

REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE CULTURAS AGRÍCOLAS ANUAIS (I): ESPECTRORRADIOMETRIA

Márcio de Morisson Valeriano

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil.
valerian@ltd.inpe.br

Recebido 10 de novembro de 2002; revisado 20 de janeiro; aceito 25 de fevereiro de 2002

RESUMO – São relatados trabalhos voltados ao conhecimento do comportamento espectral de culturas agrícolas, dos fundamentos básicos às diferentes aplicações. A reflectância espectral de dosséis vegetais foi analisada em função de suas variáveis biofísicas, baseando-se em dados experimentais de laboratório e de campo. Os estudos fundamentais enfocam como princípio elementar a reflectância de folhas, suas causas e variantes. A extensão desses conhecimentos para o dossel vegetal é feita incorporando elementos de cena, como a geometria de iluminação, observação, reflectância do solo ou estrato subjacente e a arquitetura das plantas. O dado espectral é relatado como o resultado da ação sinérgica de diversos fatores, cuja interpretação se faz alvo do desenvolvimento metodológico em sensoriamento remoto agrícola. Ante as condições tecnológicas vigentes, recomenda-se um resgate desses conhecimentos para o aproveitamento adequado das facilidades atuais de aquisição e análise da reflectância de dosséis agrícolas.

Palavras-Chave – agricultura, dossel, reflectância espectral, espectrorradiometria.

ABSTRACT – This paper reports a series of studies conducted towards the comprehension of spectral properties of crop canopies, from basic rationales to different applications. The spectral reflectance of crop canopies were studied in relation to their biophysical variables, with data collected in field and laboratory trials. The fundamental works focuses leaf reflectance as the elementary principle, with its causes and factors.

This knowledge is extended to vegetative canopy by means of incorporating scene elements, as illumination and observation geometry, underlying soil reflectance and plant architecture. The spectral data is reported as a result of diverse synergistic factors, whose interpretation is subject of methodological development in remote sensing of agriculture. Considering the technological resources of present times, a retrieval of this knowledge is recommended to properly employ nowadays facilities for the acquisition and analysis of crop canopy reflectance data.

Keywords: agriculture, canopy, spectral reflectance, spectroscopy.

INTRODUÇÃO

Em agricultura, os dados de satélite têm sido bastante utilizados para identificar e mapear e estimar as condições de diferentes culturas agrícolas. A espectrorradiometria de campo é uma técnica mais imediata e precisa para o estudo das relações entre dados espectrais e informações ligadas ao alvo. Por permitir maior controle das condições do alvo e da aquisição dos dados, a espectrorradiometria tem sido largamente utilizada nos trabalhos de pesquisa em sensoriamento remoto. O desenvolvimento e a profusão atuais de técnicas de correção atmosférica possibilitam uma aproximação dos resultados de espectrorradiometria àqueles obtidos por sensores orbitais. Do mesmo modo, a disponibilização crescente de bases digitais de dados do meio físico (relevo, solos, atmosfera etc.) pode suprir os levantamentos regionais por satélite com o controle de variáveis auxiliares.

DESENVOLVIMENTO

O conhecimento das interações da radiação solar com a vegetação é fundamental para a interpretação de dados de sensoriamento remoto, bem como para o

desenvolvimento de novos sensores e metodologias de análise. A parte do organismo vegetal envolvida nessa interação é referida como dossel, constituído por um conjunto estruturado de folhas, caules, espigas, flores etc., conforme o tipo e as condições da planta. Sob o ponto de vista do sensoriamento remoto, um determinado tipo de dossel é caracterizado pela sua constituição, pelo comportamento espectral de seus componentes, sua estrutura interna e sua organização no espaço.

REFLECTÂNCIA DE FOLHAS

Devido à especialização como estruturas fotossintetizantes, as folhas têm grande importância na interação do fluxo radiante com a vegetação. A estrutura da folha desempenha papel de relevo na sua reflectância espectral, uma vez que detalhes na anatomia e fisiologia foliar têm funções variadas no processo de interação. Um corte transversal de uma folha típica mostra camadas de tecidos que se sucedem no sentido dorsiventral. Nas faces superior (ventral) e inferior (dorsal) temos a epiderme, formada por uma camada de células de formato tabular relativamente não especializadas, com pouca ou nenhuma clorofila. Entre a epiderme e o meio externo à folha, desenvolve-se uma camada de cutina, substância graxa, formando a cutícula, que normalmente se apresenta coberta de estruturas cerosas (Esau, 1974).

As relações básicas entre a radiação solar e a folha se fundamentam em eventos ocorridos no mesófilo (**Figura 1**). Apesar das variações anatômicas observadas entre as diversas espécies de plantas, pode-se descrever o mesófilo como um arranjo estruturado dos parênquimas paliçádico e esponjoso. O tecido paliçádico é composto de numerosas células alongadas que se dispõem justapostas, formando uma camada compacta em proximidade com a epiderme.

O parênquima paliçádico é um tecido fotossintetizante especializado, que contém em suas células numerosos cloroplastos, estruturas ricas em clorofila. Em contraste, o parênquima esponjoso exibe células vacuoladas dispostas com grandes espaços intercelulares, por isso referido também como tecido lacunoso (Esau, 1974).

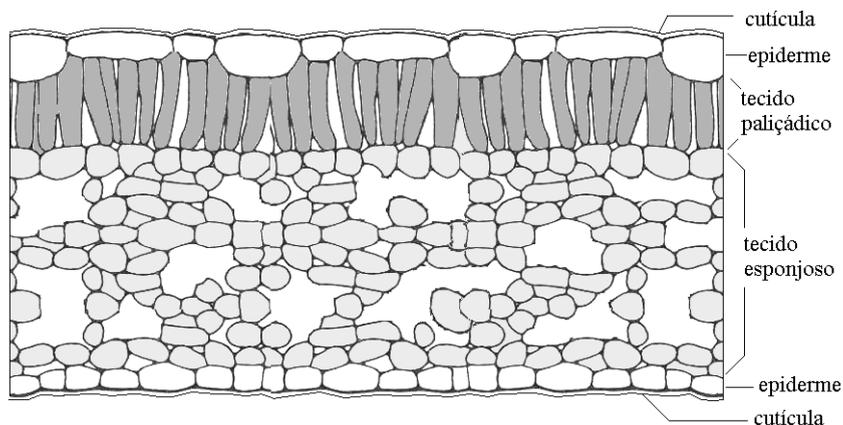


Figura 1 – Estrutura do mesófilo em corte transversal de uma folha típica.

O mesófilo das gramíneas mostra, como regra, ausência de diferenciação em parênquimas paliçádico e esponjoso, ou seja, elas têm mesófilo compacto. No entanto, abaixo das duas camadas epidérmicas, há fileiras de células que apresentam organização mais regular do que as do restante do mesófilo. Com esclerênquima bastante desenvolvido, as folhas de gramíneas comumente apresentam suas fibras dispostas em forma de placas longitudinais que se estendem dos feixes vasculares maiores em direção à epiderme. Uma folha típica de gramínea apresenta fileiras longitudinais de células grandes, chamadas de células buliformes (Esau, 1974). Estas células formam faixas de diferentes

larguras, e são conhecidas como células motoras, por estarem envolvidas nos processos de enrolamento e dobra das folhas.

No que se refere à resposta espectral de uma folha típica, Knipling (1970) considerou três grandes faixas do espectro eletromagnético: a região do visível (400nm a 700nm), em que pigmentos absorvem a energia incidente, com reflectância baixa; a região do infravermelho próximo (700nm a 1300nm), com reflectância relativamente alta; e a do infravermelho médio (1300nm a 3000nm), com reflectância relativamente baixa (**Figura 2**).

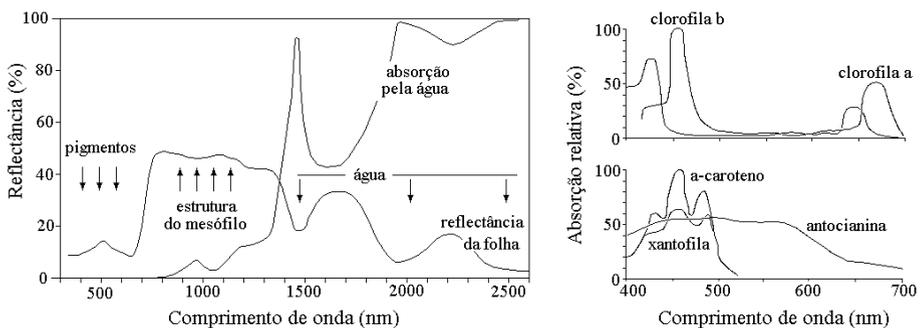


Figura 2 – Curvas de reflectância de uma folha e de absorção da água (esq.) e curvas de absorção de pigmentos foliares (dir.).

A energia radiante interage com as folhas no mesófilo, uma vez que a cutícula é praticamente transparente. O fluxo é difundido através da cutícula e da epiderme às células e espaços intercelulares de ar do mesófilo. O espectro de absorção de plantas superiores está restrito à região do visível, com máximos em 445nm e 645nm. Uma composição de variados pigmentos fotossintéticos atuam no processo de absorção, em que a clorofila é o pigmento predominante e o único a atuar em torno de 645nm (Gates *et al.*, 1965). Embora a composição dos

pigmentos de uma planta seja ditada pela sua constituição genética, os pigmentos do cloroplasto em geral se distribuem em 65% de clorofilas, 6% de carotenóides e 29% de xantofilas. Os pigmentos em solução apresentam as faixas espectrais de atenuação da energia eletromagnética (**Figura 2**) mais estreitas do que aquela exibida pelas folhas.

No infravermelho próximo, cerca de 40% a 60% da energia radiante é espalhada para cima pela superfície de incidência e constitui a porção da radiação correspondente à reflectância; quase o total do restante é espalhado para baixo, e constitui a porção transmitida. Esse mecanismo único de espalhamento é o motivo da semelhança entre o espectro transmitido e o refletido. Em folhas de gerânio variegado, na parte aclorofilada, a reflectância no visível se iguala à reflectância no infravermelho próximo, indicando que a interação do visível com a estrutura foliar não é diferente da interação do infravermelho próximo. No infravermelho médio, a reflectância das folhas está condicionada à forte absorção causada pela água. Os pigmentos e a água influem nas regiões espectrais de reflectância relativamente baixa de modo indireto, e não têm, por si, essas características espectrais (Knipling, 1970).

Sinclair *et al.* (1973) apresentaram uma hipótese pela qual a luz tem trajetória difusa através do mesófilo, ocorrendo, no interior da folha, a reflexão total e a reflexão crítica. Mestre (1935) citado por Sinclair *et al.* (1973) considera que, para ocorrer reflexão crítica, a radiação deve atravessar materiais de índices de refração contrastantes e o ângulo de incidência deve ser maior que o ângulo crítico de reflexão. O mesófilo esponjoso das folhas parece estar dentro das duas condições, com grandes espaços intercelulares e células com paredes dispostas em todas as orientações possíveis. Verificaram que a difusão no tecido

do mesófilo favorece a probabilidade de absorção dos comprimentos de onda do visível pelos pigmentos, em virtude do aumento da trajetória interna. Com o aumento do poder de difusão do mesófilo, a transmitância decresce, aumentando a reflexão e a absorção.

Gausman *et al.* (1973), estudando o mesófilo de plantas cultivadas, observaram que as folhas de mesófilo compacto foram as que apresentaram as menores reflectâncias em 1000nm, em concordância com a natureza da reflectância do infravermelho próximo, descrita anteriormente. Folhas novas nos ápices dos ramos têm mesófilo compacto, essencialmente composto por pequenas células protoplásmicas, enquanto aquelas plenamente desenvolvidas o têm lacunoso. Coerentemente, o mesófilo lacunoso da laranjeira, comparado ao de folhas mais jovens apresentou reflectâncias 5% menores no visível e 15% maiores no infravermelho próximo (Gausman, 1985). Numa evidência do papel dos espaços intersticiais do mesófilo na difusão da energia radiante, Moss & Loomis (1952) observaram que a infiltração de água em folhas causou um decréscimo na absorção através da maior parte do espectro visível e, aparentemente, estreitou a feição em torno de 680nm. A infiltração artificial de água no mesófilo não deve ser confundida com a condição natural do *status* hídrico de plantas. Ripple (1986) verificou os efeitos indiretos da água sobre o visível e infravermelho próximo. As relações entre o teor de água foliar e estas faixas advêm, respectivamente, da variação do nível de clorofila e da estrutura interna, como resposta natural da planta. Folhas sob estresse hídrico apresentaram reflectância maior no visível e menor no infravermelho próximo.

Dinger (1941), citado por Sinclair *et al.* (1973), observou que a clorofila é transparente no infravermelho próximo, onde a reflectância e a transmitância

são altos. Sinclair *et al.* (1973), baseados em estudos sobre a reflectância do infravermelho próximo de folhas de diferentes ecossistemas (Obatan, 1941 e 1944, citados por Sinclair *et al.*, 1973), concluíram que também a cutícula e a epiderme não atuam no infravermelho próximo.

No entanto, a reflectância especular, originada da cutícula das folhas, também foi objeto de alguns trabalhos (Vanderbilt e Grant, 1984; Grant *et al.*, 1987). Sinclair *et al.* (1973) consideraram ser possível a reflexão especular na superfície das folhas, caso em que obedece às leis da óptica geométrica, passível, portanto, de cálculo a partir do ângulo de incidência e do índice de refração da cutícula. A intensidade desta reflectância, segundo um dado ângulo de incidência sobre a superfície difusora, tende a obedecer à lei do cosseno de Lambert. A reflectância difusa na superfície, por sua vez, tem origem na rugosidade de cutículas de superfície acidentada, não sendo, portanto, passível de ser calculada. A cutícula das plantas é estratificada e freqüentemente apresenta estruturas cerosas, identificáveis por microscopia eletrônica. No caso do trigo, há estruturas aciculares irregulares, distribuídas sobre uma superfície cerosa plana. A reflexão especular, que aí ocorre, pode ter uma importância razoável, dependendo da situação de aquisição do dado espectral. Nesse caso, a reflectância observada não corresponde à interação da luz com o mesófilo somente, havendo uma variação da reflectância independente da situação do mesófilo (Vanderbilt e Grant, 1983). Grant *et al.* (1987) observaram que a reflectância especular das folhas está por si sujeita a efeitos de condições ambientais, de distúrbios fisiológicos e da fenologia da planta, que atuam através de modificações nos corpos cerosos da cutícula.

Subtraindo a porção especular da reflectância total, tem-se somente a fração difusa, que é a que penetrou na folha, interagindo com os pigmentos. Portanto, as bandas de absorção são mais pronunciadas para a porção difusa (Vanderbilt e Grant, 1983), o que permite melhor observação da resposta causada pela interação com o mesófilo isoladamente.

REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS

Quando se estuda a reflectância de um dossel, fatores como solo, sombras e a própria morfologia do dossel atuam junto com a reflectância de folhas simples. Em bases percentuais, a reflectância de um dossel é consideravelmente menor do que a de uma folha isolada (Knipling, 1970). Os níveis de reflectância de um dossel são 40% e 70% dos de uma folha, respectivamente, nas regiões do visível e do infravermelho próximo. Isso resulta num realce do platô do infravermelho, que é causado pela transmitância, através das folhas superiores do dossel, da energia refletida pelas folhas inferiores, resultando no processo conhecido por mecanismo de múltiplas camadas, descrito por Allen e Richardson (1968). O espectro de reflectância do dossel de uma cultura anual apresenta uma evolução concomitante à sucessão de estágios fenológicos da planta.

Segundo Knipling (1970), quando doenças ou estresses fisiológicos afetam as propriedades espectrais de folhas individuais, as mudanças iniciais mais pronunciadas freqüentemente ocorrem na região do visível, devido à sensibilidade da clorofila a distúrbios fisiológicos. Porém, a detecção das condições de estresse se baseia, não na mudança de resposta de folhas individuais, mas na redução da área foliar total exposta ao sensor. Essa redução pode surgir da perda direta de folhas, da mudança de sua orientação ou da

interrupção do crescimento da planta. Nesses casos, a reflectância tende a ser alterada no infravermelho próximo do que no visível, por causa da redução do mecanismo de camadas ou por um aumento da exposição do solo.

O nível de nitrogênio na cultura do trigo ligado a reflectância foi estudado por Hinzman *et al.* (1986) com base nas características de crescimento. O crescimento das plantas foi significativamente afetado por diferentes níveis de fertilização, o que levou a alterações da reflectância. A resposta a níveis crescentes de nitrogênio foi caracterizada por um decréscimo na reflectância do visível, com acréscimo no infravermelho próximo. As maiores diferenças observadas ocorreram no infravermelho próximo, indicando maior efeito dos tratamentos sobre a massa de folhas do que sobre a absorção clorofiliana. Com mesmo enfoque, Demetriades-Shah e Court (1987) consideraram que deficiência de nutrientes pode tanto ter influência indireta (via estrutura, crescimento), como ser diretamente responsável por mudanças espectrais. A deficiência de nitrogênio causa tipicamente uma clorose, ou amarelecimento, devido à presença do elemento na constituição das clorofilas.

Segundo Schieving *et al.* (1992), o florescimento de plantas anuais causa uma intensa extração nitrogênio do aparato fotossintético, chegando a induzir a queda de folhas. Seus resultados confirmam o florescimento como uma etapa de mudanças anatômicas e fisiológicas de dosséis. Antes desse período, o espectro de reflectância das folhas é descrito como relativamente constante. A degradação dos pigmentos carotenóides, que absorvem na região do azul, (**Figura 2**) ocorre no final do ciclo, explicando o aumento de reflectância nesta faixa com a senescência (Gausman, 1985). No caso dos solos desenvolvidos sob clima tropical, cuja marcante presença de óxidos de ferro causa uma larga faixa de

absorção em torno de 430nm (Madeira Netto, 1991), a reflectância do azul pode, deste modo, fornecer distinção entre solo exposto e restos de palha ou cultura senescente. Tal contraste é esperado devido à interceptação, por material não-absorvente e altamente difusor (palha), da luz que incidiria sobre o solo. Na **Figura 3** são mostradas curvas espectrais de um dossel de trigo sobre Latossolo Vermelho-Escuro (Valeriano, 1992), em que se pode observar sua evolução fenológica.

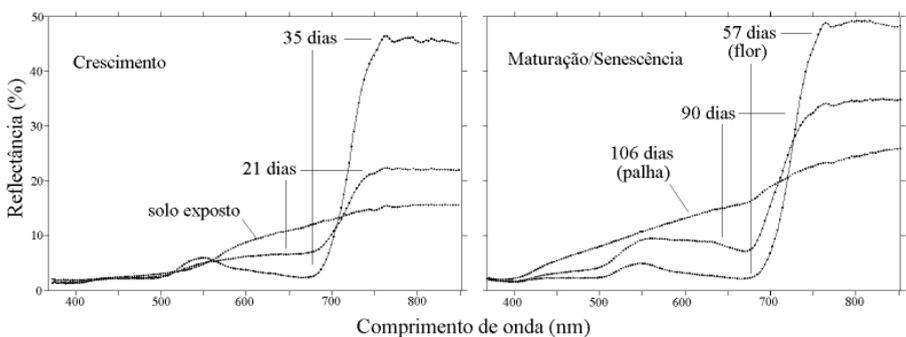


Figura 3 – Evolução fenológica do espectro de reflectância de um dossel.

Das medidas radiométricas derivam-se índices espectrais propostos para estimar variáveis agrônômicas. Incorporando mais de uma banda, esses índices se apóiam no fato de que, com o aumento da biomassa fotossinteticamente ativa, há um aumento na reflectância do infravermelho próximo e um decréscimo na reflectância do visível. Muitos desses índices, que envolvem razões entre bandas, são supostamente independentes da quantidade de iluminação e minimizam a necessidade de determinação de irradiância para o cálculo das reflectâncias. Há outro grupo de índices denominados índices ortogonais ou perpendiculares, que consistem em polinômios do primeiro grau também envolvendo mais de uma banda espectral. Vários trabalhos a respeito da relação entre esses índices e

variáveis biofísicas da vegetação foram feitos. Dentre eles, Tucker (1979); Daughtry *et al.* (1980); Aase *et al.* (1984); Best e Harlan (1985); Hatfield *et al.* (1985); e Wiegand e Richardson (1987). A maior parte desses estudos explora relações obtidas experimentalmente através de regressões. Não raro, diferentes índices apresentam-se funcionalmente equivalentes como foi observado por Perry e Lautenschlager (1984) e Dusek *et al.* (1985). Apesar disso, conforme a situação, estes índices mostram diferenças no desempenho como indicadores da condição do dossel.

No que concerne a relações espectro-agronômicas, o IAF tem sido estudado com especial atenção, devido ao alto interesse como informação agronômica, e à sua evidente relação com a resposta espectral. Tucker (1979) estudou combinações das bandas do vermelho e do infravermelho próximo e concluiu que estas são muito sensíveis às variações de IAF, daí seu emprego em muitos dos índices espectrais, com vários trabalhos a respeito. Ilustrando esse relacionamento, a **Figura 4** esquematiza a relação entre o IAF e a reflectância na faixa do vermelho e do infravermelho próximo, para uma cultura agrícola típica, com dados colhidos da emergência até o florescimento.

As relações do IAF do trigo com a reflectância no vermelho e no infravermelho próximo apresentam-se não-lineares (Daughtry *et al.*, 1980; Hinzman *et al.*, 1986; Formaggio, 1989; Valeriano, 1992), principalmente quanto ao vermelho, que tende a estabilizar com valores baixos de IAF, em torno de 2,0, conforme a arquitetura da planta. No infravermelho próximo, o crescimento da reflectância estabiliza-se sob com valores maiores de IAF, devido à maior transmitância das folhas nessa faixa. Destaca-se o predomínio de relações curvilineares, existindo um IAF crítico, de saturação, acima do qual não se altera a resposta espectral do dossel. Com base na Figura 4, pode-se definir 3

diferentes relações entre os índices de vegetação e o IAF de um dossel: da emergência até a cobertura do solo (solo-a); da cobertura do solo até o ponto crítico para o infravermelho próximo (a-b); após este ponto crítico (b em diante), quando reflectância é insensível ao crescimento de IAF. Na fase de senescência, a degeneração dos pigmentos e da estrutura do dossel se somam aos fenômenos atuantes nessas relações espectro-agronômicas.

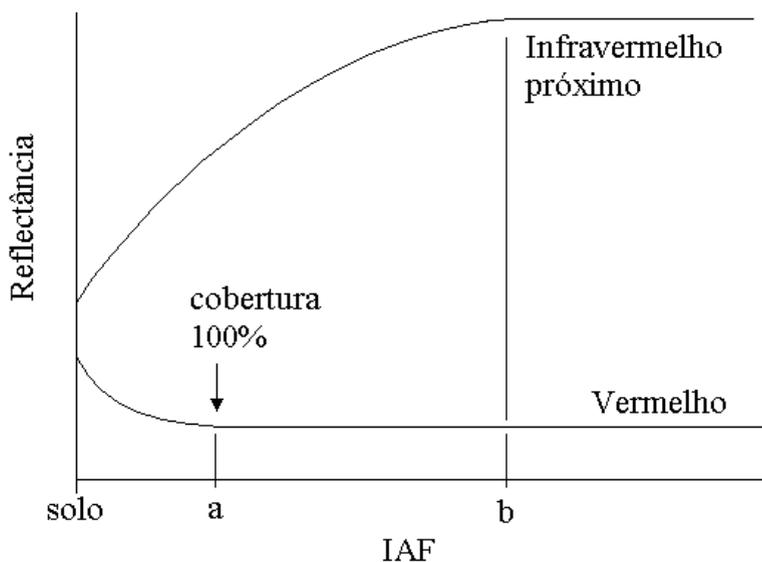


Figura 4 – Relação entre a reflectância e o IAF de dosséis vegetais.

Reconhecidas a praticidade e a profusão de seu uso em outros alvos, em dosséis agrícolas, tipicamente uniformes, as diferentes causas de variação dos índices espectrais que utilizam estes dados sucedem-se na condição de principal fator de uma fase a outra, o que confere aos índices um desempenho ambíguo ao longo do ciclo. Deve-se lembrar que os índices representam uma simplificação de diferentes fenômenos da reflectância da vegetação, embutindo em sua variação aspectos genéticos e fisiológicos, manifestados principalmente nas

faixas do visível, e aspectos morfológicos e estruturais, expressas na reflectância do infravermelho próximo. O que não permite que se estime a condição desses diferentes aspectos independentes numa relação inequívoca quando estejam atuando mais do que uma variável.

O principal ponto de inflexão da curva de reflectância da vegetação, referido como *red edge* - borda vermelha (Gates *et al.*, 1965; Horler *et al.*, 1983; Baret *et al.*, 1987; Millers *et al.*, 1990; Clevers and Büker, 1991; and Baret *et al.*, 1992) é relatado como indicador do tipo e das condições do dossel. A relação entre o comprimento de onda desse ponto (λ_{re}) e a concentração de clorofila é a mais freqüente das aplicações desse dado. Estudando culturas de cereais, Horler *et al.* (1983), observaram uma distribuição de λ_{re} fortemente bimodal, correspondendo a fases fenológicas caracterizadas naturalmente por diferentes concentrações de clorofila. Essa relação foi observada como independente da exposição do solo e pode ser definida com uma fraca cobertura, de 20%, pelo dossel. Baret *et al.* (1992) verificaram que a λ_{re} mostrou-se livre de efeitos oriundos da aquisição por satélites (atmosfera, iluminação e reflectância do solo subjacente).

É muito comum separarem-se os dados segundo duas fases do desenvolvimento, antes e depois do máximo IAF, obtendo-se duas funções de relação com os dados espectrais (Asrar *et al.*, 1984; Hatfield *et al.*, 1985; Wiegand e Richardson, 1987). A divisão não é arbitrária, uma vez que após o IAF máximo, começa a formação de material senescente, alterando-se a composição do dossel em termos de seus elementos. No caso particular de culturas agrícolas anuais, o máximo IAF corresponde ao florescimento. Com a maturação e senescência dos dosséis, suas reflectâncias se aproximam daquelas

do solo exposto. A senescência é acompanhada de uma degradação dos pigmentos e, conseqüentemente, da diminuição da absorção no visível. A diminuição da reflectância no infravermelho próximo é atribuída a mudanças na disposição e na magnitude da área foliar (Hinzman *et al.*, 1986) que, segundo Knipling (1970), é seguida da degeneração da estrutura celular.

A arquitetura da planta influi de modo importante nas relações espectro-agronômicas (Pinter Jr. *et al.*, 1985). Jackson e Pinter Jr. (1986) examinaram o efeito da arquitetura do dossel de trigo sobre sua resposta espectral. Os dosséis estudados diferiam no arranjo geométrico de sua folhagem com as demais variáveis (reflectância das folhas, IAF, biomassa) praticamente iguais. Foram considerados dados sobre variedades de trigo com distribuição angular de folhas (DAF) planófila e erectófila. Foram calculadas a razão de bandas (Razão Simples, RS) e um Índice Perpendicular de Vegetação (PVI). Os resultados de PVI foram opostos aos da RS. O dossel planófilo apresentou PVI mais altos, desde o início até a senescência. O dossel planófilo teve maior PVI que o do erectófilo, enquanto este apresentou maior RS do que o planófilo. Ficou demonstrado que dosséis de geometrias diferentes podem apresentar índices de vegetação muito variáveis. Além disso, os índices responderam diferentemente à arquitetura das plantas.

Demetriades-Shah e Court (1987) verificaram que o contraste entre a cultura e o solo é muito maior do que entre a cultura sadia e a cultura clorótica. Assim, a reflectância do solo pode encobrir perfeitamente a detecção de clorose em dosséis com pequena cobertura. A alternativa proposta por estes autores foi a adoção de visada oblíqua para tais condições. Pinter Jr. *et al.* (1983) relataram que a correlação entre dados espectrais e IAF varia também com o ângulo zenital

solar, principalmente na banda do infravermelho próximo, em que essa correlação mostra-se muito prejudicada com grandes ângulos zenitais. Pinter Jr. *et al.* (1983) estudaram o padrão diário de índices de vegetação de dosséis de trigo e verificaram que os índices do tipo razão variam em função da geometria de iluminação. Observou-se que os dados espectrais sofrem oscilações em curtos períodos de tempo, além da variação ao longo do dia. A evolução dos índices ao longo do dia apresentou-se simétrica em relação ao meio-dia solar, qualquer que fosse o IAF do dossel. Alguma assimetria pode ser explicada por porções diferentes de solo iluminado, causadas pela variação de azimute solar relativo à orientação das linhas de plantio. As maiores mudanças ocorreram quando o IAF verde era baixo e quantidades substanciais de solo iluminado ou de folhas marrons iluminadas foram vistas pelo radiômetro. Desse modo, conforme a hora do dia, dosséis com IAF diferentes tiveram índices semelhantes. Foi sugerido que a observação de dosséis com pequeno IAF é favorecida se as medições fossem feitas com o Sol em baixos ângulos de elevação. Ao contrário, situações de alto IAF seriam mais bem observadas sob ângulos de elevação solar altos, com azimute paralelo às linhas de plantio (**Figura 5**).

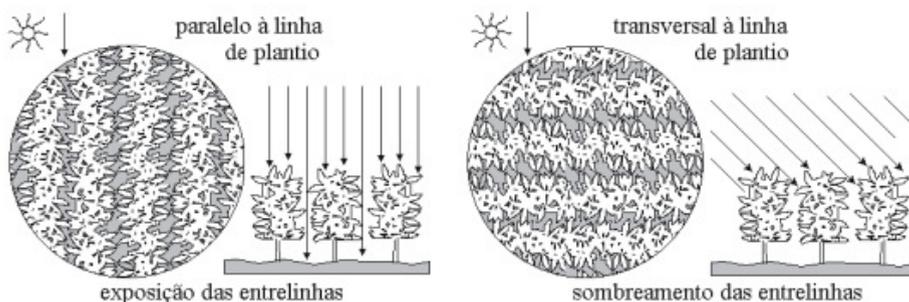


Figura 5 – Efeito da posição do Sol sobre dosséis em linhas de plantio.

Considerando um sensor orbital, tais observações (Figura 5) apontam para uma razão adicional para a integração da imagem de satélite com modelos digitais de elevação em estudos agrícolas. Além da reconhecida necessidade de controle da exposição topográfica em relação aos ângulos zenitais (solar e de visada), o conhecimento da disposição das linhas de plantio em nível permite o controle dos efeitos azimutais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento das relações entre variáveis agrônômicas e espectrais foi fundamentado em ensaios experimentais de espectrorradiometria, que permite a aquisição dos dados em condições ideais e absoluto controle da verdade terrestre. Tais relações indicam o potencial e as restrições do sensoriamento remoto de culturas agrícolas, listando-se uma série de fatores que podem ser estimados e outros que influenciam os resultados sem interessar de imediato como informação. Pouco aplicáveis a levantamentos orbitais na época de seu desenvolvimento, estes conhecimentos contam atualmente com uma série de recursos para sua viabilização: maior resolução espectral de satélites, correções atmosféricas, cálculo da reflectância aparente, disponibilização de modelos digitais de elevação e uma capacidade melhorada de análises de dados. As facilidades surgidas nas últimas décadas podem, em prazo relativamente curto, promover o desenvolvimento de análise da reflectância, em importantes alternativas à ainda profusa e quase exclusiva utilização de índices espectrais de vegetação, para variados aspectos da informação agrícola.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho advém da dissertação de mestrado do autor, desenvolvida com bolsa de estudo da CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASE, J. K.; SIDDOWAY, F. H.; MILLARD, J. P. (1984). Spring wheat-leaf phytomass and yield estimates from airborne scanner and hand-held radiometer measurements. *International Journal of Remote Sensing*, v.5, n.5, p.771-781.
- ALLEN, W. A.; RICHARDSON, A. J. (1968). Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, v.58, n.8, p.1023-1028.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J. L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, v.76, n.2, p.300-306.
- BARET, F., JAQUEMOUD, S., GUYOT, G., AND LEPRIEUR, C. (1992). Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands, *Remote Sensing of Environment* v.41, n.2/3, p.133-142.
- BARET, F.; CHAMPION, I.; GUYOT, G.; PADAIRE, A. (1987). Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, v.22, n.3, p.367-378.
- BEST, R. G.; HARLAN, J. C. (1985). Spectral estimation of green leaf area index of oats. *Remote Sensing of Environment*, v.17, n.1, p.27-36.
- CLEVERS, J. G. P. W., BÜKER, C. (1991). Feasibility of the red edge index for the detection of nitrogen deficiency. *Proceedings of the 5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, January 1991, ESA SP-319, v.1, p.165.
- DAUGHTRY, C. S. T.; BAUER, M. E.; CRECELIUS, D. W.; HIXSON, M. M. (1980). Effects of management practices on reflectance of spring wheat canopies, *Agronomy Journal* v.72, n.6, p.1055-1060.
- DEMETRIADES-SHAH, T. H.; COURT, M. N. (1987). Oblique view reflectance for assessing nitrogen status of incomplete canopies. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.7, p.1049-1050.

- DUSEK, D. A.; JACKSON, R. D.; MUSICK, J. T. (1985). Winter Wheat Vegetation Indices Calculated from Combinations of Seven Spectral Bands, *Remote Sensing of Environment*, v.18, n.3, p.255-267.
- ESAU, K. Anatomia das plantas com sementes. 10. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1974.
- FORMAGGIO, A. R. (1989). Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 180 p.
- GATES, D. M., KEEGAN, H. J., SCHLETER, J. C., AND WEIDNER, V. R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics*, v.4, n.1, p.11-20.
- GAUSMAN, H. N.; ALLEN, W. A.; WIEGAND, C. L.; ESCOBAR, D. E.; RODRIGUES, R. R.; RICHARDSON, R. R. (1973). The leaf mesophyll of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. (USDA no. 1465 Technical Bulletin). Westlaco, TX, USDA.
- GAUSMAN, H. W. (1985), Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light, Graduate Studies, Texas Tech University, no 29.
- GRANT, L.; DAUGHTRY, C. S. T., VANDERBILT, V. C. (1987). Variations in the Polarized Leaf Reflectance of Sorghum bicolor. *Remote Sensing of Environment*, v.21, n.3, p.333-339.
- HATFIELD, J. L.; KANEMASU, E. T.; ASRAR, G.; JACKSON, R. D.; PINTER JR., R. J.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. (1985). Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *International Journal of Remote Sensing*, v.6, n.1, p.167-175.
- HINZMAN, L. D.; BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T. (1986). Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, v.19, n.1, p.47-61.

- HORLER, D. N., DOCKRAY, M., AND BARBER, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance, *International Journal of Remote Sensing*, v.4, n.2, p.273-288.
- JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J. (1986). Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, v.20, n.1, p.43-56.
- KNIPLING, E. B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v.1, n.2, p.155-159.
- MADEIRA NETTO, J. S. M. (1991). Etude quantitative des relations constituants mineralogiques - réflectance diffuse des latosols brésiliens/application a l'utilisation pedologique des données satellitaires TM (region de Brasilia), Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 224 p.
- MILLERS, J. R., HARE, E. W., WU, J. (1990). Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance. I. An inverted-Gaussian model, *International Journal of Remote Sensing*, n.11, v.10, p.1755-1773.
- MOSS, R. A.; LOOMIS, W. E. (1952). Absorption spectra of leaves. I. The visible spectrum, *Plant Physiology*, v. 27, p.370-391.
- PERRY, C. R.; LAUTENSCHLAGER, L. F. (1984). Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v.14, n.1-3, p.169-182.
- PINTER JR., P. J.; JACKSON, R. D.; EZRA, C. E.; GAUSMAN, H. W. (1985). Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. *International Journal of Remote Sensing*, v.6, n.12, p.1813-1825.
- PINTER JR., P. J.; JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. (1983). Diurnal patterns of wheat spectral reflectances. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.21, n.2, p.156-163.
- RIPPLE, W. J. (1986). Relationships of spectral reflectance to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.52, n.10, p.1669-1675.

- SCHIEVING, F.; WERGER, M. J. A.; HIROSE, T. (1992). Canopy structure, nitrogen distribution and whole canopy photosynthetic carbon gain in growing and flowering stands of tall herbs. *Vegetatio*, v.102, n.2, p.173-181.
- SINCLAIR, T., R.; SCHREIBER, M., M.; HOFFER, R., M. M. (1973). Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves. *Agronomy Journal*, v.65, n.2, p.276-283.
- TUCKER, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v.8, n.2, p.127-150.
- VALERIANO, M. M. (1992) Reflectância espectral do trigo irrigado (*Triticum aestivum*, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 127p.
- VANDERBILT, V. C.; GRANT, L. (1984). Light polarization measurements: a method to determine the specular and diffuse light scattering properties of both leaves and plant canopies. *Coll. Int. Signatures Spectrales d'objects en télédétection*, 2, Bordeaux, 12-16 Sept. 1983..
- WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J. (1987). Spectral component analysis rationale, and results for three crops. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.7, p.1011-1032.