

Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral

Relationship between the soil constituents and its spectral behavior

Ricardo Simão Diniz Dalmolin¹ Cristiano Nunes Gonçalves²
Egon Klamt³ Deborah Pinheiro Dick⁴

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

RESUMO

A reflectância espectral de solos é a expressão que registra o fluxo de radiação eletromagnética refletida pelo solo em relação ao fluxo radiante. Como os solos apresentam diferentes constituintes, os mesmos podem ser identificados e em certos casos quantificados pela análise de sua resposta espectral. Os principais constituintes dos solos que influenciam seu comportamento espectral são a matéria orgânica, óxidos de ferro, argilominerais, além da distribuição granulométrica e umidade. A utilização da reflectância espectral visando obter informações na identificação e quantificação de características do solo de maneira rápida e não invasiva, tanto em nível laboratorial como em nível orbital, tem ocorrido principalmente em países desenvolvidos. No Brasil, o interesse de pesquisadores pelo estudo do comportamento espectral de solos vem crescendo desde a década de 80 do século passado, sendo esta linha de pesquisa relativamente jovem e necessitada de suporte de pesquisa para melhor entendimento dos efeitos da interação da energia eletromagnética entre os diferentes componentes do solo.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, comportamento espectral, matéria orgânica, óxidos de ferro.

ABSTRACT

The spectral soil reflectance is an expression that characterizes the electromagnetic radiation reflected by soil

surface. Most of the soil constituents can be identified and sometimes quantified by the spectral behavior. The main soil constituents that influence its spectral behavior are the organic matter, iron oxides, mineralogy and clay content and moisture. The use of soil reflectance allows to obtain information to quickly identify and quantify the soil characteristics, both in laboratory and orbital levels, but it has been tested and used mainly in developed countries. In Brazil, the research interest for the study of the soil spectral reflectance started in the 1980's, being a recent research area which needs research support to achieve a better understanding of the spectral interaction among the different components of the soil.

Key words: remote sensing, spectral soil reflectance, organic matter, iron oxides.

INTRODUÇÃO

A pesquisa em ciência do solo consiste numa interdisciplinaridade de ciências básicas, pois engloba abordagens da química, da física, da biologia e mineralogia, o que tem resultado no grande avanço sobre o conhecimento do solo, suas interações e suas respostas ao manejo, principalmente em áreas de regiões tropicais. Entre as técnicas desenvolvidas em

¹Engenheiro Agrônomo, Doutor, Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS. E-mail: dalmolin@ccr.ufsm.br. Autor para correspondência.

²Engenheiro Agrônomo, Doutor, Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul (BRDE), Florianópolis, SC.

³Engenheiro Agrônomo, PhD, Professor aposentado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

⁴Químico, PhD, Professor do Departamento de Química e do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, UFRGS.

função desta interdisciplinaridade, destaca-se a espectrorradiometria de reflectância, cuja aplicação no estudo do solo é relativamente nova e crescente (MADEIRA NETTO, 2001). A espectrorradiometria de reflectância é uma técnica de sensoriamento remoto que registra o fluxo de radiação eletromagnética refletida por objetos, no caso o solo, não havendo contato físico entre sensor e alvo. A quantidade de energia refletida por um solo é função de três fatores: a energia eletromagnética incidente, que pode ser proveniente do sol ou uma lâmpada; a quantidade de energia absorvida e a quantidade de energia transmitida (STONER & BAUMGARDNER, 1986). Esta relação pode ser expressa como $R\lambda = I\lambda - (A\lambda + T\lambda)$, onde R é a reflectância em um determinado comprimento de onda (λ), I é a energia incidente, A é a energia absorvida e T é a energia transmitida. A quantidade de radiação refletida (radiância) comparada com a quantidade incidente (irradiância) sobre o solo fornece a medida de reflectância captada por sensores, denominados radiômetros ou espectrorradiômetros. Estes sensores decompõem a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda (os espectrorradiômetros diferem dos radiômetros por operarem em faixas espectrais estreitas) sendo que a intensidade relativa de energia refletida pelo objeto pode ser medida de uma maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético (NOVO, 1992), fornecendo um conjunto de dados numéricos ou gráficos conhecidos como curvas ou assinaturas espectrais. A assinatura ou comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica, sendo que os principais constituintes que afetam seu comportamento espectral são a matéria orgânica e os óxidos de ferro. A mineralogia da fração argila, tamanho de partículas e a rugosidade, além da umidade do solo, também são importantes neste processo. Como os solos apresentam variações em sua composição e como avanço no conhecimento das relações existentes entre reflectância espectral e características dos solos, pode-se prever, de maneira rápida, confiável e não invasiva, várias características químicas e físicas do solo, conforme constatado por SHEPHERD & WALSH (2002), que obtiveram uma ampla base de dados de reflectância espectral de solos e denominaram de livrarias espectrais. STONER & BAUGARDNER (1981) definiram cinco tipos de curvas espectrais para solos de acordo com o conteúdo de matéria orgânica, óxidos de ferro e mineralogia, numa tentativa de estabelecer critérios para a classificação dos espectros e agrupar solos que apresentam características espectrais semelhantes.

STONER et al. (1980) propuseram um atlas com curvas espectrais de várias classes de solos que reúne informações que permitem prever características dos mesmos.

Informações espectrais do solo podem ser obtidas em três níveis: *terrestre*, utilizando sensores no campo ou em laboratório; *suborbital*, utilizando sensores a bordo de aeronaves e *orbital*, que utiliza sensores a bordo de satélites. Segundo GALVÃO (1994), a base de dados espectrorradiométricos obtidos em laboratório torna-se mais importante, quando os mesmos são utilizados para análise de imagens de satélite de alta resolução espectral, que são capazes de amostrar o espectro eletromagnético em bandas estreitas e contínuas. O objetivo desta revisão é discutir o comportamento espectral de solos em função de seus constituintes, assunto que tem despertado interesse de vários pesquisadores nas regiões tropicais, mas que ainda é pouco divulgado e/ou conhecido pelos pesquisadores em ciência do solo.

DESENVOLVIMENTO

Os espectrorradiômetros medem a reflectância que pode ser expressa em curvas de reflectância espectral (Figura 1). Estas curvas espectrais, que abrangem a região do espectro eletromagnético de 400 a 2500 nm e por isso chamado de espectro óptico, apresentam feições típicas ou bandas de absorção, devido à interação dos átomos ou moléculas dos diferentes constituintes do solo com a radiação eletromagnética em comprimentos de ondas específicos. Segundo HUNT (1980), as bandas de absorção são devidas a processos eletrônicos e processos vibracionais. No processo eletrônico, as transições entre os níveis de energia dos orbitais atômicos são responsáveis pelas feições de absorção nos espectros. Estes processos ocorrem principalmente na faixa espectral do visível e infravermelho próximo. O processo vibracional, que é devido às vibrações das ligações inter e intra moleculares decorrentes da absorção de energia, ocorre predominantemente na região do infravermelho. Como cada solo apresenta uma diferente constituição, a respectiva curva espectral terá diferentes bandas de absorção. Nos comprimentos de onda de 1400 e 2200nm, por exemplo, ocorrem bandas de absorção devido às vibrações moleculares dos grupos OH e Al-OH presente nos minerais (HUNT & SALISBURG, 1970) sendo típicas da presença de caulinita e/ou montmorilonita. As bandas de absorção em 1400 e 1900 nm são atribuídas à vibração molecular dos grupos OH da água adsorvida aos argilominerais (LINDBERG & SNYDER, 1972;

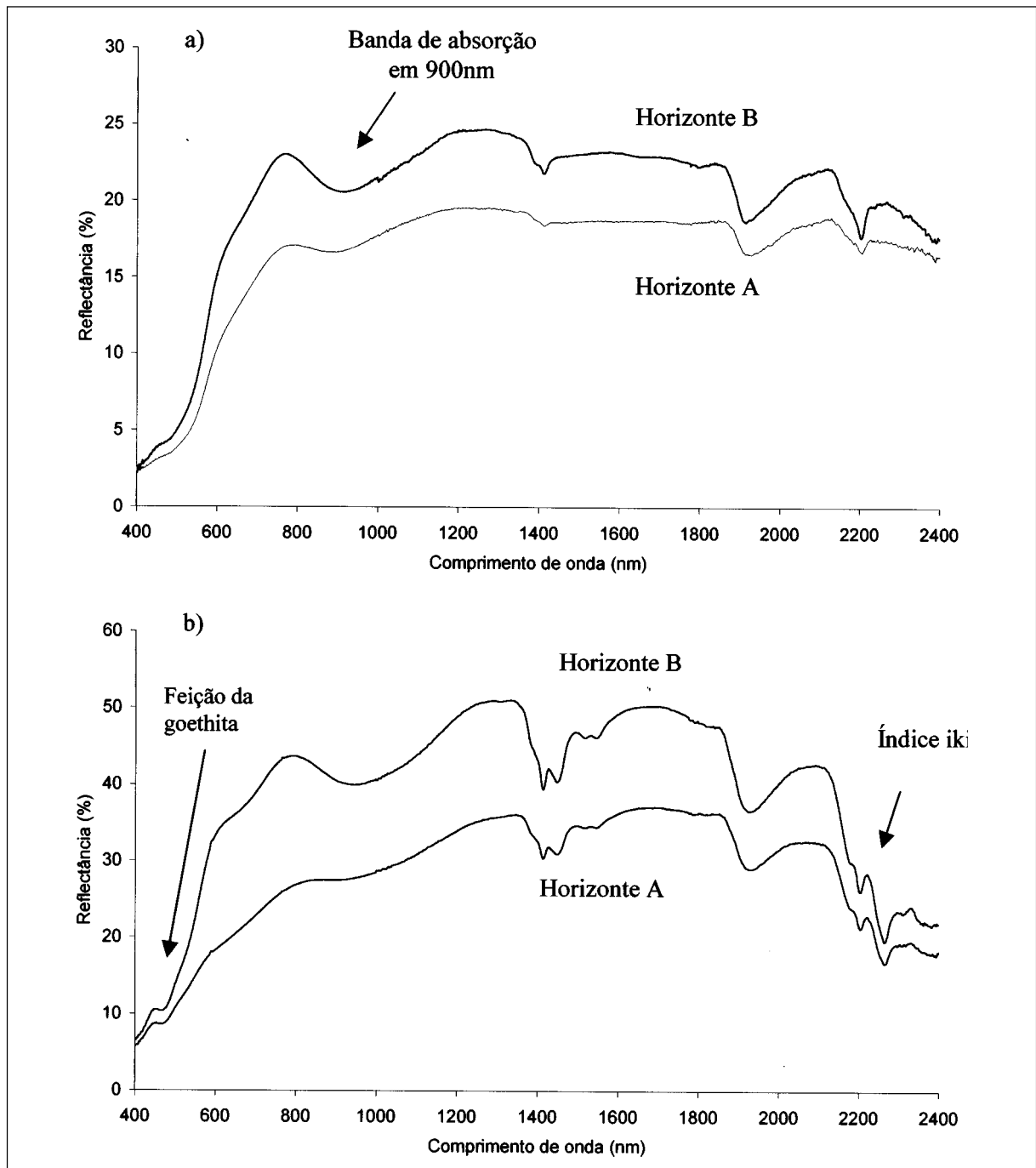


Figura 1 - Curvas espectrais dos horizontes A e B de um Latossolo Vermelho distroférrico típico (a) e de um Latossolo Amarelo ácrico típico (b) (Dalmolin, 2002).

HUNT 1980), e as absorções nas regiões de 1550 e 2300 nm são devido às vibrações dos grupos OH presentes na gibbsita (HUNT et al., 1971). Assim, as bandas de absorção que ocorrem ao longo do espectro óptico constituem feições diagnósticas que podem ser usadas para identificar diferentes minerais do solo

como óxidos de ferro (KOSMAS et al., 1984; MADEIRA et al., 1997) e argilominerais (MATHEWS et al., 1973a, MADEIRA NETTO et al. 1995). Além das feições específicas de absorção, a reflectância é caracterizada pela forma e pelo albedo da curva espectral. O albedo refere-se à designação

aplicada a reflectância, considerando-se o quociente entre o fluxo refletido e o fluxo incidente. Vários estudos descrevem a contribuição da matéria orgânica no comportamento espectral do solo (BOWERS & HANKS, 1965; SHIELDS et al., 1968; MATHEWS et al., 1973a; STONER & BAUMGARDNER, 1981; HENDERSON et al., 1992; DEMATTÊ & GARCIA, 1999; GALVÃO & VITORELLO, 1998).

Matéria orgânica

A matéria orgânica, que influencia várias características químicas e físicas do solo, é um constituinte primário da coloração do mesmo apresentando, portanto, uma estreita relação com a reflectância do solo. A matéria orgânica influencia na forma e no albedo da curva espectral ao longo de todo o espectro óptico, sendo que, na literatura, diferentes intervalos espectrais são utilizados em algoritmos para predizer seu teor no solo. BOWERS & HANKS (1965) relatam que a elevada temperatura em solos escuros durante o dia é atribuída à elevada absorção da energia solar, indicando que a reflectância é menor nestes solos. Estes autores mostraram que, ao longo de todo o espectro óptico, a reflectância foi superior nas amostras onde a matéria orgânica foi eliminada previamente com peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O mesmo comportamento foi observado por AL ABBAS et al. (1972), DEMATTÊ & GARCIA (1999) e DALMOLIN (2002), que observaram aumento na resposta espectral dos solos quando houve decréscimo de matéria orgânica. A matéria orgânica pode ainda exercer efeito de máscara diminuindo as feições de absorção de outros constituintes do solo. Teores superiores a $17g\ kg^{-1}$ de matéria orgânica no solo obliteram o efeito dos óxidos de ferro na reflectância e na cor, sendo mais forte este efeito na região do visível. O decréscimo no conteúdo de matéria orgânica acentua as fortes relações entre a reflectância e o ferro total, favorecendo o aparecimento de uma banda de absorção bem definida ao redor de 900nm (BAUMGARDNER et al. 1970; DEMATTÊ & GARCIA, 1999; GALVÃO & VITORELLO, 1998).

A seleção das bandas do espectro óptico para predição da matéria orgânica no solo é muito variável podendo ser fixadas de acordo com o conjunto de bandas disponíveis para cada sensor em particular (HENDERSON et al. 1989). MATHEWS et al. (1973a) observaram que amostras de solo com elevado conteúdo de matéria orgânica ($128g\ kg^{-1}$), apresentaram um decréscimo significativo na reflectância na região de 500 a 1150nm, enquanto que em amostras de solo com teores entre 20 e $30g\ kg^{-1}$ de matéria orgânica, o mesmo comportamento não foi

observado. KRISHMAN et al. (1980), ao estudarem a reflectância espectral de solos para identificar comprimentos de onda mais adequados para predizer o conteúdo de matéria orgânica do solo, concluíram que a região do visível proporcionou as melhores informações, com coeficiente máximo de correlação para os modelos estudados de 0,98 para as bandas na região de 623 e 564nm, enquanto que na região do infravermelho, o coeficiente máximo de correlação foi 0,87. Já, COLEMAN & MONTGOMERY (1987), usando um radiômetro portátil de campo constataram que com o aumento da umidade e dos teores de matéria orgânica no solo, ocorreu um decréscimo na reflectância espectral em todos comprimentos de onda estudados, sendo a região de 760 a 900nm a mais importante para predizer o conteúdo de matéria orgânica no solo. Posteriormente, COLEMAN et al. (1991) também com um radiômetro de campo, coletaram dados de reflectância em oito comprimentos de onda coincidentes com as bandas do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT. Estes autores concluíram que o conteúdo de matéria orgânica do solo foi melhor estimado, usando as bandas 2 (520 a 600nm - verde), 6 e 7 (1550 a 1750 e 2030 a 2350nm - infravermelho médio) e 8 (10400 a 12500nm - infravermelho termal). STONER (1979), baseado em resultados estatísticos e na avaliação quantitativa da reflectância do solo e características de absorção, observou que a faixa de 520 a 620nm foi a que teve maior correlação com o teor de matéria orgânica do solo.

Além do teor, os componentes da matéria orgânica também afetam o comportamento espectral. Constituintes orgânicos como ácidos húmicos e fúlvicos são conhecidos por influenciarem diferentemente a reflectância do solo (OBUKHOV & ORLOV, 1964). Ácidos húmicos têm um baixo coeficiente de radiância - 0,02 a 0,03 - enquanto os ácidos fúlvicos apresentam coeficientes de 0,04 a 0,06 (VINOGRADOV, 1981; HENDERSON et al., 1992). Solos orgânicos com material sáprico, altamente decomposto, têm baixa reflectância na região de 500 a 2300nm se comparado com material hêmico, moderadamente decomposto. Já o material fíbrico, ligeiramente decomposto, apresenta reflectância elevada, principalmente na região do infravermelho próximo (STONER 1979). A reflectância da matéria orgânica ao longo de seu processo de decomposição foi investigada por BEN-DOR et al. (1997) que constataram mudança no comportamento espectral na região do visível e infravermelho próximo, sendo esta mudança correlacionada à relação C/N. Estes autores relatam que a reflectância espectral é uma ferramenta

promissora para monitoração dos processos de decomposição da matéria orgânica. DEMATTÊ et al. (2004a) constataram diferenças no comportamento espectral de solos que foram tratados com resíduos de cana de açúcar em relação aos não tratados. Mudanças provocadas pelos processos de fermentação foram responsáveis pelas diferenças espectrais encontradas.

Óxidos de ferro

As diferentes cores dos óxidos de ferro são devidas à absorção seletiva da luz na região do visível, causada pela transição dos elétrons na camada orbital. Em amostras heterogêneas, o matiz avermelhado da hematita mascara o matiz amarelo da goethita, mesmo quando a relação hematita/hematita + goethita é relativamente baixa (RESENDE, 1976; SCHWERTMANN, 1988). Estes minerais, de grande ocorrência nas regiões tropicais e subtropicais afetam o comportamento químico e físico do solo e também influenciam seu comportamento espectral. Várias feições na curva espectral são atribuídas à presença de ferro, sendo que os minerais hematita e goethita mostram transições eletrônicas no espectro em 530nm e 480nm respectivamente (SHERMAN & WAITE, 1985). A goethita apresenta maior reflectância que a hematita (VITORELLO & GALVÃO, 1996; KOSMAS et al., 1984), sendo que a presença destes óxidos de ferro no solo influencia o comportamento da curva espectral principalmente na região do visível e infravermelho próximo (OBUKHOV & ORLOV, 1964; MONTGOMERY, 1976; FORMAGGIO et al., 1996; DEMATTÊ & GARCIA, 1999; GALVÃO et al., 1997), no infravermelho médio (STONER, 1979) diminuindo o albedo conforme aumenta seu teor no solo. Os óxidos de ferro também apresentam feições típicas, principalmente na região de 900nm (Figura 1), que são mais intensas quanto maiores forem os teores de ferro (MATHEWS et al., 1973a; STONER et al., 1980).

STONER et al. (1991), ao estudarem duas classes de Latossolos brasileiros, observaram bandas de absorção atribuídas aos óxidos de ferro em diferentes comprimentos de onda do espectro óptico, principalmente nas regiões de 400 a 550nm e em 650nm e 850nm. A maior diferença nos espectros destes solos ocorreu na faixa inferior a 550nm, devido ao predomínio de hematita no solo deixando-o opaco, ou seja, com elevado poder de absorção de luz. COLEMAN & MONTGOMERY (1987), ao estudarem Vertisols e Alfisols, determinaram as regiões de 630 a 690nm e 1150 a 1300nm, como sendo as mais importantes para explicar a presença de óxidos de ferro enquanto que MATHEWS et al. (1973a)

relatam que estes minerais influenciam a reflectância do solo na região de 500 a 1200nm. A cristalinidade dos minerais de ferro também pode influenciar o comportamento espectral de solos, conforme constatado por DEMATTÊ & GARCIA (1999). Estes autores observaram que os óxidos de ferro de baixa cristalinidade influenciaram a intensidade da reflectância espectral de 400 a 2500nm, enquanto a presença dos óxidos de ferro de boa cristalinidade-hematita e goethita - promoveu feições típicas nas regiões de 480 e 850nm. Os óxidos de ferro também podem ter efeito de máscara sobre outros constituintes do solo. STONER & BAUMGARDNER (1981) relatam que teores de óxidos de ferro maiores que 4% podem mascarar o efeito da matéria orgânica. MADEIRA NETTO (1991) ao estudar três Latossolos com diferentes teores e tipos de óxidos de ferro observou comportamento diferenciado na reflectância dos mesmos, quando a matéria orgânica foi removida. Nos solos com baixos teores de ferro, houve aumento da reflectância ao longo do espectro medido. Solos com teores mais elevados de ferro, sem presença de minerais opacos tiveram aumento na reflectância até 600nm e decréscimo até o limite de 2500nm, enquanto solos com presença de magnetita e ilmenita, tiveram decréscimo em sua reflectância ao longo do espectro. Em uma ampla revisão sobre reflectância do solo, BEN-DOR et al. (1999) concluíram que é possível a determinação dos teores de ferro no solo utilizando reflectância espectral, observando a interação existente entre este elemento e outros componentes do solo. Como os solos brasileiros em geral apresentam variados tipos e quantidades de compostos de ferro, pesquisas devem ser realizadas para permitir quantificação utilizando técnicas de reflectância espectral.

Cor

A cor do solo é um atributo facilmente determinado, sendo largamente utilizado para classificar e fazer interpretações sobre os solos. Sua importância reside no fato de que a matéria orgânica e os óxidos de ferro estão associados a ela (POST et al., 1993). Inúmeros trabalhos mostrando relações entre óxidos de ferro e cor (SCHWERTMANN, 1993), matéria orgânica e cor (SCHULZE et al., 1993) além dos parâmetros de cor obtidos através da reflectância espectral do solo (TORRENT et al., 1983; BARRON E TORRENT, 1986), são encontrados na literatura.

O desenvolvimento de relações de cor do solo com a reflectância podem auxiliar na identificação de características físicas e químicas do solo a partir de sensoriamento remoto. A cor do solo

é dependente da luz incidente, da percepção do observador ou instrumento de medida e também da energia refletida pelo solo, podendo ser, de acordo com FERNANDES & SCHULZE (1987), calculada a partir do espectro de reflectância. Usando esta técnica estes autores quantificaram pequenas diferenças na cor do solo, os quais seriam imperceptíveis à observação visual. MATTIKALLI (1997) utilizou 76 amostras de solos para validar um modelo que pode determinar a cor do solo por meio da sua reflectância, obtendo resultados com boa precisão. Os intervalos espectrais do radiômetro utilizado coincidiram com as bandas do sensor multiespectral (MSS) do LANDSAT, o que levou este autor a concluir que os resultados do seu estudo podem ter um considerável potencial de aplicação para identificação e mapeamento de solos em grandes áreas ou em áreas inacessíveis utilizando imagens de satélite. Nesta mesma linha, ESCADAFAL et al. (1989) obtiveram coeficientes de correlação superiores a 0,9 ao estudar relações entre a cor do solo, medida com a carta de Munsell, e as bandas do LANDSAT. Observações semelhantes foram verificadas por POST et al. (1994), que ao estudarem as características de cor da terra fina de solos, obtida com colorímetro e através de números digitais registrados pelo LANDSAT, obtiveram dados altamente correlacionados. A obtenção de relações válidas entre os parâmetros de reflectância e os determinados por outros métodos confirma o potencial de utilização da radiometria. MADEIRA NETTO et al. (1997) estimaram o teor de hematita em Latossolos utilizando as coordenadas cromáticas do CIE (Comisión Internacional de L'Eclairage), que consiste em parâmetros computacionais de cor. Em trabalho semelhante, MATHIEU et al. (1998) aplicaram as coordenadas cromáticas do CIE, obtidos de espectros de reflectância, e obtiveram uma elevada correlação entre a cor do solo e índices radiométricos. POST et al. (2000), ao avaliarem a influência da cor e da umidade no albedo do solo, concluíram que o mesmo pode ser estimado usando os dados de valores da carta de Munsell por meio da equação: $\text{albedo do solo (300 a 2800nm)} = 0,069 (\text{valor Munsell}) - 0,114$. Estes autores mediram a cor utilizando um colorímetro e um radiômetro multiespectral. Trabalho semelhante foi desenvolvido por CAMPOS (2001) em solos do estado de São Paulo, que recomenda a utilização de colorimetria e radiometria para a determinação da cor para fins de classificação de solos, eliminando dessa maneira a subjetividade do modelo tradicional (visual).

Distribuição do tamanho de partícula

A distribuição do tamanho de partícula no solo e a presença de diferentes argilominerais influem na resposta espectral dos solos. De uma maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior reflectância, devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo) e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de matéria orgânica, óxidos de ferro e menores teores de água. Segundo STONER (1979), a diminuição no tamanho de partícula, ou seja, o aumento da proporção de areia fina e areia muito fina, provoca aumento da reflectância em solos de textura arenosa. Para solos de textura média a fina, ocorre o contrário. Este autor relata também que, com teores elevados de umidade associados ao aumento de argila, houve decréscimo na reflectância na faixa espectral de 2080 a 2320nm. AL-ABBAS et al. (1972), ao implementarem modelos para mapeamento digital do teor de argila no solo, trabalharam na faixa espectral de 1000 a 1400nm, apresentando coeficiente de correlação entre o percentual de argila e a resposta espectral de 0,5. Já MONTGOMERY (1976) relata que o conteúdo de argila influenciou a reflectância na região de 500 a 700nm e ao redor das bandas de absorção de 1400, 1900 e 2200nm. Este autor relata ainda que o aumento do conteúdo de argila provoca forte atração do vapor de água na superfície do solo, resultando em forte absorção nos comprimentos de onda citados. COLEMAN et al. (1991) obtiveram correlações significativas entre propriedades espectrais e teores de silte e argila do solo. Estes autores elegeram as regiões entre 450 e 520nm, 520 e 600nm, 630 e 690nm e 2030 a 2035nm para estimar os teores de silte e as regiões 520 e 600nm, 1150 e 1300nm e 2030 a 2035nm como as melhores para estimar os teores de argila.

Minerais da fração argila

A composição mineralógica é fortemente dependente do grau de intemperismo do solo e do seu material de origem. O conhecimento da composição mineralógica é essencial para avaliar o comportamento espectral dos solos, devido às várias feições de absorção e a influência no albedo que os mesmos conferem as curvas espectrais. Conforme MATHEWS et al. (1973a), o tipo de argilomineral presente na amostra influencia a reflectância na faixa de 500 a 2500nm. Estes autores observaram que a nontronita mostrou resposta diferenciada na região de 1400 e 1900nm, indicando a influência da água adsorvida e também da hidroxila estrutural. Na curva espectral da caulinita, a forte absorção ocorrida na região de 2200nm é indicativa da influência da hidroxila

estrutural. A illita mostrou baixa reflectância para comprimentos de onda menores que 1700nm, além de baixa intensidade de absorção nas bandas de água e hidroxila, quando comparadas com as amostras de caulinita e nontronita. MADEIRA NETTO et al. (1995) propuseram um índice (iKi) para estimar o grau de intemperismo dos solos utilizando feições do espectro óptico atribuídos a presença de caulinita e gibsitita (Figura 1). Este índice apresentou correlação de 0,98 com o índice Ki que indica o grau de intemperismo do solo (EMBRAPA, 1999).

Umidade

Em relação à umidade, os solos se tornam mais escuros quanto maior for a umidade, ocasionando uma diminuição na reflectância do mesmo ao longo do espectro óptico (BOWERS & HANKS, 1965; STONER & BAUMGARDNER, 1981). De maneira geral, não ocorrem alterações significativas na forma das curvas espectrais em função da alteração da umidade, com exceção das bandas típicas de absorção de água nas regiões de 1400 e 1900 nm. O comportamento espectral de Latossolos estudado por STONER et al. (1991) mostrou a redução da reflectância dos solos com aumento da umidade, sendo que nos solos com teor elevado de hematita, devido a sua alta opacidade, praticamente não houve alteração na reflectância em comprimentos de onda menores que 520nm. De fato, BEDIDI et al. (1992) observaram que o comportamento espectral dos solos em relação à umidade, depende do comportamento dos seus componentes minerais e do comprimento de onda utilizado. DALAL & HENRY (1986) estabeleceram os comprimentos de onda de 1926; 1954 e 2150nm, como sendo os mais adequados para prever a umidade do solo enquanto que COLEMAN & MONTGOMERY (1987) determinaram o intervalo de 2080 a 2350nm do infravermelho médio como sendo o mais importante para determinar a variação de umidade dos solos estudados. Estes dados vêm ao encontro do trabalho desenvolvido por LOBELL & ASNER (2002) que obtiveram melhores resultados para determinação da umidade do solo na região do infravermelho médio.

Utilização de sensoriamento remoto em estudos de solos

Vários pesquisadores têm atuado na obtenção de índices radiométricos que apresentam correlações com características do solo importantes para sua identificação e mapeamento. Mapas digitais produzidos por MATHEWS et al. (1973b) por meio de interpretação de imagens multiespectrais mostraram

detalhes e precisão para serem úteis na determinação da localização e extensão de delineamentos de solos, sendo similares aos mapas produzidos por técnicas convencionais. Usando tonalidades, cores, padrões de uso da terra e padrões de drenagem em uma composição colorida do LANDSAT, WESTIN & FRAZEE (1976) prepararam um mapa de baixa intensidade que precisou, apenas, de pequenos ajustes após checagem a campo. De fato, imagens de satélites podem ser efetivamente utilizadas para agrupar classes em nível categórico elevado quando as características como textura superficial, conteúdo de matéria orgânica ou umidade do solo forem distintas, resultando em um comportamento espectral diferenciado entre os solos (HENDERSON et al., 1989). Com uma precisão de 97,2% COLEMAN et al. (1991) conseguiram diferenciar classes de solos, utilizando uma imagem TM do LANDSAT, sendo que as bandas mais efetivas foram em ordem decrescente: TM6, TM4, TM5, TM2, TM7, TM1 e TM3. Novos sistemas sensores multi e hiperespectrais estão sendo testados e irão proporcionar resultados melhores para classificação de imagens e conseqüentemente melhor identificação e distinção de alvos na superfície da terra, conforme foi constatado por GALVÃO et al. (2001) ao correlacionarem imagens do sensor AVIRIS e três diferentes solos do Brasil Central.

CONCLUSÕES

O comportamento espectral de solos é dependente de suas características físicas, químicas e biológicas. Utilizando técnicas de sensoriamento remoto, podem-se obter informações de maneira rápida e não destrutiva da constituição dos solos em nível de laboratório ou em nível orbital. Vários pesquisadores propuseram diferentes modelos para quantificar, entre outros componentes do solo, teores de matéria orgânica e óxidos de ferro. Pesquisas para melhor entender as relações existentes entre os diversos componentes do solo e a reflectância são necessárias, mas pode-se afirmar que esta ferramenta tem tido importância crescente na pedologia, tanto que, DEMATTÊ et al. (2004b) sugerem a inclusão de um novo termo, denominado *pedologia espectral*, fazendo alusão à utilização das propriedades espectrais no auxílio à identificação de classes de solos e seu mapeamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ABBAS, A.H. et al. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. *Soil Science*, Baltimore, v.114, p.477-485, 1972.

- BARRON, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxide on soil color. **Journal of Soil Science**, Ottawa, v.37, p.449-510, 1986.
- BAUMGARDNER, M.F. et al. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. **Proceedings Indiana Academy of Science**, Brookville, v.79, p.413-422, 1970.
- BEDIDI, A. et al. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. **Soil Science**, Baltimore, v.153, n.2, p.129-141, 1992.
- BEN-DOR, E. et al. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2500) during a controlled decomposition process. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.1-15, 1997.
- BEN-DOR, E. et al. Soil reflectance. In: REN CZ, A.N. **Remote sensing for the earth sciences**. New York : J. Wiley & Sons, 1999. p.111-188.
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v.100, p.130-138, 1965.
- CAMPOS, R.C. **Determinação da cor do solo e sua utilização na predição da cor do solo**. 2001. 71f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Agronomia, ESALQ/USP.
- 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**, Falls Church, v.53, p.1659-1663, 1987.
- COLEMAN, T.L. et al. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, Baltimore, v.151, p.355-361, 1991.
- DALAL, R.C.; HENRY, R.J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by infrared reflectance spectrometry. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.50, p.120-123, 1986.
- DALMOLIN, R.S.D. **Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de Latossolos de diferentes ambientes**. 2002. 151f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 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, p.327-342, 1999.
- DEMATTÊ, J.A.M. et al. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.187-200, 2004a.
- DEMATTÊ, J.A.M. et al. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v.121, p.91-112, 2004b.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília : EMBRAPA, 1999. 412p. il. (EMBRAPA/CNPQ-RJ. Documentos, 5).
- ESCADAFAL, R. et al. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of LANDSAT MSS and TM data. **Remote Sensing Environment**, New York, v.27, p.37-46, 1989.
- FERNANDEZ, R.N.; SCHULZE, D.G. Calculation of soil color from reflectance spectra. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.1277-1282, 1987.
- FORMAGGIO, A.R. et al. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.467-474, 1996.
- GALVÃO, L.S. **Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectros**. 1994. 191f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo.
- GALVÃO, L.S. et al. Relationship of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.24-33, 1997.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.19, p.1969-1979, 1998.
- GALVÃO, L.S. et al. Variations in reflectance of tropical soils: Spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.75, p.245-255, 2001.
- HENDERSON, T.L. et al. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.1778-1784, 1989.
- HENDERSON, T.L. et al. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.865-872, 1992.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals. **Modern Geology**, New York, v.1, p.283-300, 1970.
- HUNT, G.R. et al. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, New York, v.1, p.195-205, 1971.
- HUNT, G.R. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: SIEGAL, B.S.; GILLESPIE, A.R. **Remote sensing in geology**. New York : J. Wiley & Sons, 1980. p.5-45.
- KOSMAS, C.S. et al. Characterization of iron oxide minerals by second-derivate visible spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, p.401-405, 1984.
- KRISHNAN, P. et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.1282-1285, 1980.
- LINDBERG, J.D.; SNYDER, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. **American Mineralogist**, Washington, v.57, p.485-493, 1972.
- LOBELL, D.B.; ASNER, G.P. Moisture effects on soil reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.722-727, 2002.
- MADEIRA NETTO, J.S. **Etude quantitative des relations constituants minéralogiques - reflectance diffuse des latosols**

- brésiliens. Applications à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasília).** 1991. 238f. Thèse (Doctorat en Science du Sol) - Université Pierre et Marie Curie, UFR des Sciences de la Terre, Paris.
- MADEIRA NETTO, J. et al. **Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in Lateritic soils.** Paris : C.R. Academy Science, 1995. p.119-128. (Serie Iia).
- MADEIRA NETTO, J. et al. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasília, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.18, p.2835-2852, 1997.
- MADEIRA NETTO, J.S. Comportamento espectral dos solos. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento remoto - reflectância dos alvos naturais.** Brasília, DF : UnB; Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2001. p.127-147.
- MATHEWS, H.L. et al. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.37, p.421-424, 1973a.
- MATHEWS, H.L. et al. Application of multispectral remote sensing to soil survey research in southeastern Pennsylvania. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.37, p.88-93, 1973b.
- MATHIEU, R. et al. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.66, p.17-28, 1998.
- MATTIKALLI, N.M. Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of LANDSAT sensors using laboratory spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.59, p.14-28, 1997.
- MONTGOMERY, O.L. **An investigation of the relationship between spectral reflectance and chemical, physical and genetic characteristics of soil.** 1976. 148f. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo : Edgard Blücher, 1992. 308p.
- OBUKHOV, A.I.; ORLOV, D.S. Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigation. **Soviet Soil Science**, Washington, v.1, p.174-184, 1964.
- POST D.F. et al. Correlations between field and laboratory measurements of soil color. In. BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. **Soil Color.** Madison : SSSA, 1993. p.35-49. (Special Publication, 31).
- POST, D.F. et al. Relations between soil color and LANDSAT reflectance on semiarid rangelands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1809-1816, 1994.
- POST, D.P. et al. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.1027-1234, 2000.
- RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil.** 1976. 237f. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University.
- SCHULZE, D.G. et al. Significance of organic matter in determining soils colors. In. BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. **Soil color.** Madison : SSSA, 1993. p.71-90. (Special Publication, 31).
- SCHWERTMANN, U. Some properties of soil and synthetic iron oxides. In: STUCKI, J.W. et al. **Iron in soils and clay minerals.** Dordrecht : Nato Advanced Study Institute, 1988. p.203-250. (NATO 451 studies).
- SCHWERTMANN, U. Relations between iron oxides, soil color and soil formation. In. BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. **Soil color.** Madison : SSSA, 1993. p.51-69. (Special Publication, 31).
- SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p. 988-998, 2002.
- SHERMAN, D.M.; WAITE, T.D. Electronic spectra of Fe oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**, Washington, v.70, p.1262-1269, 1985.
- SHIELDS, J.A. et al. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.48, p.271-280, 1968.
- STONER, E.R. **Physicochemical, site and bi-directional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils.** 1979. 132f. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University.
- STONER, E.R. et al. **Atlas of soil reflectance properties.** West Lafayette : Purdue University, 1980. 75p.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.45, p.1161-1165, 1981.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Data acquisition through remote sensing. In: BEATTY, M.T. et al. **Planning the uses and management of land.** Madison : Soil Science Society of America, 1986. p.159-185.
- STONER, E. et al. Discriminação espectral de Latossolos do Planalto Central brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, p.1599-1606, 1991.
- TORRENT, J. et al. Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science, Baltimore**, v.136, p.354-358, 1983.
- VINOGRADOV, B.V. Remote sensing of the humus content of soils. **Soviet Soil Science**, Washington, v.1, p.114-123, 1981.
- 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. In: POUGET, M.J.; GUYOUT, G. **Spectral properties and remote sensing of soils and rocks.** Photo interpretation. Paris : Eska, 1996. V.34, p.77-96. (Special issue).
- WESTIN, F.C.; FRAZEE, C.J. LANDSAT data, its use in a Soil Survey Program. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.40, p.81-89, 1976.