

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

VARIAÇÕES ESPECTRAIS EM SOLOS SUBMETIDOS À APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO⁽¹⁾

José Alexandre M. Demattê⁽²⁾, Maria Ligia de Souza Silva⁽³⁾,
Genelício Crusoé Rocha⁽³⁾, Laércio Alves de Carvalho⁽³⁾,
Antônio Roberto Formaggio⁽⁴⁾ & Lílian Pittol Firme⁽³⁾

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar as alterações nas curvas espectrais de solos submetidos à aplicação da torta de filtro. Foi usado um espectrorradiômetro operando na faixa espectral entre 450 e 2.500 nm, em condições de laboratório. Amostras de quatro classes de solos, Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), Latossolo Vermelho distrófico típico (LVdf), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Cambissolo Háptico aluminoso típico (CXA) foram subdivididas em subamostras que receberam tratamentos equivalentes a 0, 40 e 80 t ha⁻¹ de torta de filtro, subproduto da produção de açúcar e álcool. A reflectância espectral dessas amostras foi obtida pelo espectrorradiômetro FieldSpec. A alteração da reflectância do solo com a aplicação da torta de filtro mostrou-se mais evidente nos solos arenosos, proporcionando redução na curva espectral com aumento da dose aplicada por causa do elemento matéria orgânica. Para o LVd, a intensidade de reflectância aumentou com a aplicação de torta de filtro, atribuída, nesse caso, ao Ca, cuja refletividade mascarou o efeito da matéria orgânica.

Termos de indexação: sensoriamento remoto, reflectância de solos, radiometria, química do solo.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em dezembro de 2002 e aprovado em fevereiro de 2005.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: jamdemat@carpa.ciagri.usp.br

⁽³⁾ Pós-graduando em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mails: mlssilva@esalq.usp.br; gerocha@esalq.usp.br; lcarvalh@esalq.usp.br; lpfirme@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Av. dos Astronautas 1758, Jd. Granja, CEP 12227-010 São José dos Campos (SP). E-mail: formag@ltid.inpe.br

SUMMARY: SPECTRAL VARIATIONS IN SOILS AMENDED WITH FILTER CAKE

The aim of this study was to evaluate spectral curves of three different soils amended with organic residues derived from the cane sugar industry. It was used disturbed samples of four soils of distinct classes: a typic dystrophic Red Latosol (Haplustox-LVd), a typic dystroferic Latosol (Rhodic Ustox-LVdf), a typic dystrophic Argisol (Rhodustults-PVd) and a Cambisol (Dystropept-CXa). They were amended with 0, 40 or 80 t ha⁻¹ of organic residues derived from the cane sugar and alcohol industry (filter cake). Spectral reflectance of the soil samples were obtained under laboratory conditions by spectroradiometry (FieldSpec), employing spectral bands ranging from 450 to 2,500 nm. The effects of the organic residues application on the soil spectral curves were most evident in the sandier soils. The intensity of the spectral soil curves was reduced at higher organic residue doses due to the increase in soil organic matter. For the amended LV soil, we observed an increase in the intensity of reflectance. This was related to the presence of Ca²⁺, which masked the effect of the organic matter.

Index terms: remote sensing, soil reflectance, radiometry, soil chemistry.

INTRODUÇÃO

A medida da reflectância de um objeto ao longo do espectro eletromagnético é definida como sendo o comportamento espectral deste objeto. Como diferentes alvos podem apresentar respostas espectrais características, é possível identificá-los por meio de técnicas de sensoriamento remoto (SR). Dentre os diversos alvos da superfície terrestre passíveis de ser observados, o solo tem merecido especial atenção, haja vista sua importância quanto aos aspectos agrícolas e ambientais.

Os altos custos e tempo despendidos com o uso de métodos tradicionais de avaliação de solos levam à necessidade de utilização de novos métodos, principalmente com o advento da agricultura de precisão. Neste sentido, o SR apresenta-se como ferramenta de alto potencial, como afirma Ben Dor (2000). Por outro lado, avaliar uma amostra de terra unicamente pelas suas características de refletividade da energia eletromagnética nela incidente é um processo complexo que ainda necessita de maiores pesquisas e desenvolvimento (Epiphany et al., 1992). O fato de o comportamento espectral dos solos ser propriedade cumulativa, resultante da interação da energia eletromagnética incidente, todos os seus atributos são indicadores da complexidade de sua interpretação.

Os estudos básicos sobre o assunto indicam que determinados atributos apresentam maior influência sobre a reflectância como a matéria orgânica (Henderson et al., 1992) e os óxidos de Fe (Formaggio et al., 1996). Esses trabalhos são importantes, visto que fornecem subsídios para interpretação desses elementos; entretanto, conforme dados obtidos de sensoriamento orbital, como nos trabalhos de Coleman et al. (1991) e Ishida & Ando (1999), outras características químicas, como

cátions trocáveis, também podem influir, mesmo que em menor proporção (Schreier, 1977; Demattê et al., 1998a).

Recentes pesquisas comprovam a necessidade de trabalhos nesta linha e Moran et al. (1997) destacam a importância do SR em agricultura de precisão. Ben Dor et al. (1999) informam sobre a necessidade de estudar em maior profundidade a reflectância e os solos com vistas em quantificar dados de interesse. Trabalhos como o de Ben Dor & Banin (1995) vêm procurando quantificar os teores de atributos dos solos pela reflectância. Entretanto, esses autores destacam que, para isso, ainda é preciso entender o que ocorre com a reflectância quando o solo sofre alterações químicas, principalmente com o manejo. Neste aspecto, é interessante destacar que os solos tropicais são submetidos constantemente a manejos químicos, por serem, na sua maioria, pobres, tratamentos estes que podem influir nos seus dados espectrais.

Uma das práticas aplicadas na cana-de-açúcar é o uso de torta de filtro proveniente do processo de produção de açúcar e álcool. Este subproduto industrial é considerado um excelente fertilizante, além de propiciar melhores condições para germinação da cana. Muitas são as informações do valor da torta de filtro na nutrição da cana-de-açúcar, com aumento substancial na produção. Interações significativas com N e P no aumento da produção levaram Prasad (1976) a concluir ser desnecessário o uso de P quando se aplica torta de filtro em nível superior a 20 t ha⁻¹ no sulco de plantio. Uma das formas para seu aproveitamento é a possibilidade de aplicá-la na agricultura, misturada com fosfatos naturais, uma vez que a torta de filtro teria uma capacidade de melhorar a solubilidade destes compostos, disponibilizando mais rapidamente o P, comparado com a sua aplicação sem a torta (Penso et al., 1982).

Em estudos de reflectância espectral da decomposição da matéria orgânica, Demattê et al. (1998b) observaram que existe mudança de intensidade em toda a curva espectral, facilmente identificada nas posições 1.201 e 1.203 nm, e dificilmente detectada entre 2.279 e 2.347 nm. Isso porque a decomposição de determinado material depende principalmente dos componentes presentes, dentre eles, lignina, celulose, cera e óleos.

Mathews et al. (1973) observaram, em solos de clima temperado, que a matéria orgânica tem como característica peculiar forte absorção de energia e com isso tende a reduzir a reflectância principalmente na faixa que vai de 400 a 1.300 nm. Essa alteração da reflectância com a remoção da matéria orgânica tende a ser perceptível nos solos de textura mais grosseira, quando comparados com solos mais argilosos, dada a formação de uma camada orgânica protetora ao redor das partículas grosseiras. Uma vez capeando essas frações, principalmente o quartzo, a matéria orgânica tende a diminuir a reflectância. Ou seja, nos solos arenosos, existe uma maior redução da reflectância com a presença da matéria orgânica.

Até o momento, não existem trabalhos que analisam o comportamento espectral de solos manejados com torta de filtro e, no entanto, graças ao grande uso deste produto em várias regiões produtoras de açúcar e álcool, torna-se evidente a necessidade de fornecer subsídios quanto às possíveis mudanças nas suas curvas espectrais.

Sabe-se que a reflectância de amostras de solo refere-se a uma interação da energia eletromagnética com os atributos físicos, químicos e mineralógicos. Espera-se que a reflectância seja alterada também pela aplicação de um subproduto industrial, como a torta de filtro. Este subproduto reage no solo, alterando os aspectos químicos originais e, possivelmente, influencia sua energia eletromagnética refletida. Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar o comportamento espectral de quatro classes de solos distintos na faixa espectral entre 450 e 2.500 nm. Com isso, pretendeu-se verificar a possibilidade de detecção de alterações químicas promovidas pela torta de filtro nesses solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas 48 amostras de terra na profundidade de 0 a 20 cm, para quatro classes de solo: Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), Latossolo Vermelho distroférico típico (LVdf), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Cambissolo Háptico aluminoso típico (CXa), localizados próximos ao município de Arapoti,

Paraná (Figura 1). Os perfis foram avaliados, segundo métodos propostos por Lemos & Santos (1996), e classificados, segundo Embrapa (1999). As amostras de cada solo foram subdivididas em três subamostras que receberam os seguintes tratamentos: T1, testemunha; T2, dose usual, equivalente a 40 t ha⁻¹ de torta de filtro; T3, duas vezes a dose usual, equivalente a 80 t ha⁻¹ de torta de filtro. As doses baseiam-se em dados colhidos junto a produtores de cana-de-açúcar da região de Piracicaba (SP). As amostras foram secas (estufa 45 °C por 24 h), moídas e peneiradas (peneira de 2 mm de abertura de malha), misturadas com o produto, umedecidas à capacidade de campo e deixadas para reagir. Após trinta dias, as amostras foram novamente secas, moídas e peneiradas para aquisição de dados espectrais. Foram realizadas quatro repetições por tratamento em cada classe de solo.

Posteriormente, foram obtidos os dados espectrais das amostras em laboratório (antes e depois dos tratamentos) utilizando espectrorradiômetro FieldSpec com fibra ótica de resolução espectral de 1 nm entre 450 e 1.100 nm e 2 nm entre 1.100 e 2.500 nm. O procedimento utilizado foi medir a radiância proveniente do alvo e compará-la com a de uma placa de referência branca com padrão lambertiano de reflexão máxima. Foi utilizada uma lâmpada halógena de 600 W como fonte de iluminação. O equipamento foi programado para realizar 50 leituras por amostra, gerando a curva espectral média de cada amostra de solo analisada.

As amostras de solo foram analisadas quimicamente (Raij & Quaggio, 1983) antes e depois dos tratamentos com torta de filtro. A caracterização do solo consistiu de Fe total, Si e Al para determinar seu Ki (Camargo et al., 1986). O Ki é um índice do grau de intemperismo. É determinado pela razão molecular entre a percentagem de SiO₂ e Al₂O₃. Valor abaixo de 1,0 designa dominância de óxidos; valores entre 1,0 e 2,0 indicam dominância de caulinita; valores entre 2,0 e 3,0 indicam dominância de minerais de argila 2:1 e caulinita. Sílica, Al e Fe total foram quantificados por meio do ataque com ácido sulfúrico (Camargo et al., 1986). Análises mineralógicas foram feitas na fração argila (Jackson, 1969).

Utilizando os dados espectrais, foram determinados os valores de primeira e segunda derivada como auxílio na interpretação dos dados (Scheinost et al., 1998). As curvas espectrais foram então interpretadas quanto às feições de absorção, formas e intensidades de reflectância. Selecionaram-se 11 bandas espectrais baseadas em literatura (Coleman et al., 1991; Demattê & Garcia, 1999) e utilizadas para as análises estatísticas. Foram realizadas análises de correlação entre os atributos dos solos e a respectiva reflectância em cada banda.

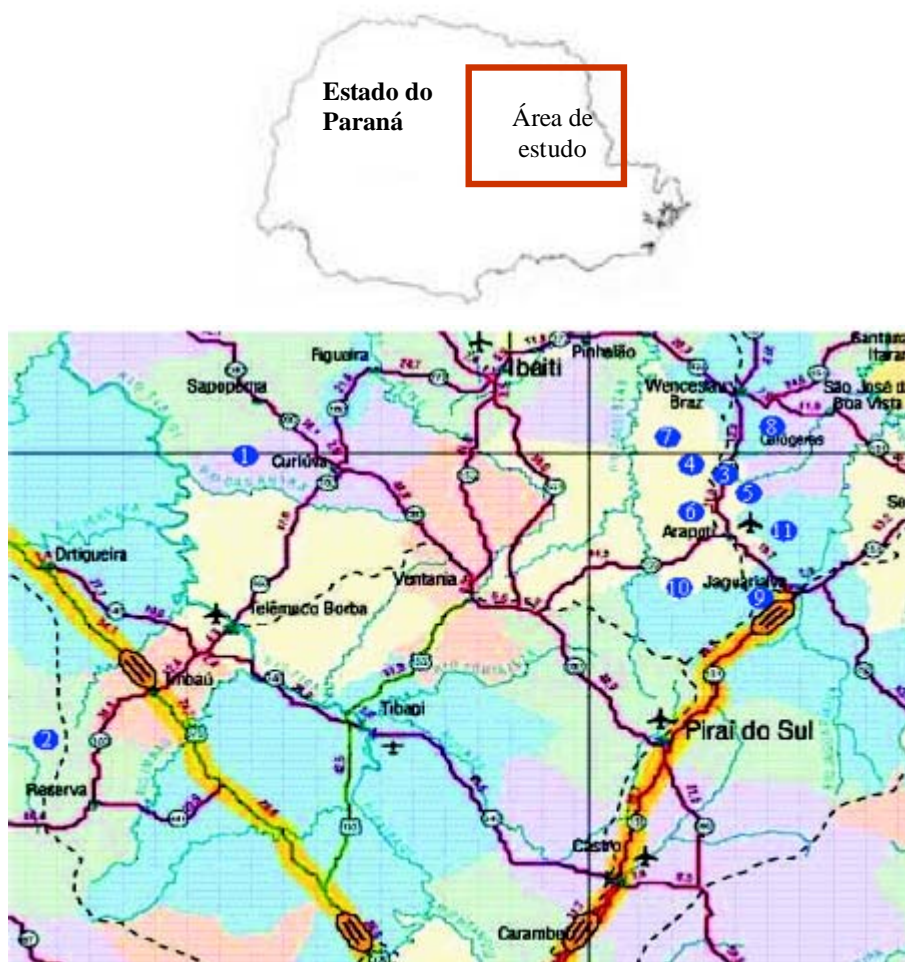


Figura 1. Locais de coleta das amostras, em diferentes localizações próximas ao município de Arapoti, Paraná. A numeração indica locais de coleta de amostra de terra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização espectral dos solos estudados

Os solos estudados apresentam curvas espectrais com baixa reflectância, nas regiões do visível e do infravermelho (Figura 2), concordando com Formaggio et al. (1996). Este fato decorre da forte absorção devida ao efeito da presença de formas de Fe^{3+} nos comprimentos de onda menores que 540 nm. Além disso, segundo Epiphanyo et al. (1992), esses solos apresentam altos teores de magnetita e ilmenita que diminuem consideravelmente a intensidade de reflectância.

Os solos LVd e LVdf são bastante intemperizados e contêm gibbsita, detectada pela banda de absorção em 2.265 nm (Figura 2), apontada anteriormente por Madeira Netto (1996). A presença de caulinita, por sua vez, observada na banda em 2.200 nm (Figura 2), é mais evidenciada nos solos menos intemperizados, como o PVd e o CXa, em detrimento da inexistência de gibbsita.

Pode-se verificar também que os padrões espectrais dos solos estudados, partindo dos mais argilosos para os mais arenosos (Quadro 2), apresentam tendências com forma diferenciada (Figura 2). A intensidade de reflectância, principalmente no infravermelho, aumenta na seguinte seqüência: LVdf \rightarrow LVd \rightarrow CXa \rightarrow PVd, de forma similar com os resultados encontrados por Demattê et al. (2000).

A curva espectral do LVdf apresenta concavidade de média a forte no intervalo de 450 a 600 nm. O efeito causado pelo óxido de Fe na banda centrada em 850 nm é pouco pronunciado; entretanto, é possível perceber sua atuação evidenciada pelo abaulamento nesta banda, concordando com Vitorello & Galvão (1996).

As feições de absorção relacionada com a presença de moléculas de água (1.400 e 1.900 nm) e moléculas de água vs. hidroxilas em 1.400 nm (Lindberg & Snyder, 1972) aparecem em todos os solos, sendo menos intensas nos Latossolos, que são mais ricos em Fe e Magnetita, componentes que mascaram parcialmente estas bandas de absorção (Hunt et al., 1971).

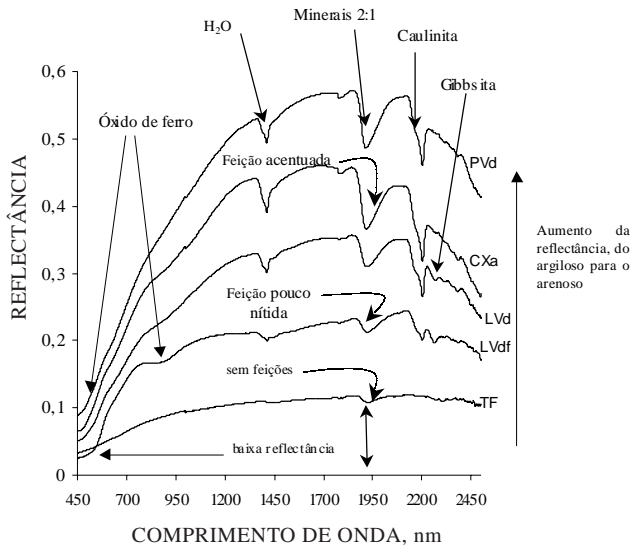


Figura 2. Curvas espectrais médias dos solos comparadas à curva espectral da torta de filtro (TF). As curvas foram obtidas antes da incubação com TF.

Demattê & Garcia (1999) verificaram que, em solos com maiores teores de silte, a presença de materiais intemperizáveis nessa fração foi responsável pelo aumento na intensidade de reflectância. O PVd apresentou maior teor de silte, em relação aos demais solos, indicando ser um solo menos intemperizado. Tais características contribuíram para maior intensidade de reflectância em relação ao LVd e LVdf.

O baixo teor de Fe é evidente na análise do comportamento das curvas espectrais do CXa e do PVd (Figura 3), uma vez que, segundo Coleman et al. (1991), elevados teores de Fe reduzem a intensidade da reflectância na faixa de 400 a 1.200 nm. Outros comportamentos notados na curva, que demonstram os baixos teores de Fe desse solo, são a concavidade fraca, no intervalo entre 450 e 600 nm, e a ausência do abaulamento, na faixa de 780 a 1.000 nm.

Portanto, na seqüência dos solos com cores mais escuras (menor croma) e avermelhadas, ricos em Fe e minerais opacos, mais intemperizados (LVdf e LVd) para os mais claros pobres em Fe, jovens (CXa e

Quadro 1. Análise química do material orgânico (torta de filtro)

Determinação	Umidade natural	Base seca (110 °C)
	%	
pH em CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹	7,2	-
Carbono total (orgânico e mineral)	11,06	33,66
Carbono orgânico	10,56	32,14
Nitrogênio total	0,87	2,65
Fósforo (P ₂ O ₅) total	1,15	3,50
Potássio (K ₂ O) total	0,40	1,22
Cálcio (Ca) total	0,96	2,92
Magnésio (Mg) total	0,11	0,33
Enxofre (S) total	0,08	0,24
Relação C/N (C total e N total)	13/1	13/1

Quadro 2. Caracterização dos solos

Solo ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾ CaCl ₂	MO	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	T	V	m	Granulometria		
												Areia	Silte	Argila
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmolc. dm ⁻³					%	g kg ⁻¹				
LVd	3,7	26	4	0,9	1	1	12	52	54,9	5	81	800	20	180
LVdf	3,6	33	4	0,7	1	1	28	185	187,7	1	91	220	80	700
PVd	3,7	22	9	1,5	2	1	27	109	113,5	4	86	550	210	240
CXa	3,4	33	6	1,3	2	1	45	253	257,3	2	91	370	200	430

⁽¹⁾ Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), Latossolo Vermelho distróférico típico (LVdf), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd), Cambissolo Háplico aluminico típico (CXa). ⁽²⁾ Métodos: P-Resina; K-Mehlich-1:10; Ca, Mg e Al-KCL 1:10.

PVd), a intensidade de reflectância aumenta e as feições de absorção se alteram.

Torta de filtro e comportamento espectral dos solos

A curva com menor valor de reflectância é representada pela torta de filtro, que, por ser um material orgânico, não apresenta feições características (Figura 2), concordando com Demattê et al. (2001). Apesar de não haver dados na literatura sobre a influência da incorporação de materiais orgânicos na reflectância espectral de solos, a incorporação deste material no solo poderá influenciar os valores de reflectância, dependendo das características físicas e químicas de cada solo e do próprio material, como pode ser observado por Galvão (1994) e Demattê et al. (2003).

A influência da matéria orgânica, assim como dos óxidos de Fe nas curvas espectrais, foi avaliada principalmente para os solos de ambiente de clima temperado, como no trabalho de Henderson et al. (1992). Entretanto, a ação desses componentes nas curvas espectrais, inclusive em solos tropicais muito intemperizados, com argila de baixa atividade, foi pouco explorada.

Em relação ao LV, esperava-se que a incorporação de material orgânico promovesse uma diminuição da intensidade de reflectância (Figura 4), conforme relatado por Henderson et al. (1992). No LVdf, observou-se maior R^2 nas bandas 6 e 7 para os atributos Ca, P e matéria orgânica (Quadro 3). A aplicação de torta de filtro aumentou o teor de matéria orgânica (Quadro 4) juntamente com o aumento da reflectância (Figura 4a), porém para uma capacidade de troca catiônica baixa (Quadro 5). Neste caso, o Ca foi o principal elemento causador dessa reflexão, sobrepujando o efeito da matéria orgânica. Portanto, apesar de ter ocorrido aumento de material que absorve energia (matéria orgânica), houve aumento muito maior de um elemento reflectivo, o Ca (Demattê et al., 1998), que atenuou o efeito do primeiro. Por outro lado, nas curvas do CXa, a aplicação de torta de filtro provocou diminuição da intensidade de reflectância (Figura 3b), apesar de também ter ocorrido expressivo aumento de Ca, apresentando, neste caso, o CXa uma capacidade de troca catiônica mais elevada (Quadro 5), o que concorre para maior dificuldade de participação dos cátions da torta no complexo sortivo, sendo o efeito do material orgânico mais acentuado, mascarando o efeito do Ca. O mascaramento ou atenuação dos efeitos de um elemento sobre o outro é comum neste tipo de análise, por ser a curva espectral formada por um efeito cumulativo de todas as propriedades simultaneamente (Galvão, 1994; Fiorio et al., 2003). A literatura descreve a matéria orgânica (400 a 1.200 nm) e o óxido de Fe (850 nm) como os elementos de maior influência nas curvas espectrais (Henderson et al., 1992).

A variação das influências espectrais entre as dosagens 40 e 80 t ha⁻¹ no solo PVd pode estar relacionada com a precipitação do Ca pelo P, além de seu aumento significativo no solo. Demattê et al. (2001b) verificaram uma ligeira tendência de diminuição da intensidade de reflectância com aumento de P, porém consideraram a necessidade de maiores estudos em virtude das diversas reações provocadas por adubos fosfatados. O presente trabalho mostrou que, apesar de haver alterações em teores de P no solo, decorrentes de reações com a torta de filtro (Figuras 3 e 4), não se verificaram mudanças significativas nas formas das curvas espectrais.

Esta presença mais pronunciada de P no PVd (Quadro 5) deve estar relacionada com a disponibilização de elementos pelos processos microbianos no solo. No quadro 3, pode-se observar que o P apresentou maior R^2 nas bandas 7, 8 e 9. Conforme Penso et al. (1982), a incubação de torta de filtro no solo desencadeia um adequado desenvolvimento microbiano em laboratório. Com isso, ocorreu inicialmente imobilização do P pelos microrganismos e, em seguida, disponibilização do elemento após a

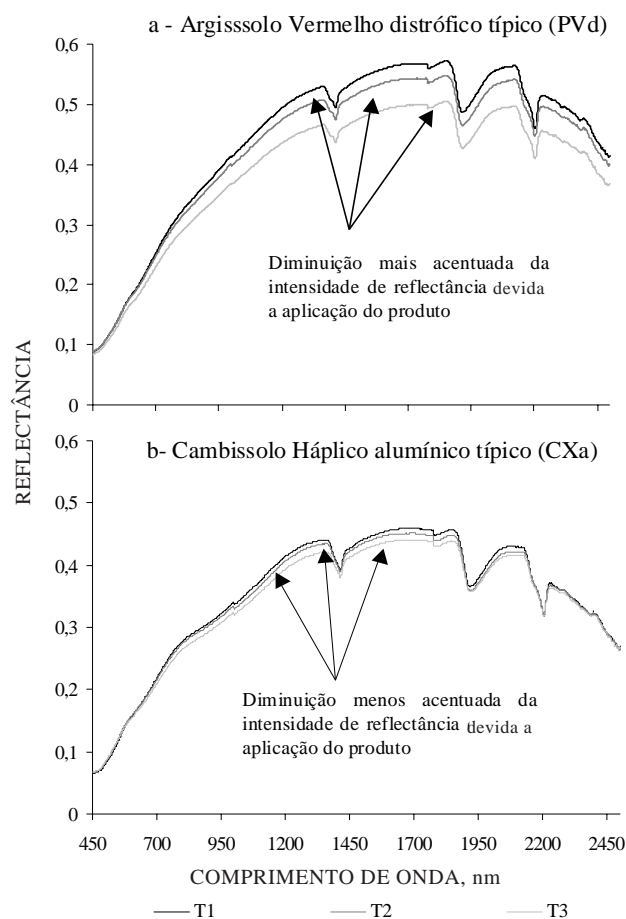


Figura 3. Curvas espectrais médias dos solos PVd e CXa, comparando os tratamentos: T, testemunha; T2, 40 t ha⁻¹; T3, 80 t ha⁻¹.

sua morte. Essa maior liberação no PVd foi influenciada pelas características químicas deste solo e propiciou redução da curva espectral com aumento da dose.

Analisando os gráficos da segunda derivada (Figuras 5 e 6), observou-se que, para todas as classes de solos, os pontos de máximo diferenciaram-se quanto à posição espectral. Percebeu-se uma tendência

de maior ponto de máximo para o tratamento-testemunha, decrescendo à medida que se aumentava a dosagem da torta de filtro. O ponto de máximo mostrou a posição das bandas de absorção.

Com o objetivo de verificar as feições espectrais com maior precisão, foram observadas derivadas para o CXa. O maior valor de ponto máximo para o tratamento-testemunha, com o valor superior a

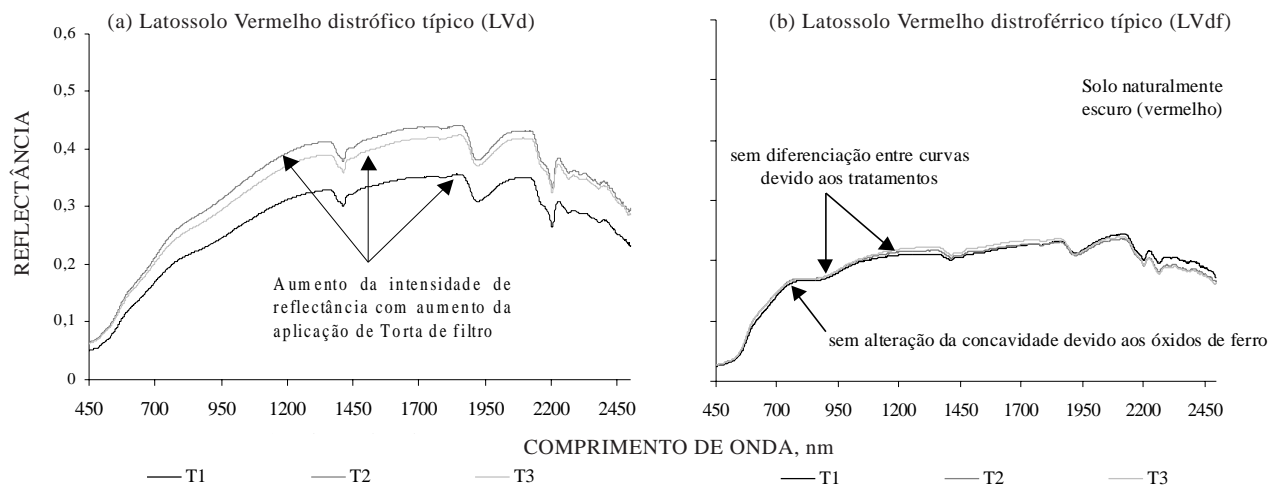


Figura 4. Curvas espectrais médias dos solos LVd e LVdf, comparando os tratamentos: T1, testemunha; T2, 40 t ha⁻¹; T3, 80 t ha⁻¹.

Quadro 3. Coeficiente de determinação (R²)⁽¹⁾ entre a reflectância e o teores de cálcio, fósforo e matéria orgânica no solo nos diferentes tratamentos para os solos Cambissolo Háptico aluminico típico (CXa), Latossolo Vermelho distrófico típico (LVdf), Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd) e Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd)

	Banda espectral selecionada (nm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	450 a 520	522 a 599	630 a 689	761 a 901	956 a 1081	1120 a 1269	1302 a 1462	1549 a 1750	1822 a 1990	2082 a 2352	2356 a 2498
Cambissolo Háptico aluminico típico, CXa											
Ca	0,5924	0,5475	0,5448	0,4281	0,4261	0,4295	0,4591	0,4925	0,5625	0,5931	0,6341
P	0,4092	0,3675	0,3611	0,2638	0,2621	0,2650	0,2897	0,3184	0,3812	0,4099	0,4494
MO	0,5718	0,5269	0,5200	0,4084	0,4065	0,4100	0,4392	0,4722	0,5418	0,5726	0,6139
Latossolo Vermelho distrófico típico, LVdf											
Ca	0,4797	0,6139	0,5279	0,3547	0,7907	0,9884	1,0000	0,8701	0,0022	0,5427	0,7721
P	0,4822	0,6164	0,5304	0,3570	0,7928	0,9890	1,0000	0,8684	0,0021	0,5452	0,7742
MO	0,4721	0,6061	0,5203	0,3466	0,7839	0,9866	1,0000	0,8757	0,0024	0,5349	0,7651
Latossolo Vermelho distrófico típico, LVd											
Ca	0,4334	0,3911	0,3845	0,2844	0,2827	0,2857	0,3113	0,3408	0,4051	0,4343	0,4744
P	0,3998	0,3583	0,3520	0,2558	0,2542	0,2570	0,2814	0,3098	0,3719	0,4004	0,4398
MO	0,4871	0,4458	0,4363	0,3307	0,3290	0,3321	0,3594	0,3906	0,4577	0,4878	0,5288
Argissolo Vermelho distrófico típico, PVd											
Ca	0,2968	0,4228	0,5558	0,6688	0,7215	0,7498	0,7557	0,7711	0,7825	0,7200	0,6882
P	0,4826	0,6220	0,7513	0,8473	0,8874	0,9073	0,9113	0,9216	0,9289	0,8860	0,8625
MO	0,3017	0,4285	0,5618	0,6745	0,7271	0,7552	0,7611	0,7763	0,6202	0,7254	0,6939

⁽¹⁾ Para cada banda selecionada, foram obtidos os valores médios de reflectância, Estes valores foram correlacionados com os teores de Ca, P e MO para cada solo.

Quadro 4. Valores médios dos teores de matéria orgânica, fósforo e cálcio obtidos das amostras de terra após os tratamentos. Os teores de torta de filtro indicados são equivalentes ao aplicado em campo

Solo	Tratamento (t ha ⁻¹)		
	0	40	80
Matéria Orgânica, g dm ⁻³			
LVd	27,75 A	30,25 A	32,25 A
LVdf	46,50 A	48,75 A	51,25 A
PVd	27,00 A	29,75 A	31,25 A
Cxa	32,00 B	36,75 AB	39,75 A
Fósforo, mg dm ⁻³			
LVd	5,00 C	43,75 B	83,25 A
LVdf	6,25 C	34,00 B	64,00 A
PVd	5,25 C	51,75 B	95,50 A
Cxa	5,25 C	38,25 B	71,00 A
Cálcio, mmolc dm ⁻³			
LVd	2,00 C	12,25 B	21,75 A
LVdf	2,25 C	10,75 B	20,00 A
PVd	4,25 C	18,25 B	25,75 A
Cxa	3,00 C	13,50 B	19,75 A

Médias seguidas por letras iguais na horizontal não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

0,00007 nm⁻² (Figura 5), deveu-se à predominância de textura média, baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de Fe (opacos e escuros). De acordo com Demetriader-Shah et al. (1990), a utilização da derivada em dados espectrais auxilia na detecção de bandas de absorção. As altas reflectâncias deveram-se aos materiais que deram origem a esses solos, de alta reflectividade, como os arenitos, uma vez que, em geral, são de textura arenosa.

Ao contrário, a classe Latossolo Vermelho distroférrico típico, apesar de apresentar a mesma tendência do ponto de máximo, ou seja, maior pico para menor dose de torta de filtro, foi a que obteve menor ponto de máximo em comparação às outras classes com um valor de 0,00004 nm⁻². Este menor valor de ponto de máximo foi atribuído ao fato de as curvas espectrais de Latossolo Vermelho distrófico típico serem baixas, tendo menores valores de reflectância nas regiões do visível e do infravermelho pela presença da magnetita principalmente, como expõem Stoner & Baumgardner (1980). De fato, segundo Hunt et al. (1971), magnetita e ilmenita são minerais tipicamente opacos e praticamente sem feições espectrais no visível e no infravermelho próximo. A forte absorção nos comprimentos de onda menores que 550 nm deveu-se à presença de formas trivalentes de Fe em grandes teores. Os picos em 2.265 nm ratificam a presença de gibbsita nos LVs, concordando com Madeira Neto (1996).

Quadro 5. Análise química dos solos após a incubação com torta de filtro

Tratamento (torta)	pH CaCl ₂	P	K ⁺	Mg ²⁺	Al + H	SB	T	V
t ha ⁻¹		mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³					%
Cambissolo Háplico aluminico típico (CXa)								
0	3,9	5,3	2,1	1,0	143,8	6,1	149,8	4,0
40	4,0	38,3	3,3	2,8	139,0	19,6	158,6	12,3
80	4,2	71,0	4,7	4,0	109,3	28,4	137,7	20,8
Latossolo Vermelho distroférrico típico (LVdf)								
0	4,0	6,3	1,4	2,5	125,3	6,1	131,4	4,5
40	4,2	34,0	2,7	3,5	103,5	16,9	120,4	14,3
80	4,4	64,0	4,3	6,0	82,0	30,3	112,3	27,0
Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd)								
0	4,0	5,0	2,0	1,0	63,0	5,0	68,0	7,5
40	4,4	43,8	3,0	2,5	45,8	17,7	63,5	28,0
80	4,9	83,3	4,6	4,5	33,3	30,9	64,1	48,3
Argissolo Vermelho distrófico típico (PVd)								
0	3,9	5,3	1,6	1,0	93,5	6,9	100,4	6,8
40	4,2	51,8	3,3	3,0	62,5	24,5	87,0	28,3
80	4,5	95,5	4,6	3,8	49,5	34,1	83,6	40,8

Métodos: P – Resina; K – Mehlich-1:10; Mg e Al-KCl 1:10.

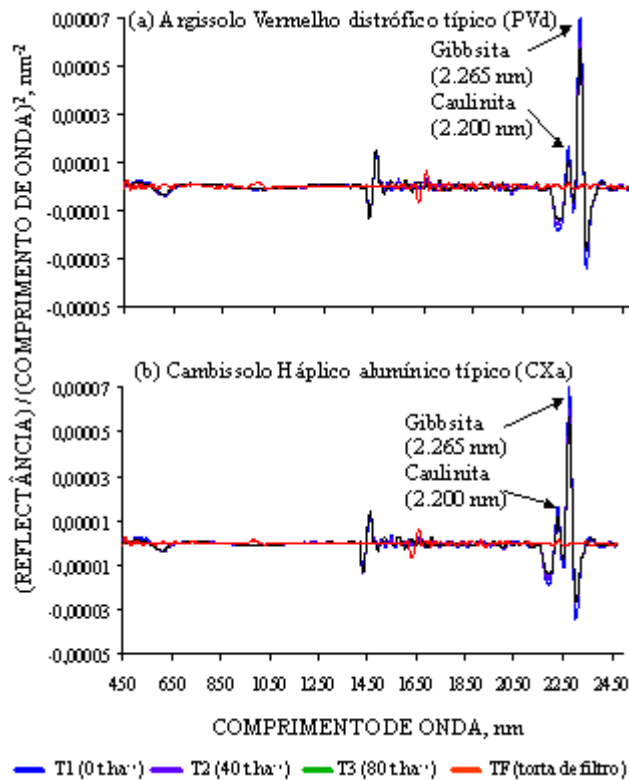


Figura 5. Derivada segunda dos solos PVd e CXa nos tratamentos avaliados (0, 40 e 80 t ha⁻¹ e torta de filtro).

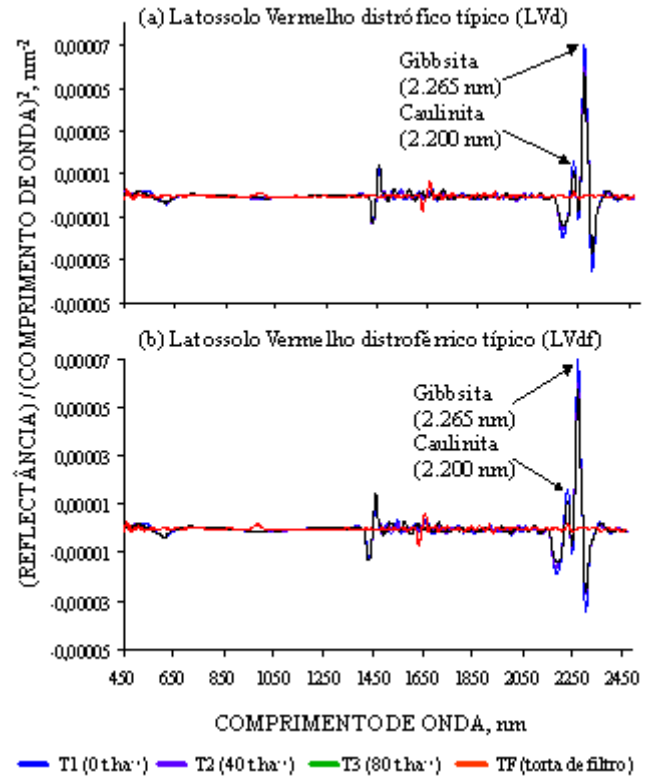


Figura 6. Derivada segunda dos solos LVd e LVdf nos tratamentos avaliados (0, 40 e 80 t ha⁻¹ e torta de filtro).

CONCLUSÕES

1. Partindo dos solos mais arenosos para os mais argilosos, houve diferenciação nas angularidades e nas formas das curvas espectrais, permitindo discriminalidade entre elas.

2. A aplicação de torta de filtro em solos com cores mais escuras (LVdf) não promoveu variação espectral. Nos solos mais arenosos e de cores mais claras, PVd e CXa, ocorreu diminuição na intensidade de reflectância graças ao maior teor de matéria orgânica incorporada às amostras de terra pelo produto.

3. Para o LVd, a intensidade de reflectância aumentou com a aplicação de torta de filtro, atribuindo-se, nesse caso, ao Ca, cuja refletividade superou o efeito da matéria orgânica.

4. O sensoriamento remoto espectral detectou as alterações químicas do solo, promovidas pela aplicação de produto agroindustrial. Houve alteração na intensidade de reflectância das amostras de terra, na medida em que reage com as particularidades de cada solo. As feições de absorção da curva espectral, entretanto, não se alteraram.

LITERATURA CITADA

- BEN-DOR, E. & BANIN, A. Near infrared analysis (NIRA) as a rapid method to simultaneously evaluate, several soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:364-372, 1995.
- BEN-DOR, E.; PORTUGALI, J.; KACHAVI, M.; SHIMONI, M. & VINITZKY, L. Airborne thermal video radiometry and excavation planning at Tel Leviah, Golan heights, Israel. *J. Field Achael.*, 26:117-127 SUN 1999.
- BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soil properties. *Adv. Agron.*, 75:173-243, 2000.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L.; GOOT, T. & PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly wathering soils. *Soil Sci.*, 151:355-361, 1991.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:479-490, 1998a.

- DEMATTÊ, J.A.M.; SOUZA, A.A. & NANNI, M.R. Avaliação espectral de amostras de solo e argilo-minerais em função de diferentes níveis de hidratação (compact disc). In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., Santos, 1998, Anais. Santos, INPE/SELPER, 1998b.
- DEMATTÊ, J.A.M. & GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Sci. Soc. Am. J.*, 63:327-342, 1999.
- DEMATTÊ, J.A.M.; HUETE, A.R.; FERREIRA Jr., L.G; ALVES, M.C.; NANNI, M.R. & CERRI, C.E. Evaluation of tropical soils through ground and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., Lake Buena Vista, 2000. Proceedings. Lake Buena Vista, 2000. v.2:34-41.
- DEMATTÊ, J.A.M.; DEMATTÊ, J.L.I.; CAMARGO, W.P.; FIORIO, P.R. & NANNI, M.R. Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. *Sci. Remote Sens.*, 38:79-102, 2001.
- DEMATTÊ, J.A.M.; EPIPHANIO, J.C.N. & FORMAGGIO, A.R. Influencia da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. *Bragantia*, 62:451-464, 2003a.
- DEMATTÊ, J.A.M.; PEREIRA, H.S.; NANNI, M.R.; COOPER, M. & FIORIO, P.R. Soil chemical alterations promoted by fertilizer application assessed by spectral reflectance. *Soil Sci.*, 168:730-747, 2003b.
- DEMETRIADER-SHAH, T.H.; STEVEN, M.D. & CLARCK, J.A. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Rem. Sens. Environ.*, 33:55-64, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de produção de Informação, 1999. 412p.
- 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, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1992. 131p.
- FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R. & GENÚ, A.M. Regressões lineares múltiplas utilizando-se dados espectrais obtidos por sensores em laboratório e orbital, na estimativa de atributos do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO, 11., Belo Horizonte, 2003. Anais. Belo Horizonte, INPE, 2003. p.85-92.
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.; VALERIANO, M.M. & OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:467-474, 1996.
- GALVÃO, L.S. Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectro. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1994. 181p. (Tese de Doutorado)
- HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F. & FRANZMEIER, D. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *S. Sci. Soc. Am. J.*, 56:865-872, 1992.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. & LEMHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. *Mod. Geol.*, 2:195-205, 1971.
- ISHIDA, T. & ANDO, H. Use of disjunctive cokriging to estimate soil organic matter from Landsat thematic image. *Int. J. Rem. Sens.*, 20:1549-1565, 1999.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: advanced course. Madison, 1969.
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.
- LINDBERG, J.D. & SNYDER, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. *Am. Miner.*, 57:485-493, 1972.
- MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. *Photo Interp.*, 34:59-70, 1996.
- MATHEWS, H.L.; CUNNINGHAM, R.L. & PETERSEN, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:421-424, 1973.
- MORAN, M.S.; INOUE, Y. & BARNES, E.M. Opportunities and limitations for image based remote sensing in precision crop management. *Rem. Sens. Environ.*, 61:319-346, 1997.
- PENSO, J.S.A.; BRAGA, J.M. & THIÉBAUT, J.T.L. Avaliação da solubilidade de fosfato de Patos. III - Mistura com torta de filtro e vinhaça. *R. Ceres*, 29:516-525, 1982.
- PRASAD, M. Response of sugarcane to filter press mud and N, P and K fertilizers. I. Effect on sugarcane yield and sucrose content. *Agron. J.*, 68:539-43, 1976.
- RAIJ, B. van. & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81)
- SCHEINOST, A.C.; CHAVERNAS, A.; BARRON, V. & TORRENT, J. Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soil. *Clays Clay Miner.*, 46:528-536, 1998.
- SCHREIER, H. Quantitative predictions of chemical soil conditions from multispectral airborne, ground and laboratory measurements. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 4., Ottawa, 1977. Proceedings. Ottawa, CASI, 1977. p.107-112.
- STONER, E.R. & BAUMGARDNER, M.F. Characteristics variations in reflectance of surface soils. *Sci. Soc. Am. J.*, 45:1161-1165, 1980.
- VITORELLO, I. & GALVÃO, L.S. Spectral proprierts of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. *Photo Interp.*, 34:77-99, 1996.