diferindo basicamente no teor de ferro. O PE é caracterizado por apresentar um horizonte A moderado e horizonte B textural, e ocorrem em relevos ondulados. Os Li, por sua vez, são solos rasos, com, no máximo, 50 cm de profundidade e seqüência de horizontes A, C e R. Os Al ocorrem nas margens do rio Piracicaba e foram formados por deposição de sedimentos (Fig. 1).

Basicamente, os LR e os LE apresentaram curvas espectrais do Tipo 5, grupo caracterizado por solos com elevado teor de óxidos de ferro e textura argilosa, de acordo com Stoner & Baumgardner (1981), e Epiphanyo et al. (1992). Descritivamente, a avaliação dos ângulos de inclinação das curvas espectrais em faixas específicas do espectro óptico mostrou variações entre os solos. As inclinações em 500 nm (Tabela 2) apresentaram valores mais elevados em relação aos LR e LE, na faixa de 70 a 83 graus, e no Li e Al, de 37 a 55 graus. Isto ocorreu justamente devido à maior absorção de energia em razão dos teores de ferro mais elevados no LR e LE (Tabela 1). Isto é ratificado pela análise descritiva da forma e intensidade de absorção. Na faixa espectral entre 780 e 1.000 nm, as concavidades do LR e LE foram classificadas como fraca a média, passando a convexidades fraca ou até nula no Li e no Al.

Os LR apresentaram reflectância baixa entre 0,03 e 0,15 (Fig. 3a), não apresentando tendência a aumentar ao longo do espectro estudado (350 a

TABELA 1. Análise química e granulométrica das amostras de solos coletadas na topossequência.

Solo ¹	Amostra	Profundidade (cm)	M.O. (g kg ⁻¹)	SB ----- (mmol _c kg ⁻¹)	Ca	T	V	m	Granulometria			Cor úmida (Munsell)	Fe ₂ O ₃ ----- (g kg ⁻¹)	Ki
									Areia	Silte	Argila			
LR-d-mg	1A	0 – 20	29	38,6	23	78,6	49	5	130	120	750	2.5 YR 3 / 4	219,0	1,6
	1B	40 – 60	27	19,5	13	61,5	32	13	120	120	760	2.5 YR 3 / 3	- ³	-
	1C	80 – 100	19	17,9	11	43,9	41	0	140	100	760	2.5 YR 3 / 3	204,1	1,5
LR-e-mg	2A	0 – 20	32	66,5	39	106,5	62	0	120	140	740	2.5 YR 3 / 2	186,1	1,4
	2B	40 – 60	19	38,1	28	66,1	58	0	30	110	860	2.5 YR 3 / 3	-	-
	2C	80 – 100	17	25,4	18	41,4	61	0	260	110	630	2.5 YR 3 / 4	186,6	1,2
LR-d-mg	3A	0 – 20	34	26,9	17	76,9	35	13	140	120	740	2.5 YR 3 / 2	186,3	1,5
	3B	40 – 60	27	20,1	14	80,1	25	31	90	130	780	2.5 YR 3 / 3	-	-
	3C	80 – 100	24	14,5	10	74,5	19	41	120	100	780	2.5 YR 3 / 3	174,3	1,5
LR-d-mg	4A	0 – 20	37	34,2	19	95,2	36	8	110	130	760	2.5 YR 3 / 4	171,1	1,3
	4B	40 – 60	22	10,3	7	60,3	17	54	110	110	780	2.5 YR 3 / 4	-	-
	4C	80 – 100	22	15,4	11	45,4	34	28	120	110	770	2.5 YR 3 / 4	161,4	1,5
LE-e-mg	5A	0 – 20	24	37,3	24	67,3	55	5	250	130	620	2.5 YR 3 / 4	114,8	1,4
	5B	40 – 60	19	24,3	18	64,3	38	0	180	100	720	2.5 YR 3 / 4	-	-
	5C	80 – 100	14	17,2	13	29,2	59	0	220	100	680	2.5 YR 3 / 6	110,2	1,5
PE-d-g	6A	0 – 20	12	21,4	14	39,4	54	16	430	200	370	2.5 YR 4 / 2	42,7	1,6
	6B	40 – 60	12	19,5	16	47,5	41	32	260	150	590	2.5 YR 5 / 6	-	-
	6C	80 – 100	9	9,6	6	47,6	20	70	190	180	630	2.5 YR 4 / 4	53,4	2,1
Li-d-md	7A ²	0 – 20	24	20,4	14	58,4	35	31	430	280	290	5 YR 3 / 2	30,2	2,0
	7B	40 – 60	12	18,8	13	48,8	39	30	440	270	290	5 YR 4 / 2	19,3	2,2
Al-e-g	8A	0 – 20	24	13,7	9	49,7	28	37	500	260	240	5 YR 4 / 2	39,5	2,2
	8B	40 – 60	12	49,7	23	67,7	73	0	340	230	430	5 YR 4 / 4	-	-
	8C	80 – 100	9	74,5	35	90,5	82	0	240	220	540	5 YR 4 / 4	38,6	2,0

¹ LR: Latossolo Roxo; LE: Latossolo Vermelho-Escuro; PE: Podzólico Vermelho-Escuro; Li: Litosolo; Al: Aluvial; d: distrófico; e: eutrófico; md: média; g: argiloso; mg muito argiloso.

² Solo raso, amostra de solo detectada até 60 cm.

³ Não analisado.

TABELA 2. Descrição das curvas espectrais das amostras de solos da topossequência.

Solo ¹	Tipo ²	Inclinação das bandas, em graus				Forma e Intensidade das bandas ³		Intensidade nas bandas ⁴			
		400	500	600	1600	400 a 600	780 a 1.000	1.400	1.900	2.200	2.265
----- (nm) -----											
LR-1A	5	150	83	45	89	cfr	cfr	mf	mf	f	mf
LR-1C	5	148	80	45	90	cfr	cfr	mf	mf	f	n
LR-2A	5	148	77	51	89	cfr	cfr	mf	mf	f	mf
LR-2C	5	144	76	49	87	cfr	cm	mf	mf	f	mf
LR-3A	5	157	81	62	87	cfr	cm	mf	mf	f	mf
LR-3C	5	154	78	59	89	cfr	cm	mf	mf	f	mf
LR-4A	5	142	71	49	88	cfr	cfr	mf	mf	f	mf
LR-4C	5	131	76	52	89	cfr	cm	mf	mf	f	mf
LE-5A	5	157	79	44	89	cm	cfr	f	f	fm	mf
LE-5C	5	149	70	48	89	cm	cm	f	f	fm	mf
PE-6A	5	150	48	48	90	cm	cn	f	f	m	mf
PE-6C	5	156	44	50	90	cft	cfr	mf	mf	mi	mf
Li-7A	2	158	53	50	89	cfr	cvfr	f	f	mi	n
Li-7B	2	156	55	42	88	cm	cn	mf	f	f	mf
Al-8A	2	155	51	51	82	cfr	cfr	mf	fm	fm	n
Al-8C	5	156	37	49	91	cft	cn	mf	mi	mi	n

¹ LR: Latossolo Roxo; LE: Latossolo Vermelho-Escuro; PE: Podzólico Vermelho-Escuro; Li: Litosolo; Al: Aluvial; A, B e C: 0 - 20, 40 - 60 e 80 - 100 cm de profundidade, respectivamente.

² Tipos de curvas de acordo com Stoner & Baumgardner (1981).

³ cm: concavidade média; cfr, concavidade fraca; cft: concavidade forte; cn: concavidade nula.

⁴ mf: muito fraca; f: fraca; fm: fraca moderada; m: moderada; mi: moderada intensa; i: intensa, n: nula.

2.500 nm), o que está de acordo com observações de Epiphanyo et al. (1992), quanto aos LR de São Paulo, e Demattê & Garcia (1999) quanto aos LR do Paraná. Os altos teores de ferro (Tabela 1) contribuíram para isso, considerando que este atributo absorve energia (Mathews et al., 1973). Além disso, a presença de magnetita, que é comum nestes solos, contribuiu com a baixa intensidade de reflectância no visível e no infravermelho (Hunt et al., 1971). A forma côncava da curva espectral em 850 nm indicou a presença de óxidos de ferro, o que concorda com Vitorello & Galvão (1996).

As feições em 1.400 nm (devidas às vibrações das moléculas de água e grupos OH⁻) apresentaram-se como muito fracas a fracas, enquanto que em

1.900 nm (devida principalmente a água, Lindberg & Snyder, 1972), foram muito fracas em LR e LE, passando a moderadas nos Li e Al (Tabela 2). O fato de as bandas nos LR e LE serem menos acentuadas (Figs. 4, 5 e 6) está ligado aos maiores teores de minerais opacos, como a magnetita e a ilmenita, que não apresentam feições espectrais e têm reflexão muito baixa, podendo mascarar feições de absorção (Hunt et al., 1971). Na medida em que este mineral opaco diminui no Li e no Al, essas bandas ficam mais pronunciadas (Fig. 7).

Por outro lado, a mineralogia também influi. Os argilominerais caulinita, montmorilonita e vermiculita apresentam estrutura e adsorção de mo-

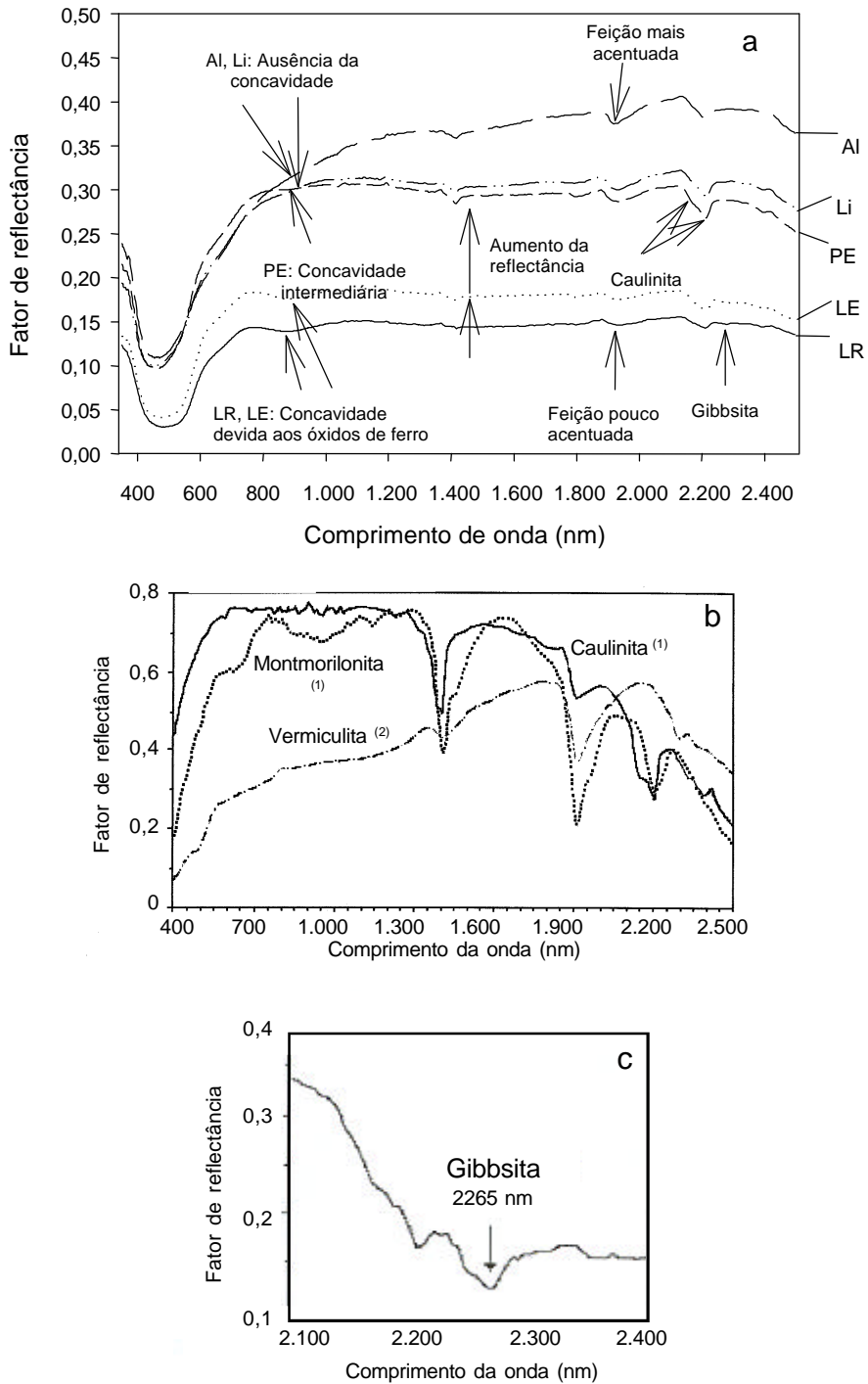


FIG. 3. a) Curvas espectrais médias das amostras de solo na profundidade de 0 a 20 cm; b) (1) curvas da montmorilonita e caulinita (Demattê, 1995); (2) curva da vermiculita (Grove et al., 1992); c) Curva da gibbsita (Madeira Netto, 1996).

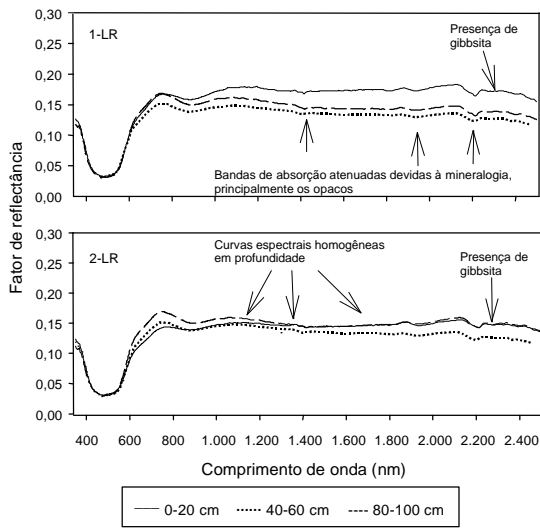


FIG. 4. Curvas espectrais individuais do Latossolo Roxo (1-LR e 2-LR).

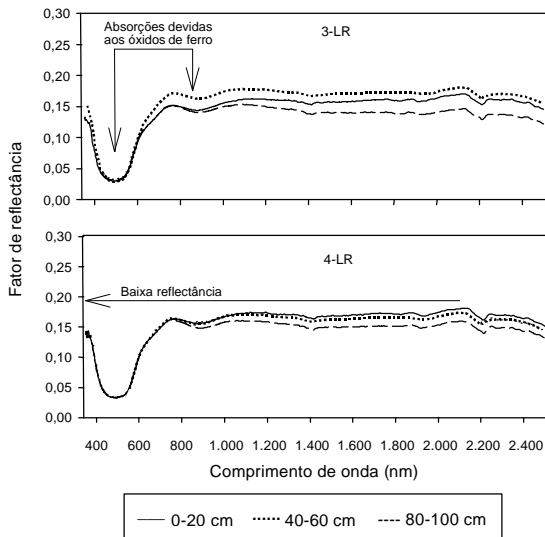


FIG. 5. Curvas espectrais individuais do Latossolo Roxo (3-LR e 4-LR).

léculas de água diferentes (Dixon & Weed, 1977), e atuam diferenciadamente na banda em 1900 nm (Demattê et al., 1998d). Os solos Al e Li apresentaram vermiculita e micas em sua composição, detectada pelos difratogramas de raios-X, enquanto o PE,

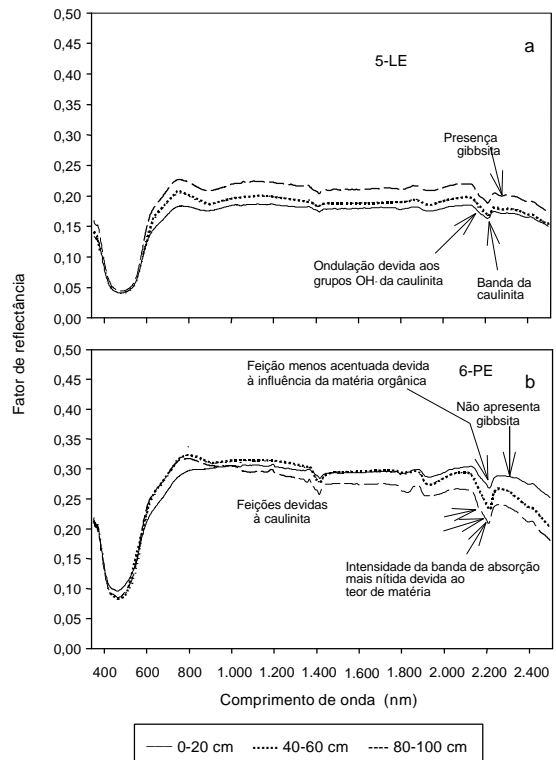


FIG. 6. Curvas espectrais individuais do Latossolo Vermelho-Escuro (5-LE) e do Podzólico Vermelho-Escuro (6-PE).

LR e LE, não. De acordo com Grove et al. (1992), a vermiculita promove feições de absorção pronunciadas em 1900 nm (Fig. 3b). Isso explica as feições mais pronunciadas no Li e Al em relação aos outros solos, e são mais evidentes nas amostras de sub-superfície (Figs. 4 a 7).

A presença de caulinita é determinada pela banda de absorção em 2.200 nm (Demattê et al., 1995), com o formato característico de uma “ondulação”, e foi detectada nas curvas de todos os solos (Fig. 3a e 3b) com comprovação pela análise de raios-X com picos em 0,72 e 0,36. Tal absorção ocorre devido à presença dos grupos OH⁻ deste mineral, amplamente comprovado por trabalhos como os de Lindberg & Snyder (1972), Riazza (1993), Demattê (1995) e Demattê et al. (1998c). A nitidez da “ondulação” é bem evidente na curva do mineral puro (Fig. 3b), e menos evidente quando analisada em

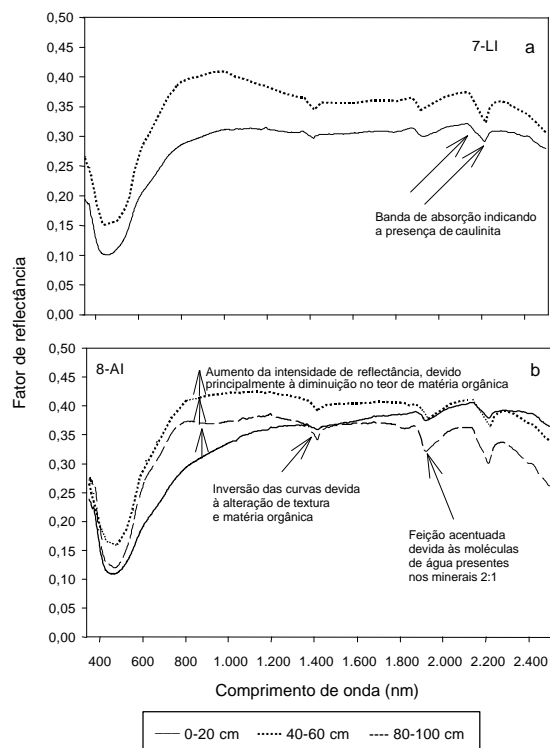


FIG. 7. Curvas espectrais individuais do Litossolo (7-Li) e do Aluvial (8-Al).

amostras de solo (Fig. 3a), justamente devido à variabilidade mineralógica de cada solo, ou, ainda, devido à presença de matéria orgânica, que pode mascarar esta feição na camada de 0-20 cm.

A ocorrência de óxidos de alumínio, como a gibbsita promove feição em 2.265 nm (Fig. 3c), de acordo com Madeira Netto (1996), e foi detectada nas curvas espectrais do LR e LE (Figs. 4 e 6), não aparecendo no PE, Li e Al (Figs. 6 e 7), o que foi comprovado pelas análises de raios-X.

O PE não se diferenciou dos LE e LR em termos descritivos, de acordo com Stoner & Baumgardner (1981), e apresenta curvas do Tipo 5. Por outro lado, a inclinação da curva demonstra valores menores, na faixa de 48 graus, contra 70 a 83 dos LR e LE (Tabela 2). Além disso, a concavidade do PE entre 780 e 1.000 nm foi caracterizada como nula a fraca, caracterizando os maiores valores de ferro no LR e LE (Tabela 1), e sua intensidade de reflectância foi sempre maior que no LR e LE.

Os Li e os Al apresentaram curvas do Tipo 2, característica de solos com baixos teores de ferro (Stoner & Baumgardner, 1981). Além disso, o formato da curva do Al é bem diferente dos outros solos, apresentando fator de reflectância em ascendência dos 450 aos 2.500 nm (Fig. 7).

Amostras de solos em profundidade

A caracterização de solos num levantamento pressupõe a avaliação das amostras em profundidade. Portanto, para caracterização dos solos, também foram analisadas as curvas espectrais de amostras de diferentes profundidades (Figs. 4 a 7).

O LR apresentou curvas espectrais extremamente semelhantes (Figs. 4 e 5). Em alguns casos (amostras 2, 3 e 4), verificou-se que camadas da subsuperfície (80-100 cm) apresentaram intensidades de reflectância mais elevadas em relação às camadas de superfície em parte do espectro eletromagnético. Os teores de Fe₂O₃ e argila entre as camadas da superfície e subsuperfície praticamente não variaram nos LR (Tabela 1). Por outro lado, os teores de matéria orgânica foram mais baixos na camada de 80 a 100 cm. Assim, entre 550 e 1.900 nm, a intensidade de reflectância aumentou da amostra da superfície para a mais profunda, devido ao menor teor de matéria orgânica em subsuperfície, concordando com Coleman & Montgomery (1987). Fato semelhante ocorreu com os LE (Fig. 6a).

No Al, por sua vez, o fato foi mais pronunciado (Fig. 7a), pois a amostra de solo coletada entre 80 e 100 cm de profundidade obteve maior intensidade de reflectância numa faixa espectral maior. Especificamente no caso do Li (profundidade 40-60 cm), o fato se explica por que a diferença de matéria orgânica entre as duas camadas chega a 100% e o Fe₂O₃ a 60%, diferença bem maior que no LR (Tabela 1). Além disso, os elevados valores de Fe₂O₃, TiO₂ e Al₂O₃, comum nos LR apresentam maior correlação negativa com a reflectância em relação à matéria orgânica (Galvão et al., 1997), explicando por que as curvas em profundidade são mais semelhantes nestes solos.

A análise descritiva (Stoner & Baumgardner, 1981) entre amostras de terra em diferentes profundidades (Tabela 2) não diagnosticou diferenças, com exceção do Al, onde na camada superficial foi do

Tipo 2, e em subsuperfície foi do Tipo 5. Tal fato está diretamente relacionado à diminuição de 24 g kg^{-1} para 9 g kg^{-1} de matéria orgânica e pouca variação nos teores de ferro (Tabela 1). Portanto, na camada superficial, a matéria orgânica mascarou a feição devida ao ferro, ao passo que em subsuperfície o efeito do ferro sobressaiu (Fig. 7b). O efeito de atenuação de feições das curvas da camada superficial também pode ser visualizado nas bandas em 1900 e 2200 nm devido à mineralogia do PE (Fig. 6b).

A faixa de comprimento de onda em que atua a matéria orgânica ainda deve ser melhor explorada (Demattê et al., 1998d). Coleman & Montgomery (1987) verificaram sua atuação entre 400 e 1.200 nm. Por outro lado, em estudos de tratamento químico de amostras de terra, Demattê & Garcia (1999) verificaram que a remoção de matéria orgânica de amostras do LR provocou aumento na intensidade de reflectância entre 400 e 2.500 nm, fato anteriormente observado por Madeira Netto (1996). Galvão et al. (1997) concluíram que as diferenças entre as intensidades da reflectância da camada da superfície para as da subsuperfície estão associadas às inter-relações nos teores de matéria orgânica e outros componentes do solo, como a textura. Nesse caso, da camada da superfície para a da subsuperfície tende a ocorrer um aumento da reflectância no visível, devido à diminuição do teor de matéria orgânica, e tende a decrescer no infravermelho próximo, devido ao aumento no teor da fração argila. Tal observação poderia explicar por que Demattê (1995) verificou que em solos muito argilosos ocorre aumento de reflectância em superfície (com maior teor de matéria orgânica) para a segunda camada (com pouca matéria orgânica) na faixa entre 400 a 1.200 nm. Além disso, isso explicaria as observações em profundidade aqui verificadas (Figs. 4 a 7). Um caso típico pode ser verificado nas curvas espectrais do Al (Fig. 7b). O teor de matéria orgânica das camadas 0-20, 40-60 e 80-100 cm diminui, da mesma forma que o teor de argila aumenta (Tabela 1). Nesta seqüência (camada A para B para C), observou-se que a intensidade de reflectância no visível aumenta, enquanto no infravermelho diminui, ocorrendo uma inversão de intensidades entre as curvas.

Alteração das características dos solos ao longo da toposseqüência e sua relação com dados espectrais

O LR encontrou-se na cota mais alta da toposseqüência, vindo a seguir os LE (Fig. 1). Da amostra 1 para amostra 4 do LR, todas as curvas são muito semelhantes, confundindo-se inclusive com a amostra 6 do LE, embora esta tenha valores de reflectância maiores (Figs. 4 a 6). Ambos são muito argilosos e cor igual, com teores de Fe_2O_3 mais elevados que os outros solos e cor igual (2,5 YR), gerando curvas espectrais semelhantes (Fig. 3a). Apesar disso, notou-se pequeno aumento na intensidade de reflectância do LR para o LE, e pode ser explicado pela diminuição no teor de ferro (Tabela 1), concordando com Epiphanyo et al. (1992) e Formaggio et al. (1996). Nesses casos, o teor de ferro configurava-se como um dos importantes atributos que estão influenciando, haja vista que os LR, por definição classificatória (Camargo et al., 1987), apresentam teores mais elevados.

O solo seguinte da seqüência, o PE, apresentou teor de ferro baixo (Tabela 1), contribuindo para um aumento na intensidade de reflectância em relação ao LR e LE (Fig. 3a). Aliás, Demattê et al. (1998a) verificaram que o ferro foi um fator importante que explicou as variações no comportamento espectral de solos numa toposseqüência da região de Piracicaba.

Na toposseqüência, à medida que passamos do diabásio em direção ao folhelho, o teor de ferro diminuiu, e o teor de silte aumentou (Fig. 1, Tabela 1), além de ocorrer uma diminuição dos minerais opacos, como a magnetita. A presença desses minerais influencia na diminuição das intensidades de reflectância (Hunt et al., 1971), assim como o silte foi um dos atributos mais importantes que influenciaram a reflectância para Mathews et al. (1973). De fato, o Li e o Al apresentaram os teores de silte mais elevados da seqüência (Tabela 1), enquanto o PE ficou numa faixa intermediária, justificando sua semelhança (em termos de intensidade) com o Li. Demattê & Garcia (1999) verificaram que os altos teores de silte presentes nos Brunizém Avermelhados, foi um dos fatores que influenciaram sua maior intensidade de reflectância em relação ao LR. Os baixos teores de ferro e minerais opacos e os altos teores de silte presentes no Li e Al foram importantes fatores que influenciaram a maior intensidade de reflectância

em relação ao LR e LE (Fig. 3a). Essas observações concordam com Galvão et al. (1997), para os quais os LR, desenvolvidos de basalto, apresentaram reflectância mais baixas que Cambissolos.

Demattê & Garcia (1999) verificaram a existência de correlação entre o intemperismo de solos desenvolvidos de basalto e a intensidade de reflectância. Os solos LR e LE apresentam-se como os mais intemperizados da seqüência, caracterizados pelos menores valores de K_i (Moniz, 1973), e menor relação silte/argila (Vambek, 1962), vindo a seguir os Li e os Al (Tabela 1). Nesta seqüência, os LR e LE apresentaram intensidades de reflectância bem menores (na faixa de 0,14 a 0,16 de fator de reflectância) contra valores bem maiores para os Li e Al (na faixa de 0,29 a 0,4 de fator de reflectância), conforme apresentado na Fig. 3a, o que concorda com observações preliminares de Demattê & Garcia (1999). Além disso, verificou-se que, na medida em que passamos dos solos mais intemperizados, com mineralogia oxídica e caulínica, nos solos mais jovens, com minerais 2:1 e caulinita, ocorrem alterações nas feições de absorção em decorrência desses atributos.

O Li, bem próximo do material de origem folhelho (Fig. 1), e com elevado teor de silte (Tabela 1), foi caracterizado pela inexistência da concavidade em 850 nm (Fig. 7a) devida, basicamente, aos óxidos de ferro (Vitorello & Galvão, 1996), pouco comuns nestes solos.

A textura também é um fator importante na variação das características dos solos ao longo da toposseqüência. Hunt & Salisbury (1971) descreveram que o quartzo apresentou alta intensidade de reflectância, enquanto Al-Abbas et al. (1972) verificou que solos argilosos absorvem mais energia que os solos arenosos. Além disso, White et al. (1997) verificaram os altíssimos valores de reflectância obtidos pelo quartzo, chegando a 80%, sem nenhum tipo de feição de absorção. Nesse caso, o Al foi o solo que apresentou os teores mais elevados de areia, cuja composição predominante é o quartzo, apresentando maior intensidade de reflectância (Fig. 3a), contra as menores intensidades dos solos argilosos. Além disso, verificou-se que o solo com maior teor de areia (com presença de quartzo), apresenta a tendência de aumento da intensidade de reflectância num sentido ascendente, de 600 a 2.500 nm, enquan-

to os solos mais argilosos (com presença de magnetita) possuem uma tendência nula quase horizontal. Os resultados indicam a influência desses componentes nas variações da reflectância.

Suliman (1989) verificou a influência de componentes do calcário na maior refletividade dos solos. Posteriormente, Demattê et al. (1998b) concluíram que o cálcio apresentou refletividade positiva em solos. A maioria das amostras (Tabela 1) apresenta teores de cálcio variáveis. O PE, o Li e o Al, com intensidades de reflectância maiores que os LR e os LE (Fig. 3a), apresentam o cálcio com os menores valores na camada superficial (Tabela 1). Isso indica que, apesar de o cálcio influenciar positivamente a reflectância, a porcentagem dessa influência é pequena para estes solos, onde os elementos mineralógicos e orgânicos estão predominando.

Estatisticamente, a "análise de cluster" determinou quatro grupos de solos, sendo respectivamente, grupo 1 do Li, grupo 2 do Al, grupo 3 do PE e grupo 4 dos LR+LE. Ou seja, os solos LR e LE foram considerados como os mais semelhantes espectralmente, sendo a maioria dos outros solos estudados pertencentes a grupos diferentes. Aliás, conforme demonstrado anteriormente, os LR e LE apresentaram-se como os mais homogêneos entre si, apesar das pequenas diferenças na intensidade de reflectância. De acordo com Coleman & Montgomery (1987), Coleman et al. (1991) e Demattê & Garcia (1999), os dados espectrais, avaliados estatisticamente, têm boa potencialidade em auxiliar na determinação de grupos de solos.

CONCLUSÕES

1. A matéria orgânica, os teores de ferro, areia, silte e argila são os atributos que mais influem nos dados espectrais; as alterações das curvas espectrais em amostras superficiais e subsuperficiais de solos são decorrentes dos teores de matéria orgânica e argila, tendo sido importantes na sua caracterização.

2. Ao longo da toposseqüência, ocorrem alterações nas características dos solos que influenciam a forma, as feições de absorção, e a intensidade das curvas espectrais, detectadas pelas análises descritivas e estatísticas.

3. Os solos desenvolvidos do diabásio apresentam altos teores de ferro, o que se reflete em concavidades mais acentuadas nas curvas espectrais em 850 nm, e intensidades de reflectância menores, ao contrário dos solos desenvolvidos de folhelho.

4. Os solos menos intemperizados, Litossolo e Aluvial, apresentam intensidade de reflectância e feições de absorção diferentes das dos desenvolvidos de diabásio, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro, devido às diferenças na sua composição.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo apoio na aquisição do sistema sensor IRIS, e pela bolsa de Iniciação Científica do segundo autor; ao CNPq, pela bolsa de Pesquisador do primeiro autor (respectivamente processos números 95/6259-6; 97/05530-3; 300371/96-9 (RN)); a Denise Carrano, por ceder a fazenda Santa Rita, onde foi realizado o trabalho.

REFERÊNCIAS

- AL-ABBAS, A.H.; SWAIN, P.H.; BAUMGARDNER, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.114, p.477-485, 1972.
- ASRAR, G.; DOZIER, J. **EOS**: science strategy for earth observing system. Woodbury : American Institute of Physics, 1994. 119p.
- CAMARGO, M.N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.11-33, 1987.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas : IAC, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).
- COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L.; GAO, T.; PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, Baltimore, v.151, p.355-361, 1991.
- COLEMAN, T.L.; MONTGOMERY, O.L. Soil moisture, organic matter, and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.53, p.1659-1663, 1987.
- CURI, P.R. A similaridade na análise de agrupamento: coeficientes de correlação e de distância. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 35, n.11, p.1678-1685, 1983.
- DEMATTÊ, J.A.M. **Relações entre dados espectrais e características físicas, químicas e mineralógicas de solos desenvolvidos de rochas eruptivas**. Piracicaba : ESALQ, 1995. 265p. Tese de Doutorado.
- DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.63, n.2, p.337-342, 1999.
- DEMATTÊ, J.A.M.; COOPER, M.; MAULE, R.F.; FIORIO, P.R. Soil characterization and discrimination on a toposequence over diabase through their reflected energy. In: **WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE**, 16., 1998, Montpellier. [Proceedings]. Montpellier : ISSS-AISS-IBG-SICS, 1998a. CD-ROM.
- DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J.; PROCHNOW, L.I. Variações induzidas de atributos químicos e sua influência na reflectância espectral de três solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.3, p.479-490, 1998b.
- DEMATTÊ, J.A.M.; MAFRA, L.; BERNARDES, F.F. Comportamento espectral de materiais de solos e de estruturas biogênicas associadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.4, p.621-630, 1998c.
- DEMATTÊ, J.A.M.; SOUSA, A.A.; NANNI, M.R. Avaliação espectral de amostras de solos e argilominerais em função de diferentes níveis de hidratação. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 9., 1998, Santos. **Anais**. Santos: INPE/SELPER, 1998d. CD-ROM.
- DEMATTÊ, J.L.I.; MARCONI, A. A drenagem na mineralogia de solos desenvolvidos de diabásio em Piracicaba (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.1-8, 1991.

- DIXON, J.B.; WEED, S.B. **Minerals in soil environments**. Madison : Soil Science Society of America, 1977. 948p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília : Embrapa-SPI, 1999. 412p.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Agency for International Development. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Keys to soil taxonomy**. 4.ed. Blacksburg, 1990. 422p. (SMSS Technical Monograph, 19).
- 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, 1992. 131p.
- 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.E.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.3, p.467-474, 1996.
- 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 Environment**, New York, v.61, n.1, p.24-33, 1997.
- GEOPHYSICAL & ENVIRONMENTAL RESEARCH CORPORATION (New York, Estados Unidos). **Mark V spectroradiometer user manual**: version 1.3. New York : Milbrook, 1996. 63p.
- GROVE, C.I.; HOOK, S.J.; TAYLOR, E.D. **Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers**. Passadena : National Aeronautics and Space Administration, 1992. 355p.
- HENDERSON, T.L.; SZILAGYI, A.; BAUMGARDNER, M.F.; CHEN, C.T.; LANDGREBE, D. Spectral band selection form classification of soil organic matter content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.1778-1784, 1989.
- HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor considerations. **Photo Interpretation**, Paris, v.34, n.2, p.101-114, 1996.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and infrared spectra of minerals and rocks. II. Carbonates. **Modern Geology**, Chur, v.2, p.23-30, 1971.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks. III Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, Chur, v.2, p.195-205, 1971.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis**: advanced course. Madison : Wisconsin University, 1969. 895p.
- LABSPHERE INCORPORATION. Reflectance Calibration Laboratory. **Spectral on reflectance target**: white standard. North Sutton, 1996. 4p.
- LEMOES, R.C. de; SANTOS, R.D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. Campinas : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo , 1996. 83p.
- LINDBERG, J.D.; SNYDER, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. **American Mineralogist**, Washington, v.57, p.485-493, 1972.
- MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo Interpretation**, Paris, v.34, n.2, p.59-70, 1996.
- MATHEWS, H.L.; CONNINGHAM, R.L.; PETERSEN, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.37, p.421-424, 1973.
- MONIZ, A.C. Seqüência de evolução de solos derivados de arenito Bauru e de rochas básicas da região nordeste do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.22, p.309-335, 1973.
- NICODEMUS, F.E.; RICHMOND, J.C.; HSIA, J.J.; GINSBERG, I.W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington : United States Department of Commerce, 1977. 52p. (NBS Monograph, 160).
- OLIVEIRA, J.B. Evolução dos trabalhos de levantamento de solos e dos estudos de variabilidade espacial no Estado de São Paulo. **O Agrônomo**, Campinas, v.40, n.2, p.138-148, 1988.

- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, C.O. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas : Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RIAZZA, A. Study of reflectance of pre-Cambrian detritic rocks for structural analysis in the visible and near infrared. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.14, n.5, p.927-942, 1993.
- SAS Institute (Cary, Estados Unidos). **SAS/STAT user's guide**: version 6. 4.ed. Cary, 1989. 2v.
- SENTELHAS, P.C.; MARIN, F.R.; PEREIRA, R.; ANGELOCCI, L.R.; VILA NOVA, N.A.; BARBIERI, V. **Análise de dados climáticos e do balanço hídrico climatológico de Piracicaba (1917-1997)**. Piracicaba : ESLQ, 1998. 81p.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.45, p.1161-1165, 1981.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; WEISMILLER, R.A.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F. **Atlas of soil reflectance properties**. West Lafayette : Purdue University, 1980. 75p. (Research Bulletin, 962).
- SULIMAN, A.S. **Spectral and spatial variability of the soils of the Maricopa Agricultural Center, Arizona**. Tucson : Arizona, Arizona University, 1989. 105p. PhD. Thesis.
- VAMBEK, A. van. Criteria for classifying tropical soils by age. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.13, p.124-132, 1962.
- VITORELLO, I.; GALVÃO, L.S. Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. **Photo Interpretation**, Paris, v.34, p.77-99, 1996.
- WHITE, K.; WALDEN, J.; DRAKE, N.; ECKARDT, F.; SETTLE, J. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib sand sea, Namibia, using Landsat thematic mapping data. **Remote Sensing Environment**, New York, v.62, n.1, p.30-39, 1997.