

AVALIAÇÕES DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE REFLECTÂNCIA DE DOSSÉIS VEGETAIS, NO BRASIL

ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO¹
JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO²

^{1,2}INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515
12201-970 São José dos Campos, SP, Brasil
¹forma@ltid.inpe.br
²epiphani@ltid.inpe.br

Abstract. This paper describes the efforts made towards the objective of canopy reflectance modelling in Brazil. It intends to consolidate the knowledge gathered during last four years and to indicate some future directions. There is a reflexion about the importance of modelling in remote sensing, its use and benefits. Also, there is a description of the works conducted in this field and a discussion of their results and limits. It is presented the main subjects in that field to be studied in the future.

Introdução

Nos anos mais recentes, está havendo uma consciência geral cada vez maior sobre a necessidade de medir repetitivamente os componentes e processos terrestres, e de modelar a Terra como um grande sistema global, introduzindo, então, a nova era da Ciência de Sistemas Terrestres (Deering, 1989).

Este auspicioso monitoramento global e este tipo de abordagem de estudo estão oportunamente acoplados com as perspectivas relativas aos mais avançados sistemas de múltiplos sensores do programa "Earth Observing System" (EOS) para a atual década de 1990 e a próxima, o qual incorpora instrumentos de várias nações (NASA, EOS Steering Committee, 1987). Muitos dos esforços de pesquisas envolvidos com tal programa são dirigidos à modelagem de processos terrestres. Tais modelagens envolvem várias escalas de processos, desde os menores (no nível de folhas, p.ex.), até os maiores, como os globais.

Um dos fatores primários que estabelece conexões entre tais processos e o sensoriamento remoto é a reflectância. Ou seja, a medição remota da reflectância de um objeto da superfície terrestre é a observação primária necessária para estimativas quantitativas de parâmetros biofísicos relacionados ao

objeto. Os parâmetros biofísicos de interesse podem abranger desde a determinação do que é geralmente referido como qualidade da água até as condições fenológicas de dosséis vegetais agrícolas ou a composição química de solos ou de rochas expostas.

Dada a importância do assunto "reflectância x modelagem", em 1990 foi realizado um encontro no Arizona (E.U.A.), conforme relatam Gauthier et al. (1991), sob os auspícios do Canada Centre for Remote Sensing (CCRS) e da USDA Agricultural Research Service, reunindo os maiores especialistas do momento neste tipo de modelagem. A principal motivação do encontro surgiu da constatação de que não tinha havido, até então, uma coordenação de esforços para a avaliação, a validação e a intercomparação dos vários (mais de duas dúzias) modelos de dossel vegetal/solos existentes.

No Brasil, principalmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MCT/INPE), por volta de 1989, iniciou-se uma linha de pesquisas voltada à implementação, aplicação, avaliação, desenvolvimento e validação de modelos de simulação da reflectância de dosséis vegetais de culturas agrícolas. As metas desta linha eram as de se formar uma cultura na área de modelagem, até então praticamente inexistente no instituto, visando ao uso de modelos para a obtenção

de informações para estatísticas agrícolas com dados de sensoriamento remoto.

Isto é justificado pelo fato de a produção de uma lavoura ser representada pelo produto da quantidade de área plantada pelo rendimento. Desta maneira, dispondo-se de produtos de sensoriamento remoto (os quais medem/registram basicamente a *reflectância* da superfície terrestre com repetições temporais), desenvolvem-se conhecimentos, métodos e meios para atuar nas duas frentes: a área plantada sendo obtida via algoritmos de classificação automática dos dados digitais de sensores remotos; e o rendimento das lavouras tendo informações alimentadas pelo uso dos modelos de simulação de reflectância de dosséis vegetais agrícolas.

Apesar de a linha de modelagem estar desenvolvendo-se há cerca de quatro anos, constata-se que ainda não houve uma concatenação para um balanço retrospectivo sobre os avanços conseguidos, as dificuldades comuns encontradas, as soluções potenciais e os rumos que devem ser encetados para a continuidade desta atuação.

Desta maneira, o presente trabalho objetiva fazer uma avaliação sobre os esforços realizados até o momento na área de modelagem/simulação da reflectância de dosséis vegetais, no País. Pretende também levantar aspectos de interesse no sentido do aperfeiçoamento e da continuidade desta linha de trabalhos; além de discutir sobre o papel da modelagem no Sensoriamento Remoto Agrícola.

A Modelagem como Abordagem Científica

Contextualizando melhor o assunto, é necessário enfatizar que a abordagem científica na nova era da ciência do sistema Terra deverá consistir, apropriadamente, de um ciclo de quatro grandes passos: (a) observações; (b) análise e interpretação; (c) *modelos* (i.e., teorias físicas); e, (d) verificação e predição (NASA Advisory Council, 1988).

Em nosso País, os trabalhos de pesquisa têm sido exercitados basicamente nos dois primeiros passos, ou seja, as observações e posteriores análises e interpretações. Este também tem sido um dos principais motivos para a decisão de envidar esforços na área de modelagem há cerca de quatro anos; ou seja, visando as fases (c) e (d) da nova abordagem científica da Terra, completando então o referido ciclo.

Uma das metas visadas em sensoriamento remoto é o entendimento das relações e interações

físicas entre REM (radiação eletromagnética) e materiais da superfície terrestre.

O primeiro estágio do desenvolvimento deste entendimento estaria representado pela etapa de medições de campo, em que se colhem dados biofísicos do alvo em estudo concomitantemente aos dados de sensoriamento remoto, com o objetivo de tentar estabelecer correlações estatísticas entre as medições de REM observadas e as propriedades da superfície sensoriada.

Uma vez que as relações estatísticas tenham sido estabelecidas, o próximo passo é tentar entender a física subjacente às referidas relações, tanto em função do seu interesse intrínseco como em função da necessidade de otimizar a performance do sistema para potenciais aplicações específicas (Lamont et al., 1987).

Em outras palavras, o entendimento físico está incorporado nos modelos que relacionam as variáveis superficiais à reflectância espectral.

Então, o modelo seria validado com medições espectrais para as quais as características superficiais são conhecidas; e, em última análise, o modelo é usado para determinar as características desconhecidas de uma superfície a partir das reflectâncias espectrais medidas (Deering, 1989).

Os modelos são representações numéricas dos processos e fenômenos da natureza, que permitem um entendimento físico melhor e mais integrado. Estas representações matemáticas são, então, uma ferramenta, no sentido de que as variáveis da natureza estão representadas através de sistemas. Ou seja, fornecendo os parâmetros de entrada ("inputs"), o sistema tem a capacidade de processá-los e finalmente fornecer, com coerência física (ou seja, respeitando ponderadamente as leis da natureza), os resultados (ou "outputs", ou valores de saída). Guardadas as devidas proporções, os modelos poderiam ser considerados como que "maquetes matemáticas dinâmicas" dos processos da natureza, uma vez que têm a capacidade de "imitar/simular" adequadamente o comportamento de cada variável em estudo de um maneira sistêmica e integrada. Desse modo, o geocientista poderia ser comparado a um engenheiro civil, o qual, tendo a planta e a maquete do edifício, pode entendê-lo melhor e, assim, com maior segurança, pode calcular suas estruturas, seu volume, seu peso, as instalações elétricas e hidráulicas, a circulação geral, etc.

Para os modelos da natureza vislumbram-se inúmeras aplicações. Estando implementados em sistemas computacionais, permitiriam, por exemplo, que se fizessem os mais diversos tipos de simulações e

análises, de modo que o domínio dos conhecimentos sobre os processos/fenômenos naturais tornar-se-ia mais tangível e mais facilitado. Então, com os modelos, diminuiria a necessidade de deslocar pesquisadores, equipamentos, recursos, etc. para estudar determinados aspectos - bastaria fornecer os "inputs" e analisar as saídas.

Sem dúvida, os modelos existentes carecem de lapidações a fim de que possam simular o mais perfeitamente possível a natureza.

As Pesquisas em Modelagem de Reflectância de Dosséis, no Brasil

Os esforços nesta linha de pesquisa, em nosso País, são bastante recentes e foram encetados visando a criação de uma cultura sobre modelagem, de modo a propiciar que contribuições reais venham a ser oferecidas com o desenvolvimento dos trabalhos sobre o assunto.

Entre os modelos mais conhecidos, encontram-se os de SUITS (1972), o SAIL (Verhoef e Bunnik, 1981) e o SRVC (Smith e Oliver, 1972), sobre os quais foram concentradas as quatro primeiras pesquisas realizadas aqui.

Os trabalhos de Goel (1988), Valeriano (1992), Antunes (1992), Gonçalves (1993) e Ponzoni (1993) trazem excelentes revisões sobre as definições, as classificações, o comportamento espectral da vegetação, e outros tópicos relacionados com os modelos de reflectância de dosséis agrícolas.

A fim de permitir o prosseguimento das discussões objeto do presente trabalho, serão expostas a seguir, de modo resumido, as características principais das quatro pesquisas feitas no País.

Valeriano (1992) trabalhou com a cultura do trigo e usou o modelo SAIL. O experimento constou de sete variedades e catorze parcelas (100 m² cada parcela). O solo foi o Latossolo Vermelho Escuro e o tempo para um ciclo de leituras espectroradiométricas (desde a primeira até a décima quarta parcela) foi, em média, de 40 minutos e o horário das medições, entre as 9:00 e as 11:00 horas. Os dados das variáveis agrônomicas eram coletados praticamente ao mesmo tempo das variáveis espectrais e foram os seguintes: matéria fresca total; matéria seca de cada componente do dossel (folhas, palhas, colmos e espigas); IAF verde; índice de área de colmos; estágio fenológico; fotografias verticais; fotografias horizontais; altura de planta e altura de estratos homogêneos; número de colmos e de espigas. Os parâmetros espectrais medidos foram: porcentagem de iluminação difusa espectral da

cena; reflectância espectral do dossel; reflectância espectral do solo (apenas no ângulo de visada a nadir). A amostragem das medidas espectrais era de quatro leituras por parcela, tendo-se usado o método de obtenção da reflectância proposto por Duggin (1980), porém com leituras da irradiância solar feitas no decorrer de apenas um dia de céu aberto (de 9:00 até 15:00 horas). O espectrorradiômetro usado foi o Spectron SE-590. Os parâmetros não medidos: DAF (distribuição angular de folhas); Rh (reflectância hemisférica dos componentes); Th (transmitância hemisférica dos componentes).

Desconsiderando os pontos referentes a parcelas com espigas, Valeriano (1992) obteve um coeficiente de determinação (r^2) de 0,84 para o visível (650 nm) e de 0,71 para o infravermelho próximo (800 nm), quando foram confrontados valores medidos versus valores calculados pelo modelo SAIL.

O autor chama a atenção para o fato de a inclusão da terceira camada (espigas) ter prejudicado o desempenho do modelo. Considera que a determinação da DAF para o modelo e a estimativa de área das espigas, para o trigo, são muito difíceis devido à complexidade da forma das folhas e das espigas. Contudo, o autor não quis concluir algo sobre o desempenho do modelo, em função das aproximações que, circunstancialmente, foi obrigado a fazer.

Suplementarmente às suas análises, procedeu a algumas análises de sensibilidade do modelo SAIL e verificou que as variações dos parâmetros de iluminação (radiação difusa e ângulo solar) praticamente não causaram diferenças de resultados. Mesmo variando a porcentagem de luz difusa entre 5 e 84%, os valores de reflectância (tanto no visível como no IVP) sofreram mudanças menores que 1%. Para a variação de 38 graus para 56 graus do ângulo zenital solar o modelo também não apresentou resposta. Como estas simulações foram feitas para o trigo com cerca de 60 dias de idade (portanto, com altos valores de IAF), o autor ressaltou que esta ausência de resposta pelo modelo não deve ser estendida para dosséis de trigo com baixos valores de IAF (quando deverá haver os efeitos de fileiras).

As variações da reflectância do solo também provocam, de acordo com o SAIL, muito pouca mudança. Porém, no que se refere à arquitetura foliar, houve um efeito bastante significativo, principalmente quando se considerou o dossel do trigo como erectófilo. Neste caso, houve uma inversão, ou seja, aumentando-se o IAF, ocorre uma diminuição da resposta no IVP, descartando-se a possibilidade de caracterizar a DAF do trigo como erectófila.

Quanto à reflectância hemisférica dos componentes, principalmente a das folhas, o autor verificou que se trata de um parâmetro crucial para o desempenho do modelo.

Numa segunda pesquisa, Antunes (1992) realizou experimento para avaliar os modelos SUITS e SAIL, em Latossolo Vermelho Escuro de textura argilosa, contando com 30 parcelas (5m X 8m), fileiras orientadas a 60 graus NO, espaçamento entre fileiras de 0,5 m, com 20 sementes por metro linear, três níveis de adubação, cinco variedades de soja. Os parâmetros agrônômicos foram: IAF, DAF, fitomassa fresca total, fitomassa fresca de folhas, fitomassa seca total, fitomassa fresca de folhas e produtividade de grãos. Embora ocorra o fenômeno do heliotropismo (variação da inclinação e azimute) para a soja o autor assumiu distribuição azimutal isotrópica, uma vez que os modelos não estão adaptados para distribuição azimutal não isotrópica. Os parâmetros espectrais reflectância e transmitância hemisféricas usados foram obtidos de medições feitas por Rudorff e Batista (1990) sobre a variedade Clark em quatro datas (desde o início da fase reprodutiva até a fase de floração plena). Para estas medições foi usada uma esfera integradora Li-Cor acoplada com um espectrorradiômetro Spectron SE-590. O autor também mediu o fator de reflectância bidirecional (FRB) do solo exposto. A porcentagem de fluxo difuso foi medida através do sombreamento da placa BaSO₄ ou do coletor cosseno e o ângulo zenital de visada foi sempre a nadir. Trabalhou-se com 46 bandas espectrais, entre 514,0 nm e 918,6 nm e com 4 pares de medidas coletor cosseno/alvo (2 pares com o centro do FOV sobre a fileira e 2 pares na entrelinha), tendo-se medido a partir das 9:00 hs, segundo o método de Duggin (1980).

As principais conclusões foram que os modelos SUITS e SAIL tiveram um desempenho satisfatório para a simulação do FRB da soja, tendo sido o SAIL superior ao SUITS. Obtiveram-se valores de $r^2 = 0,77$ no vermelho e de $r^2 = 0,74$ no IVP, para o modelo SAIL. Houve subestimação no vermelho, quando a porcentagem de cobertura vegetal sobre o solo estava em torno de 50% a 60%; com o aumento da porcentagem de cobertura esta tendência desapareceu. Uma análise de sensibilidade do modelo SAIL mostrou que variações na porcentagem de fluxo difuso e no ângulo solar praticamente não afetam as simulações do FRB. A partir da experiência adquirida o autor mostra algumas dificuldades/recomendações: a reflectância e a transmitância hemisféricas de folhas devem ser das mesmas plantas em que se mediram os FRB no experimento; desenvolver melhor as técnicas de

medição da DAF; montagem de um banco de dados com parâmetros de entrada de um grande número de modelos (isto permitirá estudos de validação e comparação entre os diversos tipos de modelos); maiores iterações dos fluxos dentro do dossel; inclusão do efeito da reflexão especular; inclusão das diferenças de propriedades ópticas entre as duas faces das folhas; adaptar os modelos para distribuição azimutal de folhas não isotrópica, de preferência distribuição tridimensional.

Na terceira pesquisa, Ponzoni (1993) usou mudas de essências florestais (eucalipto e peroba). Em seu experimento obteve medidas dos parâmetros: IAF, DAF, reflectância e transmitância hemisférica dos componentes do dossel, reflectância hemisférica do solo, composição dos fluxos de radiação direto e difuso, ângulos do Sol e de visada. O experimento constou de três canteiros: Eucalipto (altura média de 40 cm) com espaçamento de 5 cm entre plantas (canteiro de 25 m por 1,20 m), orientado na direção leste-oeste (azimute=335 graus); Peroba: mudas com 15 a 30 cm de altura, espaçamento de 12,5 cm entre mudas; dimensões de 10m por 1,20m e mesma orientação do canteiro anterior; e um canteiro de Eucalipto + Peroba (em proporções iguais). O autor usou o modelo SAIL (uma camada) e o CANOPY variação do SAIL) (duas camadas: uma composta pelas mudas de Eucalipto (cerca de 10 cm mais baixa), e outra pelas mudas de Peroba). Os ângulos zenitais de visada foram: 0, 15 e 30 graus. Usou um clinômetro de bolso para as medições da DAF. O solo foi o Latossolo Vermelho Escuro e o espectrorradiômetro foi o Spectron-SE 590. A altura entre o topo do dossel e o sensor era de aproximadamente 1,50 m (Eucalipto) e 1,75m (Peroba); os horários de medições estavam entre 8:00 e 15:30 horas, com predominância pela manhã. Usou uma esfera integradora Li-Cor, para uma folha de cada muda, "in vivo", num total de quatro mudas. Realizou uma análise de sensibilidade e verificou que o SAIL apresenta pouca sensibilidade para DAF, porém foi usado um IAF de 15; os parâmetros reflectância e transmitância hemisféricas foram os mais fortes na sensibilidade do modelo. Para a reflectância do solo e também para a radiação difusa houve pouca sensibilidade. O autor concluiu que o modelo SAIL teve um desempenho não-satisfatório com diferenças de ajustes (valores medidos versus valores calculados pelo modelo) superiores a 100%. O modelo CANOPY com duas camadas apresentou um desempenho ligeiramente superior. O autor constatou a influência do orvalho e dos ventos sobre os valores medidos de reflectância.

Na quarta e última pesquisa sobre modelagem, Gonçalves (1993) testou os modelos: SUITS, SAIL e

SRVC, com a cultura da soja, variedade IAC-15. As fileiras do experimento estavam orientadas na direção SO-NE e o espaçamento era de 0,50 m entre fileiras com 20 plantas/m linear, em média. Foram realizadas quatro campanhas radiométricas com o sensor a 2 m de altura acima da cultura e um campo de visada (IFOV) de 15 graus. Os ângulos zenitais de visada foram de 0 e 30 graus e ângulo azimutal foi de 45 graus. Foram considerados 20 pontos de coleta para cada campanha com três medições por ponto radiométrico. Os parâmetros coletados foram: altura; número de plantas por IFOV; área de folhas verdes; horário da radiometria; reflectância do solo subjacente; radiação difusa incidente; número de camadas; número total de classes constituintes. Para as medições da reflectância e transmitância hemisféricas, os elementos do dossel foram transportados de Campinas (onde foi montado o experimento) até São José dos Campos-SP, onde foi montado um conjunto composto por esfera integradora + espectrorradiômetro Optronics). Através da observação visual da proporção de folhas em diferentes intervalos de inclinação, determinou-se o tipo de distribuição angular e o uso das funções de densidade de inclinação foliar. Foram determinados também os parâmetros IAF; área foliar por plano de projeção; coeficiente de extinção por plano de projeção; declinação solar; ângulos zenital e azimutal de iluminação. As principais conclusões foram que, em geral, o modelo SUITS, para visadas a nadir, apresenta ajuste melhor; para visada de 30 graus, o SUITS apresentou desempenho melhor que o SAIL, para as bandas do visível; a resposta espectral de folhas é parâmetro fundamental na qualidade dos ajustes (necessário grande rigor em sua obtenção); uma vez que as folhas refletem de forma diferenciada a radiação incidente, em função do ângulo de incidência, acredita-se que, para os modelos que levem em conta a distribuição angular de folhas (ex.: SAIL e SRVC), faz-se necessário que a resposta espectral das folhas seja medida em diversos ângulos de incidência, de forma que se possa utilizar, plenamente este avanço dos modelos.

Discussões

Pelo que foi exposto até aqui, pode-se verificar que houve uma certa quantidade de dificuldades e de aproximações em cada uma das pesquisas acima relacionadas, ora por falta de equipamento apropriado, ora por limitação de funcionamento, ora por dificuldade de coleta de determinado parâmetro (p.ex., a DAF, a reflectância/transmitância hemisféricas), etc.

Há que se reconhecer a importância inequívoca das pesquisas feitas até agora na área de modelagem da reflectância de dosséis vegetais, no País. Contudo, é forçoso indicar que a validação de modelos não poderá ser considerada perfeita se alguma entre as condições exigidas pelo modelo em estudo não for devidamente satisfeita.

Dois parâmetros de maior impacto na performance dos modelos SUITS e SAIL são a *reflectância* e a *transmitância hemisféricas* dos componentes do dossel vegetal em estudo.

Antunes (1992) faz uma excelente exposição sobre esta questão. Ambos os citados modelos assumem que as folhas são Lambertianas e que possuem propriedades ópticas semelhantes nas duas faces, sendo então parâmetros de entrada para o modelo a reflectância e a transmitância direcionais hemisféricas.

Porém, esta suposição pode levar a tendências nas saídas calculadas pelos métodos. Alguns autores (Breece e Holmes, 1971; Norman et al., 1985; Walter-Shea et al., 1989) têm observado que a reflectância bidirecional das folhas é dependente do ângulo de incidência da radiação e do ângulo de visada do sensor. É necessário lembrar aqui que, normalmente, as medidas de ambos os parâmetros hemisféricos (usando-se esfera integradora) são tomadas considerando um fluxo irradiante próximo à normal da folha.

Neste sentido, Reyna e Badhwar (1985) incluíram a questão do efeito especular, para o modelo SAIL, e conseguiram boa melhoria dos ajustes do referido modelo.

É necessário considerar, também, a importante questão da *amostragem*. Num primeiro aspecto, a amostragem em termos de número de folhas das quais se obtêm os espectros de reflectância e transmitância hemisféricas. O conjunto de folhas jovens, maduras e senescentes será o responsável, no sentido amplo, pela resposta espectral do dossel. Conseqüentemente, é necessário que se colete um número significativo de folhas, que represente o estado da planta.

Num segundo aspecto, é importante que se façam essas medições dos parâmetros espectrais durante o decorrer do ciclo, uma vez que a vegetação (culturas agrícolas de ciclo rápido principalmente) apresenta uma dinâmica fenológica e conseqüentemente proporcional dinâmica de variações espectrais.

A *distribuição angular de folhas* (DAF) exerce grande influência no desempenho dos modelos e, ao mesmo tempo, é um parâmetro que tem sido

considerado como de elevado grau de complexidade para ser obtido. Bunnik (1978) propõe seis funções empíricas com o objetivo de descrever a DAF (planófilas, erectófilas, plagiófilas, extremófilas, esféricas e uniformes). Goel e Strebel (1984) preferem descrever a DAF através de uma função Beta com dois parâmetros, os quais dependem da média e da variação dos ângulos de inclinação foliar; ângulos estes que podem ser determinados a partir de amostras obtidas na área de estudo.

Dependendo da cultura, há uma grande dificuldade de se determinar qual é a melhor distribuição que descreve a arquitetura das folhas. No caso da soja, por exemplo, há a questão do heliotropismo - os modelos consideram que ocorre uma isotropia azimutal das folhas. No caso da cultura do trigo, cada folha descreve, em certo estágio do ciclo, aproximadamente uma parábola e, neste espaço de tempo, não se pode afirmar que a arquitetura seja planófila ou erectófila.

As folhas são consideradas os elementos dominantes das plantas quanto às influências sobre as propriedades espectrais dos dosséis vegetais.

A configuração destes elementos refletoras em cada planta e, de forma ampla, no dossel, desempenhará papel de crucial importância na interação com a radiação incidente. Assim, tendo em vista a experiência das pesquisas realizadas até o momento, indica-se que um dos grandes pontos a se desenvolver para o aperfeiçoamento dos dois citados modelos (SUITS e SAIL) é, sem dúvida, o desenvolvimento de uma melhor maneira de considerar de forma adequada a arquitetura foliar dos dosséis. Isto, tanto em termos de descrição desta arquitetura dentro dos modelos, quanto no que se refere às facilidades de medição deste parâmetro.

Os quatro autores falam da pouca sensibilidade dos modelos à *radiação difusa* ("Skyl"). Conforme Deering (1989) e Silva Filho e Epiphanyo (1993), a aquisição de medições radiométricas sob condições outras que não as de céu claro podem causar grandes problemas nos fatores de reflectância bidirecional. Ou seja, embora a Skyl influencie pouco no modelo, ela pode fazer variar significativamente as curvas espectrais reais, com as quais se está confrontando os valores calculados via modelo.

Por outro lado, é necessário avaliar até que ponto o método de sombrear a placa ou o coletor cosseno estima bem a radiação difusa que realmente atinge a placa ou o coletor. Da mesma forma é preciso determinar quanto deste campo de radiação, o qual

incide sobre estes elementos (placa ou coletor), está sendo barrado (pelo anteparo sombreador ou pelo próprio indivíduo que sombreia).

Nos trabalhos com modelos realizados no País, pode-se verificar que houve vários tipos de aproximações: faz-se mister avaliar objetivamente quanto da "não-performance" pode ser explicado pelas imprecisões dos modelos; quanto pelas imprecisões de medição (dos parâmetros biofísicos e/ou dos parâmetros espectrais). Imprecisões, por exemplo, quanto ao tempo de um ciclo de medição radiométrica versus variações dos ângulos solares; quanto ao número reduzido de amostras para as medições de reflectância e transmitância hemisféricas (tanto em quantidade de folhas, como em termos de diferentes estágios do ciclo cultural); quanto ao número de camadas consideradas; quanto ao número de componentes do dossel; etc..

Nas medições radiométricas, quando há entrelinhas, a altura da cabeça sensora exerce papel preponderante na resposta registrada. Quanto mais baixo o sensor, maior possibilidade de um IFOV menos representativo. Então, em relação a este aspecto, é preciso avaliar quantas amostras seriam necessárias para uma certeza mínima de representatividade. Neste sentido, Daughtry et al. (1982) conduziram um experimento para determinar como a reflectância de dossel varia em função da altitude do sensor sobre a cultura e, também, qual deveria ser a altitude mínima (distância entre o sensor e o topo do dossel ou a superfície do solo) para se adquirir medições repetíveis com uma desejada precisão. Para dosséis de milho e de soja que ainda apresentavam estrutura de fileiras, o número de medições necessário para um dado nível de precisão decresceu com o aumento da altitude do sensor e quando o FOV do sensor continha uma amostra mais representativa do dossel. Os coeficientes de variação da reflectância decresceram exponencialmente quando a altitude do sensor aumentou. Nas menores altitudes (< 3m), mais medições eram necessárias devido a que as medições tendiam a ser erráticas (o sensor era movido cruzando-se as fileiras). Por exemplo, para detectar 20% de diferenças na banda vermelha em dois dosséis de soja com 70% de cobertura usando um esquema de amostragem aleatória simples, pelo menos 39 medições eram requeridas quando o sensor estava a 2,0 m acima do solo. Cerca de 19 medições eram necessárias quando a altura era de 3,0 m; e somente 5 eram necessárias quando a altura era de 7,0 m acima do solo. Esquemas de amostragem que empregavam um conhecimento *a priori* do espaçamento entre fileiras foram mais eficientes (requeriam menor número de

medições para um dado nível de precisão) do que esquemas de amostragem aleatória.

Considerações Finais

Os modelos atualmente existentes, sem dúvida ainda não têm a "capacidade" de levar em conta todos os fatores que influenciam na reflectância dos dosséis vegetais. Mesmos os fatores já considerados devem ainda passar por adaptações, dentro dos modelos, a fim de descreverem mais ponderada e adequadamente sua influência interativa.

Alguns dos parâmetros físicos que os modeladores julgam melhor deixar fora dos modelos, na atual fase de conhecimentos, em função da complexidade envolvida na sua definição e inclusão, (parâmetros estes denominados de "red door" por Gauthier et al., 1991), são os seguintes: fluorescência, polarização, heliotropismo, topografia, estresses de vários tipos, orvalho, vento e, por último, quaisquer outras influências externas sobre a vitalidade de crescimento das plantas.

Há ainda, para os pesquisadores interessados na modelagem das interações superfícies vegetais x irradiância, várias questões a serem estudadas, tais como: a inversão de modelos versus o problema direto (nenhuma inversão permitirá a obtenção de estimativas precisas das variáveis de dossel, se o modelo não for um excelente descritor do fenômeno estudado); a questão dos dosséis esparsos versus dosséis densos e os modelos de solos; a captura de parâmetros ainda não considerados, porém que exercem influência nas interações energia x dosséis; as dificuldades e imprecisões de métodos e critérios de coletas dos parâmetros alimentadores dos modelos; as validações dos modelos; o estabelecimento das limitações dos modelos; a formulação de novas iniciativas para o desenvolvimento dos modelos de reflectância de dosséis; a necessidade de bancos de dados-padrão aptos para os testes, as avaliações e as intercomparações de modelos; entre outros pontos

Tais motivos apontam na direção da continuidade desta linha de pesquisa, que deve ser exercitada com intensidade.

Por outro lado, parece claro que o entendimento geral da interação da irradiância global incidente com as superfícies em geral, como é expressa em dados de sensoriamento remoto, dependerá do conhecimento da reflectância de tais superfícies. Além disso, este conhecimento só será concretizado (e otimizado na forma de aplicações) a partir do ponto em que os

modelos descrevam com a máxima proximidade possível a realidade fenomenológica natural das interações.

Referências

- M.A.H. Antunes, *Aplicação dos modelos de reflectância SUITS e SAIL, no estudo do comportamento espectral de soja (Glycine max (L.) MERRIL)*. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCT), São José dos Campos, 1992. 148 p.
- H.T. Breece III, R.A. Holmes, Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn "in vivo", *Applied Optics* 10 (1) 119-127, jan. 1971.
- N.J.J. Bunnik, *The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties*, (Doctoral Thesis), Univ. of Wageningen, Wageningen, 1978. 175 p.
- C.S.T. Daughtry, V.C. Vanderbilt, V.J. Pollara, Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. *Agronomy Journal* 74(4) 744-751, July/Aug. 1982.
- D.W. Deering, Field measurements of Bidirectional Reflectance. In: G. Asrar (Ed.), *Theory and applications of optical Remote Sensing*, John Wiley, New York, 1989. Cap. 2, pp.14-65.
- M.J. Duggin, The measurement of reflectance factors, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46 (5) 643-647, May 1980.
- R.P. Gauthier, F.J. Ahern, P.M. Teillet, G. Fedosejevs, *Report on the specialist meeting on the derivation of Bidirectional Reflectance Distribution Functions for various ground cover types*, Workshop held on 27-29 november, 1990; Tempe, Arizona. Canada Centre for Remote Sensing and USDA Agricultural Research Service, June 1991. 30 p.
- N.S. Goel, Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data, *Remote Sensing Reviews* 4(1) 1-212., 1988.
- N.S. Goel, D.E. Strebel, Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies, *Agronomy Journal* 76 (5) 800-802, Sept./Oct. 1984.

- S.M.S. Gonçalves, *Modelos de simulação de reflectância de dosséis agrícolas para a cultura da soja (Glycine max (L.) MERRIL)*, (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCT), São José dos Campos, 1993. 127 p.
- J. Lamont, S. Quegan, I.A. Ward, Ground truth requirements for radar observations over land and sea, *International Journal of Remote Sensing*, 7(7):1057-1067, 1987.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration, Advisory Council, Earth System Sciences Committee, *Earth System Science. A Closer View*, Office of Interdisciplinary Earth Studies. University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1988.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration, EOS Steering Committee. *From Pattern to Process: The Strategy of the Earth Observing System*, NASA EOS Steering Comm. Rep., Vol. II. NASA. Washington, D.C., (1987).
- J.M. Norman, J.M. Welles, E.A. Walter, Contrasts among bidirectional reflectance of leaves, canopies and soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23 (5) 659-667, Sept. 1985.
- F.J. Ponzoni, *Um estudo sobre a reflectância espectral de dosséis constituídos por mudas de essências florestais, mediante a utilização de um modelo de reflectância da vegetação*, (Tese de Doutorado), Univers. Federal do Paraná, Curitiba, 1993, 167 p.
- E. Reyna, G.D. Badhwar, Inclusion of specular reflectance in vegetative canopy models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23 (5) 731-736, Sep. 1985.
- B.F.T. Rudorff, G.T. Batista, Spectral response of the wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. *Remote Sensing of Environment*, 31 (1) 53-63, Jan. 1990.
- P.N.S. Silva Filho, J.C.N. Epiphanyo, *Influence of irradiance on bidirectional reflectance factor measurements*, In: SPIE Conference, Orlando, 1993, 8p.
- J.A. Smith, R.E. Oliver, *Plant canopy models for simulating composite scene spectroradiance in the 0.4 to 1.05 micrometer region*, In: Proceedings of the Eight International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 2-6 Oct. 1972. Vol. 2, p.1333-1348.
- G.W. Suits, The calculation of the directional reflectance of vegetative canopy, *Remote Sensing of Environment* 2 (2) 117-125, Feb. 1972.
- M.M. Valeriano, *Reflectância espectral do trigo irrigado (Triticum aestivum, L.) por espectroradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL*, (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCT), 1992, 127 p. (INPE-5426-TDI/483).
- W. Verhoef, N.N.J. Bunnik, *Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by use of canopy reflectance models*, In: Proceedings of the Signatures Spectrales d'Objects en Teledetection. Avignon, 8-11 Sept. 1981, p. 273-290.
- E.A. Walter-Shea, J.M. Norman, B.L. Blad, Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean, *Remote Sensing of Environment*, 29 (2) 161-174, Aug. 1989.