

# Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de *Eucalyptus* sp. e de *Aspidosperma* sp.

FLÁVIO JORGE PONZONI\*  
ATTILIO ANTONIO DISPERATI\*\*

## RESUMO

O modelo SAIL foi aplicado ao estudo da reflectância espectral de dosséis constituídos por mudas de *Eucalyptus* sp. (eucalipto) e de *Aspidosperma* sp. (peroba). Foram elaborados dois diferentes dosséis, sendo um constituído por mudas de eucalipto e o outro por mudas de peroba. Medições radiométricas (de 0,4 a 0,9 m) foram realizadas em cada um destes dosséis em diferentes horários do dia. Nestas medições foram ainda considerados os ângulos zenitais de visada de 0, 15 e 30°. Através destas medições radiométricas foram determinados os valores medidos de reflectância (VMRs). Foram determinados os parâmetros biofísicos destes dosséis, os parâmetros espectrais das folhas de ambas as espécies e do solo e ainda os parâmetros geométricos de iluminação. Estes parâmetros foram submetidos ao processamento do modelo SAIL para a determinação dos valores calculados de reflectância (VCRs). Estes VCRs foram então comparados com seus respectivos VMRs para a avaliação da dinâmica dos VMRs, em relação às condições de iluminação e de visada consideradas, e do desempenho do modelo. Verificou-se que com o aumento do IAF, houve uma diminuição dos VCRs na região do visível e seu aumento na região do infravermelho. Esta dinâmica não foi evidente nos VMRs devido à influência de fatores como sombras e orvalho. A ação da DAF sobre os VMRs deve ser analisada conjuntamente com a densidade do dossel e com as geometrias de iluminação e de visada. Os parâmetros espectrais das folhas exerceram influência sobre os VCRs. A análise da influência dos parâmetros geométricos da fonte e do sensor sobre os VMRs deve levar em consideração a densidade do dossel, a disposição ou não das plantas em fileiras, bem como a orientação espacial destas fileiras. Para dosséis densos e visada vertical, a diminuição do valor do ângulo zenital solar acarretou o aumento dos VMRs, principalmente na região do visível. Na região do infravermelho a comprovação deste efeito foi prejudicada pela presença do orvalho e de sua evaporação coincidente com a diminuição do ângulo zenital solar. Para dosséis menos densos e plantas dispostas em fileiras, o aumento dos VMRs na região do visível com a diminuição do ângulo zenital solar foi atribuído à diminuição do sombreamento mútuo das plantas e do solo. Na região do infravermelho, houve também o aumento dos VMRs com a diminuição do ângulo zenital solar. O efeito do ângulo zenital de visada sobre os VMRs deve ser analisado conjuntamente com o valor do azimute relativo ( $\psi$ ). As diferenças entre os VMRs e seus respectivos VCRs foram freqüentemente superiores à 10%.

**Palavras-chave:** medidas de reflectância; modelos de reflectância da vegetação; sensoriamento remoto da vegetação.

## ABSTRACT

The SAIL model applied to a spectral reflectance study of *Eucalyptus* sp. and *Aspidosperma* sp. seedling canopies. A canopy reflectance model (SAIL) was applied to

\*Eng. Florestal, M. Sc., Dr., Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

\*\*Eng. Florestal, M. Sc., Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Silvicultura e Manejo, UFPR - Bolsista do CNPq

a spectral reflectance study of *Eucalyptus* sp. (eucalipto) and *Aspidosperma* sp. (peroba) seedling canopies. Two different canopies were studied. The first one was composed by eucalipto seedlings and the second one by peroba seedlings. Radiometric measurements (considering the 0.4 to 0.9  $\mu$ m spectral range) were carried out considering different times of day, exploring several illumination conditions. The view zenith angle was also changed during these measurements. Through these radiometric data the observed reflectance value (VMRs) were determined. The biophysical parameters, the leaves and soil spectral properties and the illumination/view geometry were used in the model processing in order to determine the calculated reflectance values (VCRs). These VCRs were compared with the VMRs to evaluate the canopy reflectance dynamic and the model performances. The increase in IAF caused a decrease in the VCRs in visible region and a VCRs increase in infrared region. That dynamic was not so easily observed in the VMRs due shadow and dew influence. The DAF influence has to be analysed considering both, canopy density and illumination/view geometry. The leaves spectral parameters ( $\rho$  and  $\tau$ ) were the most VCRs influential. The analysis of the influence of source and sensor geometric parameters in the VMRs has to consider the canopy density and the row orientation. Considering compact canopies and vertical view, as sun zenith angle decreased, the VMRs increased, mainly in the visible region. In infrared region this dynamic was not confirmed due dew and its evaporation during the day. For sparse canopies and plants oriented by rows, the increase of VMRs, in the visible region, with the decrease of zenith solar angle was attributed to plants and soil shadowing decrease. In infrared region, the VMRs increased as the sun zenith angle decreased. The view zenith angle effect must be analysed according the related azimuth angle ( $\varphi$ ) values. Differences between VMRs and VCRs were often greater than 10%.

**Key words:** reflectance measurements; canopy reflectance models; remote sensing of vegetation.

## INTRODUÇÃO

As técnicas de sensoriamento remoto são viabilizadas através de três componentes fundamentais: a fonte de radiação eletromagnética (REM), o objeto de estudo e o sensor. A própria REM constitui um elemento de ligação entre estes componentes através de um processo de interação bastante complexo.

A utilização destas técnicas para o estudo dos recursos naturais, vale-se de três diferentes domínios: o domínio espacial, o domínio temporal e o domínio espectral. No domínio espacial são exploradas as características dimensionais e de forma dos recursos naturais, bem como as potencialidades intrínsecas dos sensores no registro destas características. No domínio temporal é explorada a ação de períodos de tempo sobre estes recursos, quer seja devido a alterações sazonais, ou devido à ação antrópica. Finalmente, no domínio espectral são exploradas as propriedades dos recursos naturais quanto aos fenômenos de reflexão, transmissão e absorção da REM, considerando diversas regiões do espectro eletromagnético.

No que se refere à este último domínio, existe uma perspectiva concreta, para os próximos anos, de disponibilidade de dados coletados a partir de sensores dotados de resoluções espectrais e radiométricas finas. Este fato tem estimulado pesquisadores em todo o mundo à adquirir um conhecimento mais aprofundado sobre o processo de interação mencionado.

O processo de interação entre os recursos naturais e a REM têm sido estudado através da dinâmica da reflectância espectral, sob a ação de fatores endógenos e exógenos a estes recursos.

Para o caso da vegetação, os resultados destes estudos têm sido materi-

alizados sob a forma dos chamados modelos de reflectância da vegetação, que promovem uma conexão lógica entre os parâmetros relativos à própria vegetação, às geometrias de iluminação e de visada, e às alterações sofridas pela REM refletida por dosséis vegetais.

Os desempenhos destes modelos têm sido avaliados quanto às estimativas da reflectância espectral de dosséis de culturas agrícolas, incluindo algumas proposições de inversão destes modelos visando a estimativa de parâmetros biofísicos, sabidamente relacionados à produtividade destas culturas. Não foram ainda identificadas na literatura aplicações destes modelos para dosséis de porte florestal, a não ser algumas adaptações implementadas em alguns modelos visando tal aplicação, sem contudo terem sido apresentados resultados experimentais destas adaptações.

No Brasil, estes modelos começaram a se tornar disponíveis no início dos anos 90, restando ainda muitas incertezas quanto às suas potencialidades e limitações de uso para as condições tropicais. Ainda, não se dispõe de conhecimento devidamente sedimentado sobre os parâmetros influentes sobre a reflectância espectral de dosséis, nem tampouco da forma e magnitude desta influência.

Estes parâmetros são comumente classificados como: biofísicos, espectrais e geométricos. Os parâmetros biofísicos referem-se ao índice de área foliar (IAF) e à distribuição angular de folhas (DAF), os quais caracterizam a arquitetura do dossel. Os parâmetros espectrais referem-se àqueles que caracterizam as propriedades de reflexão e transmissão da REM por parte dos elementos constituintes de um dossel (folhas, flores, frutos, galhos, etc), incluindo a fração de irradiância difusa (SKYL). E finalmente os parâmetros geométricos caracterizam a localização espacial da fonte de REM e do sensor, através de medidas angulares.

A seguir são apresentadas as hipóteses que motivaram a realização deste trabalho.

## HIPÓTESES

### Parâmetros Influentes na Reflectância Espectral de Dosséis

- a) índice de área foliar (IAF): o aumento do IAF acarreta a diminuição da reflectância espectral de um dossel, referente à região do visível e seu aumento na região do infravermelho;
- b) distribuição angular de folhas (DAF): o efeito do ângulo de inclinação das folhas sobre a reflectância de um dossel deve ser analisado conjuntamente com as geometrias de iluminação e de visada;
- c) a reflectância espectral hemisférica das folhas constituintes de um dossel não pode ser considerada como a reflectância espectral deste dossel;
- d) para o caso de dosséis planófilos e com valores elevados de IAF, a geometria de iluminação exerce pouca influência em suas reflectâncias;
- e) para o caso de dosséis planófilos e com valores baixos de IAF, a geometria de iluminação exerce influência em suas reflectâncias

espectrais;

- f) para uma mesma situação geométrica de iluminação, a alteração do ângulo zenital de visada acarreta alterações na reflectância espectral de um dossel.

#### Modelo de Reflectância da Vegetação

- a) o modelo deve atingir diferentes desempenhos em função dos parâmetros biofísicos dos dosséis e das condições geométricas de iluminação e de visada;
- b) os valores de reflectância espectral calculados pelo modelo em diferentes situações de iluminação e de visada devem apresentar as mesmas tendências e amplitudes daquelas apresentadas pelos valores de reflectância espectral medidos em campo.

#### OBJETIVOS

##### Objetivo Geral

Aplicar o modelo SAIL de reflectância da vegetação no estudo da reflectância espectral de dosséis constituídos por mudas de *Eucalyptus* sp. e de *Aspidosperma* sp.

##### Objetivos Específicos

- a) coletar dados radiométricos de dois diferentes tipos de dosséis constituídos por mudas destas duas espécies, sob diferentes condições geométricas de iluminação e de visada;
- b) determinar os valores dos parâmetros influentes na reflectância espectral destes dosséis, para as condições de realização das coletas de dados radiométricos;
- c) submeter os valores determinados no item anterior ao processamento do modelo SAIL e avaliar o seu desempenho, comparando os valores de reflectância determinados em campo com aqueles determinados através do processamento do modelo.

#### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os estudos envolvendo a reflectância espectral de dosséis foram motivados principalmente pela necessidade de se correlacionar o tom e/ou padrão apresentado por estes em fotografias aéreas e/ou em imagens orbitais de uma ou mais faixas espectrais. COLWELL(1974) considera que muitos resultados alcançados na tentativa de determinar o significado deste tom e/ou padrão mostraram-se anômalos ou no mínimo contraditórios. O autor atribui a isto o fato de que muitos pesquisadores não têm levado em consideração as verdadeiras relações de causa e efeito envolvidas no processo de obtenção destes tom e/ou padrão; e ainda porque outros pesquisadores têm se valido somente da reflectância hemisférica das folhas como parâmetro para a predição e compreensão da aparência assumida por um dossel, principalmente em ima-

gens orbitais. O autor enfatizou ainda que a reflectância espectral bidirecional de folhas foi o parâmetro melhor correlacionado a essa aparência mencionada, aliado ainda a outros parâmetros como a transmitância das folhas, suas quantidades e arranjo, características dos demais componentes do dossel (galhos, frutos, flores, etc), características do solo, ângulo zenital solar, ângulo de visada e ângulo azimutal relativo (da fonte e do sensor).

Como consequência de observações como estas, seguiram-se estudos direcionados para uma maior compreensão sobre a participação de cada um destes parâmetros na reflectância do dossel, os quais incluíram a proposição de modelos matemáticos fundamentados na física da interação entre a radiação solar e os dosséis.

GOEL (1988) mencionou que radiação solar incidente sobre um dossel é espalhada e refletida, tendo sua direção e composição espectral alteradas de maneira bastante complexa. Essa alteração é causada tanto por parâmetros inerentes ao próprio dossel, quanto por fatores ambientais. Para propostas do sensoriamento remoto da vegetação, o autor considera ainda fundamental a especificação e entendimento destes parâmetros e influências. Este mesmo autor definiu ainda um sistema pertinente ao sensoriamento remoto da vegetação a partir de dados de reflectância espectral, o qual é constituído pelos seguintes sub-sistemas:

- a) fonte de radiação: normalmente trata-se do Sol e é definida por uma série de propriedades/parâmetros, que incluem a intensidade espectral  $I_{\lambda}$  e a localização ( $\theta_s$  = ângulo zenital solar e  $\psi_s$  = ângulo azimutal solar);
- b) atmosfera: caracterizada por uma série de propriedades/parâmetros, incluindo as concentrações e as propriedades seletivas de absorção e de espalhamento dos diversos comprimentos de onda por parte de aerossóis, vapor d'água e ozônio;
- c) dossel: caracterizado por uma série de propriedades/parâmetros, incluindo os parâmetros óticos (reflectância e transmitância) e estruturais (formas geométricas e posições) dos componentes da vegetação (folhas, galhos, frutos, etc), geometria de plantio e parâmetros ambientais como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação. Em geral estes parâmetros apresentam dependências espectrais, espaciais e temporais;
- d) solo: caracterizado por uma série de propriedades/parâmetros, tais como reflectância e absortância, rugosidade superficial, textura e umidade;
- e) detector: caracterizado por uma série de propriedades/parâmetros, os quais definem sua sensibilidade espectral, abertura, calibração e posição espacial ( $\theta_v$  = ângulo zenital de visada e  $\psi_v$  = ângulo azimutal de visada).

#### MODELOS DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO

Os modelos de reflectância da vegetação constituem um elo de ligação entre os atributos de cada um dos componentes do sistema apresentado por GOEL (1988), e a reflectância do dossel. Este autor apresentou as seguintes

categorias para caracterizar estes modelos de reflectância da vegetação: modelos geométricos; modelos de meio turbido; modelos híbridos; modelos de simulação.

Todos os modelos que determinam o regime de radiação no interior do dossel podem ser fundamentados em geometria ótica, teoria da transferência radiativa ou na teoria da transmitância média do dossel. A seguir serão apresentados alguns aspectos relacionados aos modelos de meio turbido dos quais faz parte o modelo de reflectância da vegetação considerado neste trabalho.

#### Modelos de Meio Turbido para Dosséis Homogêneos

Nestes modelos o dossel é considerado como um meio plano e paralelo, infinitamente extenso que pode ser subdividido em camadas distintas (uma ou mais), caracterizadas por propriedades óticas e estruturais específicas e constantes horizontalmente. Em cada uma destas camadas, os elementos da vegetação são tratados como pequenas partículas que absorvem e espalham radiação e que possuem propriedades geométricas e óticas específicas. Alguns destes modelos se valem da teoria da transmitância média do dossel, outros usam a teoria da transferência radiativa e outros, de uma combinação entre ambas as teorias. Assim, GOEL(1988) considera que estes modelos podem ser divididos em três categorias:

- a) modelos baseados na teoria Kubelka-Munk (KM);
- b) modelos discretos;
- c) modelos baseados na equação de transferência radiativa.

O modelo considerado neste trabalho é fundamentado na solução da equação da transferência radiativa proposta por KUBELKA & MUNK (1931) citados por GOEL (1988).

#### O Modelo SUITS

De todos os modelos de reflectância da vegetação baseados na solução proposta pela teoria KM, o modelo SUITS é o único que considera a reflectância de um dossel como dependente da geometria de iluminação e dos parâmetros arquitetônicos e espectrais de seus elementos constituintes. Neste modelo, o dossel é idealizado como uma mistura de painéis refletores e transmissores lambertianos, tanto no sentido vertical quanto no horizontal, e estes painéis, que em realidade representam os próprios elementos da vegetação, são substituídos por suas projeções (horizontal e vertical).

Se mais de um tipo de elemento da vegetação existir numa camada, os valores dos parâmetros da teoria KM devem ser obtidos para cada um destes separadamente e os resultados devem ser somados, uns aos outros, para se obter o resultado para todo o dossel. O número de camadas pode ser arbitrário.

A atenção dedicada à este modelo tem sido justificada mais pela sua simplicidade em relacionar a reflectância com os parâmetros relativos ao dossel, do que à concordância entre os resultados obtidos através do modelo e aqueles determinados experimentalmente em condições de campo. As diferenças entre estes resultados podem ser explicadas pelas pressuposições de continuidade e homogeneidade (uniformidade) do dossel, que nem sempre são satisfeitas (GOEL, 1988). Este autor menciona que o modelo consegue, ao

menos qualitativamente, observar as dependências da reflectância do dossel com as geometrias de iluminação e de visada, com os próprios parâmetros do dossel (IAF e DAF) e com a reflectância do solo. Pesquisadores como por exemplo CHANCE & LEMASTER (1977) testaram este modelo para dosséis de algodão e trigo, tendo sido encontrado um ajuste fraco entre os valores calculados pelo modelo e aqueles medidos em campo. Mais tarde, CHANCE & LEMASTER (1985) realizaram um trabalho da mesma natureza com dosséis de soja, tendo sido confirmado um ajuste moderado entre estes valores na região do visível e um ajuste fraco na região do infravermelho. Ainda pode-se citar os trabalhos de CHANCE (1977) e de CHANCE & LEMASTER (1978).

#### O Modelo SAIL

O modelo SUITS foi então aprimorado por VERHOEF & BUNNIK (1981) citados por GOEL (1988), de forma a incluir a DAF como parâmetro de entrada, sendo por isso denominado "Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves" (SAIL). O modelo SAIL vem sendo avaliado principalmente para aplicações em culturas agrícolas. RANSON *et al.* (1981) geraram dados de reflectância bidirecional de dosséis homogêneos de soja, referentes a 12 direções de iluminação, os quais têm sido utilizados por pesquisadores para avaliar os resultados alcançados na determinação destes mesmos dados através do modelo SAIL e até de outros modelos de reflectância da vegetação. GOEL & DEERING (1985) avaliaram o modelo SAIL na determinação da reflectância bidirecional de dosséis de gramíneas e soja. Para tanto os autores confrontaram os valores medidos de reflectância com aqueles calculados através do modelo, mediante a estimativa dos parâmetros de entrada. Esta comparação foi feita utilizando a raiz quadrada da média quadrática, aqui denominada RQM, e definida por:

$$RQM = [\Sigma(R_m - R_c)^2 / N]^{1/2} \quad (1)$$

onde:

$R_m$  = valor medido de reflectância;

$R_c$  = valor calculado de reflectância;

$N$  = número de observações.

FUSCO & TREVESE (1985) utilizaram este parâmetro como critério de comparação entre dados provenientes do sensor orbital Thematic Mapper (TM) e aqueles obtidos através de métodos de simulação de defcitos do sensor. KRUG (1991) propôs a padronização de RQM, usada por estes dois autores, pelo desvio padrão dos dados medidos (observados) com o objetivo de permitir sua comparação entre bandas espectrais, uma vez que entre os dados provenientes de bandas espectrais diferentes são observadas dispersões distintas. Tem-se portanto:

$$RQMP = 1/S_m [\Sigma(R_m - R_c)^2 / N]^{1/2} \quad (2)$$

onde:

RQMP = raiz quadrada da média quadrática padronizada;

$S_m$  = desvio padrão dos valores de reflectância medidos.

VALERIANO (1992) analisou a reflectância espectral de dosséis de trigo (*Triticum aestivum* L.) em função de suas variáveis biofísicas, baseando-se em dados experimentais e em resultados do modelo SAIL, avaliando ainda

## DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DOS DOSSÉIS

### Parâmetros Biofísicos

Na análise de sensibilidade os resultados demonstraram que com o aumento do valor do IAF, houve uma diminuição da reflectância na região do visível e um aumento na região do infravermelho. Esse efeito não foi evidente na reflectância medida dos dosséis devido à influência de outros parâmetros sobre suas reflectâncias, tais como sombras (região do visível) e orvalho (região do infravermelho).

A avaliação da ação do aumento ou diminuição do ângulo de inclinação foliar deve ser considerada conjuntamente com a densidade do dossel (maior ou menor IAF) e com as geometrias de iluminação e visada. Para um dossel denso, iluminação oblíqua (maior  $\theta_s$ ) e visada vertical ( $\theta_v = 0$ ), o aumento do ângulo de inclinação foliar acarretou um aumento da reflectância do dossel. Para a mesma situação e uma iluminação menos oblíqua, o aumento deste ângulo acarretou uma diminuição na reflectância do dossel. Em condições de visada fora da vertical (maior  $\theta_v$ ), o aumento do ângulo de inclinação das folhas acarretou o mesmo efeito descrito para a visada vertical.

### Parâmetros Espectrais

Os valores de  $\rho$  das folhas de ambas as espécies apresentaram diferenças entre as reflectâncias espectrais dos dosséis devido a ação de parâmetros geométricos de iluminação e de visada e da própria DAF.

### Parâmetros Geométricos (da fonte e do sensor)

A avaliação do efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância do dossel deve levar em consideração a densidade deste dossel, a disposição ou não das plantas em fileiras e a orientação destas fileiras (quando existirem) em relação aos azimutes de iluminação e de visada. Para dosséis densos e visada vertical, a diminuição do valor de  $\theta_s$  acarretou o aumento da reflectância do dossel, principalmente na região do visível. Na região do infravermelho, a comprovação deste efeito foi prejudicada pela presença do orvalho e sua evaporação coincidente com a diminuição dos valores de  $\theta_s$ . Para dosséis pouco densos e com plantas orientadas em fileiras equidistantes, como aquelas do dossel de peroba, o aumento da reflectância do dossel na região do visível, com a diminuição de  $\theta_s$ , foi atribuído à diminuição do sombreamento mútuo das mudas e do solo. Na região do infravermelho, ainda para este tipo de dosséis, houve também um aumento da reflectância do dossel com a diminuição de  $\theta_s$ , contudo não foi possível verificar se esse aumento foi exclusivamente devido à  $\theta_s$  ou à evaporação do orvalho presente na superfície das folhas.

O efeito do aumento de  $\theta_v$  deve ser analisado conjuntamente com o valor de  $\psi$ . Para dosséis densos e  $\psi$  assumindo valores próximos a  $90^\circ$ , o aumento de  $\theta_v$  acarretou o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais. Com a diminuição de  $\psi$  (direção oposta à de retro-espalhamento), o aumento de  $\theta_v$  acarretou a diminuição da reflectância do dossel, tanto na região do visível quanto na região do infravermelho, para dosséis menos densos e com plantas dispostas em fileiras.



o potencial deste modelo na investigação da relação mencionada. O autor constatou que os resultados obtidos pelo modelo apresentaram comportamento semelhante àquele dos dados observados em campo. ANTUNES (1993) avaliou os desempenhos dos modelos SAIL e SUITS na estimativa da reflectância espectral de dosséis de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). O autor concluiu que os modelos apresentaram tendências semelhantes, porém o desempenho do modelo SAIL foi superior ao do modelo SUITS.

## MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas no procedimento metodológico.

A etapa referente à elaboração dos dosséis constituiu a seleção e disposição das mudas no terreno, de modo a formar os dosséis dos quais foram coletados os dados radiométricos (medições radiométricas) e determinados os valores dos parâmetros biofísicos (IAF e DAF) e dos espectrais das folhas e do solo ( $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$  respectivamente).

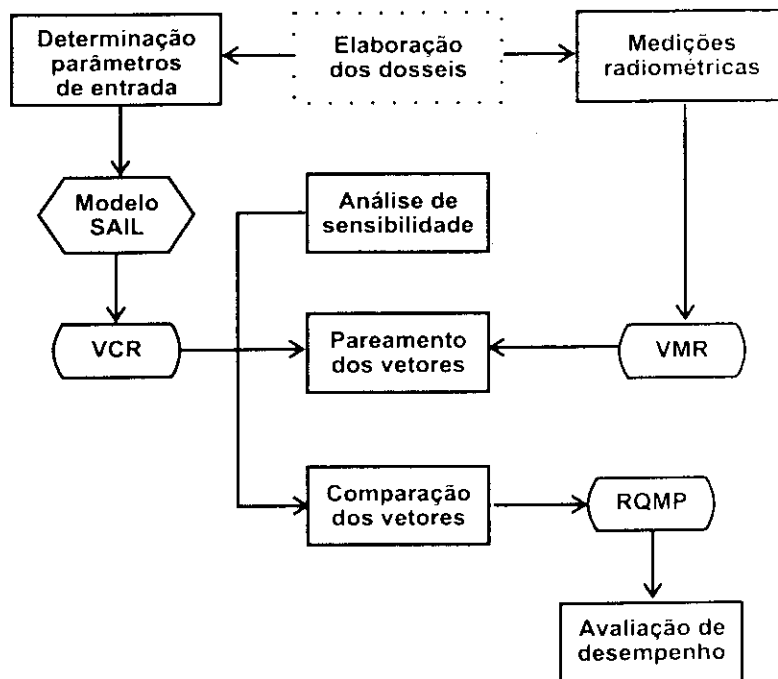


FIGURA 1 - Fluxograma das etapas desenvolvidas no procedimento metodológico  
 FIGURE 1 - Step by step procedure used in the study

Foram constituídos dois diferentes dosséis, sendo um formado exclusivamente por mudas de eucalipto plantadas em tubetes de 10 cm de diâmetro e dispostas no terreno lado a lado sem espaço vazio entre tubetes. O segundo dossel foi constituído por mudas de peroba, plantadas em sacos plásticos com 25 cm de diâmetro, também dispostas lado a lado, semelhantemente ao dossel anterior.

A Figura 2 ilustra um esquema da orientação espacial dos canteiros no solo e os demais ângulos que caracterizaram as geometrias de iluminação e de visada.

As medições radiométricas foram conduzidas utilizando o radiômetro SPECTRON SE-590, atuando na faixa espectral compreendida entre 0,4 a 0,9 m. A configuração deste radiômetro incluiu um mastro que possibilitou a sustentação das unidades sensoras do radiômetro em aproximadamente 2 m acima do topo dos dosséis e seu deslocamento sobre os canteiros ao longo de

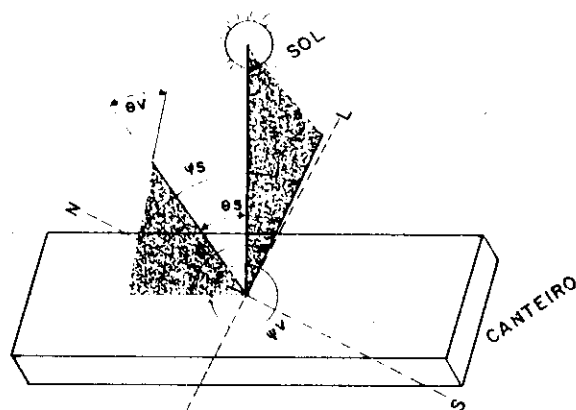


FIGURA 2 - Orientação dos canteiros no terreno e ângulos que caracterizaram as geometrias de iluminação e de visada

FIGURE 2 - Direction of the seedling canopies and the angles of the illumination/view geometry

seu comprimento, de onde foram coletados os dados radiométricos de pontos equidistantes (IFOVs).

Dadas as dimensões dos canteiros (22 x 1,2 m para o canteiro de eucalipto e 10 x 1,2 m para o dossel de peroba), foi possível a coleta de dados de 20 IFOVs do dossel de eucalipto e de 8 IFOVs para o dossel de peroba.

As coletas de dados radiométricos foram realizadas procurando aproveitar as condições atmosféricas favoráveis e uma maior amplitude possível de horários durante o dia para que fosse possível analisar o efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância espectral dos dosséis.

Foram promovidas alterações também no ângulo zenital de visada ( $\theta_v$ ), que assumiu valores de 0, 15 e 30 durante as medições radiométricas. As medições radiométricas tinham início numa das extremidades dos canteiros, coletando dados de cada um dos IFOVs sequencialmente, em direção à extremidade oposta. Esta seqüência de coleta foi denominada de "bateria de medições".

Os dados radiométricos de cada bateria originaram os VMRs médios que passaram a representar os VMRs de um horário específico.

A dinâmica destes VMRs médios foi levada em consideração para concluir sobre o efeito dos parâmetros geométricos sobre a reflectância espectral dos dosséis.

Após a realização das medições radiométricas, foram determinados os valores dos parâmetros biofísicos, geométricos e dos espectrais que constituíram os parâmetros de entrada do modelo. Estes parâmetros foram:

- a) parâmetros biofísicos - IAF (adimensional) e DAF (frequência relativa);
- b) parâmetros espectrais -  $\rho$  (%),  $\tau$  (%),  $\rho_s$  (%) e SKYL (%);
- c) parâmetros geométricos -  $\theta_v$ ,  $\theta_s$ ,  $\psi_v$  e  $\psi_s$  (todos em graus).

O IAF foi calculado segundo procedimento descrito por DAUGHTRY (1990) que consiste na determinação de uma equação de regressão linear, na qual a variável dependente foi a área da folha e as variáveis independentes foram o seu comprimento e a sua largura máximos.

A DAF foi definida pela frequência relativa dos ângulos de inclinação foliar que foram determinados através do uso de um clinômetro posicionado paralelamente à lâmina foliar.

A reflectância e transmitância espectrais hemisféricas foram determinadas em laboratório através do uso de esfera integradora LICOR, considerando a mesma amplitude espectral na qual foram coletados os dados radiométricos provenientes dos dosséis (0,4 a 0,9 m).

A fração de irradiância difusa (SKYL) foi determinada através do sombreamento da placa de referência durante a aquisição de dados radiométricos e o posterior processamento destes dados para a cálculo de valores percentuais referentes então à reflectância da placa sombreada.

A geometria de iluminação ( $\theta_s$  e  $\psi_s$ ) foi determinada através de um programa computacional especialmente elaborado que levava em consideração a hora local, a hora sideral, a declinação e a ascensão reta do sol, a latitude e a longitude da área experimental.

Os parâmetros biofísicos (IAF e DAF), os geométricos ( $\theta_s$ ,  $\psi_s$  e  $\theta_v$ ) e os espectrais ( $\rho$ ,  $\tau$ ,  $\rho_s$  e SKYL), foram submetidos ao processamento do modelo SAIL, numa versão que levava o mesmo nome (SAIL), na qual o dossel era tratado como composto por uma única camada horizontal e homogênea.

Do processamento dos programas, originaram-se os valores calculados de reflectância (VCRs), também para cada IFOV. Assim como efetuado para os VMRs, foram determinados os VCRs médios relativos a cada bateria de medições.

A comparação entre os VMRs e seus respectivos VCRs foi conduzida através da determinação da raiz quadrática média ponderada (RQMP), representada pela seguinte equação:

$$RQMP = 1/S_m [ \sum (VMR - VCR)^2 / N ]^{1/2} \quad (3)$$

onde:

N = número de observações;

S<sub>m</sub> = desvio padrão de VMR;

VMR = valor medido de reflectância;  
VCR = valor calculado de reflectância.

Os cálculos foram elaborados para bandas espectrais definidas nos seguintes intervalos:

- a) banda 1 ==> 0,45 - 0,52 m (azul);
- b) banda 2 ==> 0,52 - 0,60 m (verde);
- c) banda 3 ==> 0,63 - 0,69 m (vermelho);
- d) banda 4 ==> 0,76 - 0,90 m (infravermelho próximo).

Foi conduzida ainda uma etapa referente à análise de sensibilidade do modelo que teve como objetivo fornecer informações sobre a sua sensibilidade em relação às variações dos valores dos parâmetros de entrada. Para tanto, foram realizadas simulações que foram constituídas por processamentos do modelo (em sua versão SAIL), promovendo variações em cada um destes parâmetros individualmente. Estas variações foram promovidas em termos percentuais para todos os parâmetros, com exceção dos angulares, procurando respeitar os limites reais de suas ocorrências no âmbito dos experimentos conduzidos neste trabalho. Estas variações percentuais foram denominadas de percentagens de variação (PV) e serviram também para expressar as alterações dos VCRs determinados pelo modelo. Assim, as conclusões sobre a sensibilidade do modelo levaram em consideração as PVs de cada parâmetro de entrada e as respectivas PVs dos VCRs. Para os parâmetros angulares, incluindo a DAF, foram analisadas as tendências dos VCRs em relação às variações angulares promovidas nas simulações.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de cada um dos resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo permitiu verificar que, de maneira geral, as variações simuladas nos parâmetros IAF, DAF,  $\theta_v$ ,  $\psi_v$ ,  $\theta_s$ ,  $\psi_s$  e SKYL acarretaram variações proporcionalmente muito pequenas nos valores de reflectância calculados pelo modelo, para as quatro bandas espectrais. Para o caso dos parâmetros angulares, levou-se em conta o efeito de suas variações sobre os valores das reflectâncias calculadas.

Os resultados indicaram que as magnitudes das variações das reflectâncias calculadas pelo modelo foram sempre pequenas em relação às variações dos parâmetros angulares.

A sensibilidade do modelo em relação às variações de  $\rho$ , foi maior nas simulações nas quais o solo foi considerado como "mais exposto", do que aquela apresentada para uma situação de solo totalmente coberto pela vegetação.

O modelo foi mais sensível às variações de  $\rho$  e  $\tau$ , sendo estes dois parâmetros então aqueles de maior influência sobre os valores de reflectância calculados.

MAJOR *et al.* (1992) realizaram uma análise de sensibilidade com uma versão adaptada do modelo SAIL, explorando alguns dos parâmetros aqui considerados, tendo encontrado resultados semelhantes.

## PARÂMETROS BIOFÍSICOS

O IAF médio do dossel de eucalipto foi igual a 3,7, o que caracterizou-o como um dossel denso, enquanto o IAF médio do dossel de peroba foi igual a 0,6, o que caracterizou-o como um dossel esparsos ou pouco denso.

## PARÂMETROS RADIOMÉTRICOS

Neste item são apresentados os resultados referentes às coletas de dados radiométricos realizadas em laboratório ( $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$ ).

### Reflectância e Transmitância Hemisféricas das Folhas e Reflectância Hemisférica do Solo ( $\rho$ , $\tau$ e $\rho_s$ )

Através da coleta de dados radiométricos foram definidos os vetores referentes a  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$  que foram usados no processamento do modelo. As representações gráficas referentes a estes vetores encontram-se apresentadas na Figura 3.

### VALORES MEDIDOS DE REFLECTÂNCIA (VMR) X VALORES CALCULADOS DE REFLECTÂNCIA (VCR)

A seguir são apresentados os resultados da comparação entre os VMRs e seus respectivos VCRs referentes a cada dossel, sob diferentes condições de iluminação e de visada.

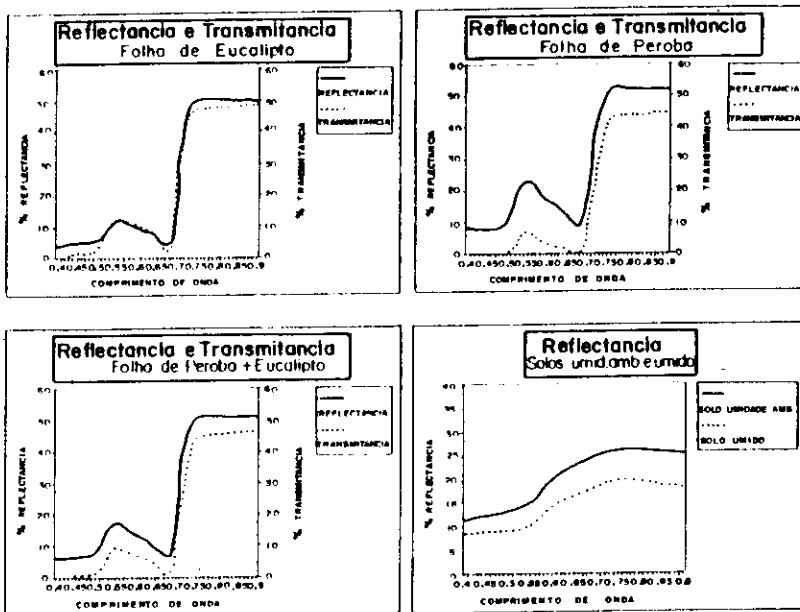


FIGURA 3 - Representação gráfica dos vetores  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$   
 FIGURE 3 - Graphical representation of  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\rho_s$

## Eucalipto

A Figura 4 apresenta os gráficos dos VMRs e seus respectivos VCRs médios, para cada situação de iluminação e visada considerada na coleta de dados radiométricos deste dossel.

O ângulo de inclinação médio das folhas deste dossel foi igual a 18°, o que o caracterizou como um dossel do tipo planófilo.

Considerando os horários nos quais foram realizadas as medições radiométricas neste dossel, a geometria de iluminação foi caracterizada por valores de  $\theta_v$  que variaram de 65° (valor máximo) a 32° (valor mínimo). Os valores do âzimute relativo entre o sol e o sensor ( $\psi$ ) indicaram que as visadas oblíquas ( $\theta_v = 15^\circ$  e  $30^\circ$ ) deram-se quase que perpendicularmente ( $\psi = 91^\circ$  a  $86^\circ$ ) à incidência da REM solar nos primeiros horários da manhã, e tenderam para uma direção oposta à de retroespalhamento nos horários de 12:36:54 a 12:58:33 h.

Nas Figuras 4a e 4b encontram-se as curvas dos VMRs e dos VCRs referentes aos três horários iniciais da manhã (08:06:49 a 08:51:29 h) foi verificada uma variação relativamente pequena da geometria da iluminação solar. Em cada um dos três horários em questão, os dados foram coletados sob diferentes valores de  $\theta_v$  (0°, 15° e 30°, respectivamente). Desprezando então os efeitos da variação da geometria de iluminação neste período de tempo, as diferenças entre as reflectâncias do dossel foram devidas à variação dos valores de  $\theta_v$ . Assim, para as regiões do visível e infravermelho, foi verificada uma tendência de aumento (26% para a região do azul, 25% para a região do verde, 23% para a região do vermelho e 24% para a região do infravermelho), da reflectância do dossel (valores de VMR) com o aumento de  $\theta_v$ . Este resultado foi coerente com as afirmações de KRIEBEL (1978) e BRAKKE & OTTERMAN (1990) referentes ao efeito das variações de  $\theta_v$  sobre a reflectância de um dossel (genericamente), em condições de iluminação semelhantes àsquelas destes três horários em questão.

As reflectâncias calculadas pelo modelo (VCRs), ainda para estes três horários, apresentaram tendências contrárias, ou seja, de diminuição dos valores dos VCRs com o aumento de  $\theta_v$ , como já apresentado nos resultados da análise de sensibilidade do modelo. Destacando-se ainda as amplitudes de variação dos VCRs, que quando comparadas com aquelas dos VMRs, podem ser consideradas pequenas.

Na região do verde (0,52 a 0,6 m) esse aumento de 25% da reflectância pode ser explicado pelo fato de que, neste dossel de eucalipto, as folhas mais jovens, localizadas nas camadas superiores do dossel, apresentavam uma tonalidade mais escura e tendendo para o vermelho. As folhas mais velhas estavam localizadas nas camadas mais inferiores e apresentavam uma tonalidade verde clara. Com o aumento dos valores de  $\theta_v$ , foi possível a visualização destas folhas mais velhas, em relação à visada vertical ( $\theta_v = 0^\circ$ ).

Analisando as curvas referentes aos VMRs dos dois horários subsequentes (09:5:46 a 10:10:06 h) apresentadas nas Figuras 4c e 4d, verificou-se que estes VMRs foram bastantes semelhantes àqueles determinados para o horário de 08:41:11 a 08:51:29 h, para  $\theta_v = 30^\circ$ . Uma vez que entre os três

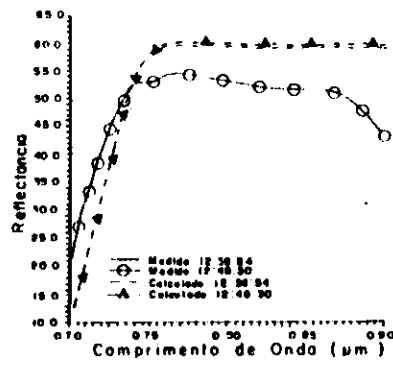
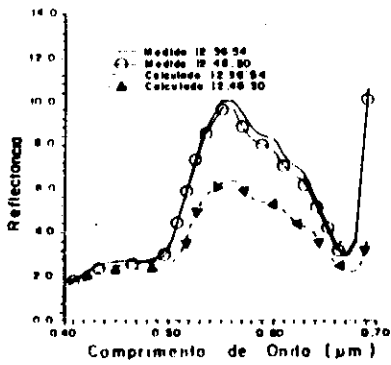
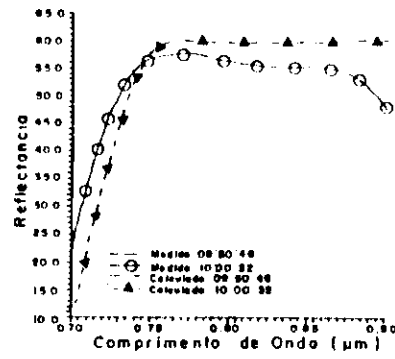
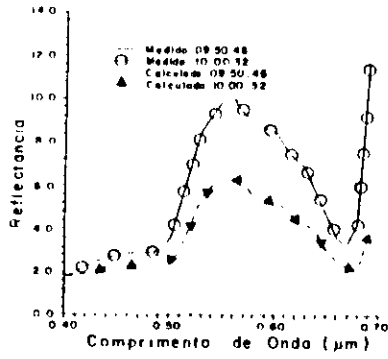
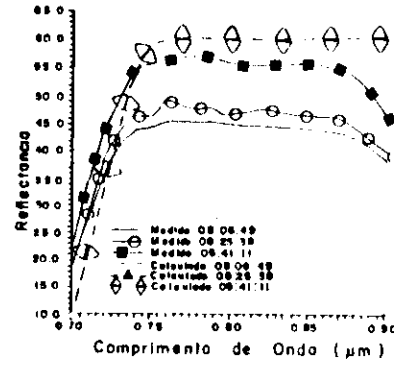
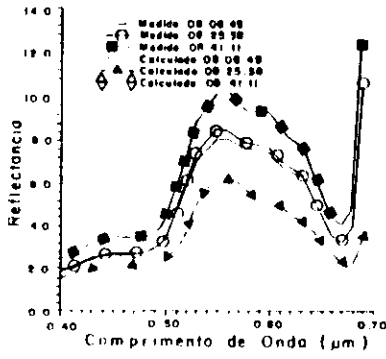


FIGURA 4 - Representação gráfica dos VMRs e VCRs referentes ao dossel de eucalipto nas diversas situações de iluminação e de visada

FIGURE 4 - Graphical representation of the VMRs and VCRs values for the eucalypto seedling canopy in the different situations of illumination/view

primeiros horários da manhã, e os dois horários em questão houve alterações na geometria de iluminação, e que entre estes últimos a variação de  $\theta_v$  parece não ter alterado a reflectância do dossel, as variações na geometria de iluminação podem explicar o aumento da reflectância medida do dossel.

Para a região do visível, estes resultados concordaram com aqueles apresentados por JACKSON *et al.* (1979) e WANJURA & HATFIELD (1988) sobre o efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância de um dossel, quando observado verticalmente ( $\theta_v = 0$ ). A pouca variação identificada entre os VMRs nesta região espectral pode ser explicada pela grande densidade do dossel de eucalipto. RANSON *et al.* (1986) mencionaram que dosséis densos apresentam menores variações em sua reflectância espectral quando comparados com dosséis mais esparsos.

Na região do infravermelho (Figura 4d), foi detectado um aumento de 14% na reflectância do dossel nos horários compreendidos entre 09:50:46 a 10:10:06 h, em relação aos três primeiros horários da manhã, o que foi interpretado como um resultado não concordante com as afirmações de TUCKER (1977) referentes ao aumento da reflectância do dossel com o aumento dos valores de  $\theta_s$ .

Ainda para a região do infravermelho, o aumento na reflectância do dossel (aumento dos VMRs) pode ser explicado pela presença de orvalho em maior quantidade nos primeiros horários da manhã, e sua gradual evaporação durante o dia, até seu completo desaparecimento nos horários próximos às 10:30 h. PINTER & JACKSON (1981) concluíram que a presença do orvalho na superfície das folhas tendeu a diminuir a reflectância espectral do dossel, o que o tornou um agente complicador da análise da dinâmica dessa reflectância. Com a evaporação do orvalho, a reflectância do dossel na região do infravermelho tendeu a aumentar.

Para os dois últimos horários (12:36:54 a 12:58:33 h) cujas curvas encontram-se apresentadas nas Figuras 4e e 4f, foi verificada uma tendência de diminuição na reflectância do dossel, em ambas as regiões espectrais. Em tratando-se de um dossel denso, segundo RANSON *et al.* (1986), não deveriam ser verificadas grandes variações na reflectância do dossel nestas regiões espectrais com as variações de  $\theta_s$  e de  $\theta_v$ , o que foi realmente constatado. A tendência de diminuição mais evidente para  $\theta_v = 15$ , pode ser atribuída à variação de  $\psi$  que conferiu a esta visada uma observação frontal ao Sol, ou seja, oposta à direção de retroespalhamento. Estes últimos autores e JACKSON *et al.* (1979) comentaram que, em uma condição de visada semelhante a esta, a diminuição da reflectância pode ser explicada pela maior visualização de sombras no dossel, mesmo para dosséis densos.

O Quadro 1 apresenta os valores de RQMP calculados para cada uma das bandas do espectro (azul, verde, vermelho e infravermelho), valores estes utilizados para medir o ajuste entre os VMRs e os VCRs.

A análise dos dados contidos neste quadro pode ser conduzida no sentido de avaliar o desempenho do modelo em cada horário individualmente, atendo-se portanto aos valores de RQMP determinados para cada banda, ou ainda no sentido de avaliar esse desempenho em cada banda nos diversos horários. Essas duas considerações são apresentadas a seguir.



Considerando a primeira possibilidade, pode-se verificar que a bandas de absorção da REM por parte dos elementos da vegetação (bandas 1 e 3) apresentaram os menores valores de RQMP, relativamente às demais bandas, indicando que os VCRs determinados pelo modelo nestas regiões espectrais apresentaram-se mais próximos de seus respectivos VMRs, ou seja, o modelo atingiu melhores desempenhos nestas bandas. Na banda 2, referente à região

QUADRO 1 - Valores de RQMP para o dossel de eucalipto  
TABLE 1 - RQPM values for the eucalypto seedling canopy

Horário	$\theta_v$	Banda 1 azul	Banda 2 verde	Banda 3 vermelho	Banda 4 infraver.
08:06:49	0	0,890714	2,916910	1,280502	8,076651
08:25:38	15	0,945606	3,249795	1,269121	5,881227
08:41:11	30	1,434821	4,487726	1,503576	2,536975
09:50:46	0	0,954166	3,563614	1,308241	2,157125
10:00:32	15	0,925785	3,466644	1,288755	2,138095
12:36:54	0	0,870660	3,164361	1,244702	3,271291
12:48:30	15	0,780498	2,792824	1,182446	3,318926

do verde, os valores de RQMP apresentaram-se ligeiramente mais elevados do que aqueles determinados nas bandas 1 e 3, indicando uma distância maior entre os VCRs e VMRs relativos a esta região espectral, e portanto um pior desempenho do modelo. Para a banda 4 (infravermelho próximo) os VCRs apresentaram-se ainda mais distantes dos VMRs, uma vez que os valores de RQMP foram relativamente os mais elevados, indicando os piores desempenhos do modelo. Este resultado pode ser melhor visualizado através da observação do Quadro 1.

Estes resultados podem ser explicados levando em consideração aqueles alcançados por GAUSMAN *et al.* (1973) nos quais foi comprovada a menor amplitude de variação da reflectância espectral de folhas de vinte espécies de culturas agrícolas, relativa ao comprimento de onda de 0,55  $\mu\text{m}$  (verde). Segundo estes autores, as maiores amplitudes relativas de variação desta reflectância foram encontradas para o comprimento de onda de 1,0  $\mu\text{m}$  (infravermelho próximo). Aliado a isso, deve-se levar em consideração estas amplitudes em termos absolutos. Assim, as variações esperadas entre as reflectâncias de folhas de diferentes espécies para a região do visível, serão menores do que estas variações para a região do infravermelho.

Isto explica a maior proximidade entre os VMRs e seus respectivos VCRs nas regiões de maior absorção da REM por parte da vegetação, pois o modelo teve uma "chance" maior de determinar valores de reflectância mais próximos àqueles medidos, uma vez que as variações, em termos absolutos, para estas regiões foram e geralmente serão menores.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração refere-se à maior sensibilidade do modelo em relação às variações da reflectância e da transmitância hemisféricas das folhas ( $\rho$  e  $\tau$ ). Graças a esta maior sensibilidade, os

VCRs apresentaram-se muito mais próximos da reflectância hemisférica das folhas (vide Figura 3), a despeito dos demais parâmetros que exerceram influência sobre a reflectância do dossel. Através da análise das curvas de todos os VCRs e daquela referente à reflectância hemisférica das folhas de eucalipto, verificou-se que, na região do visível, essa reflectância do dossel foi "reduzida" e na região do infravermelho esta foi "acrescida" pelo modelo. O que foi coerente com as afirmações de KUMAR (1972) e GOEL (1988) sobre as diferenças entre as reflectâncias das folhas e de um dossel que as contém.

Considerando agora a segunda possibilidade de análise dos dados contidos no Quadro 1, verificou-se que, para as bandas referentes à região do visível, os valores de RQMP aumentaram até o horário de 08:41:11 h, a partir do qual diminuíram até atingirem valores mínimos no horário de 12:48:30 h. Na banda 4 os valores de RQMP foram decrescentes até o horário de 10:00:32 h, a partir do qual tornaram a aumentar.

Nos três primeiros horários da manhã, nos quais houve pouca alteração da geometria de iluminação, a queda do desempenho do modelo na região do visível com o aumento dos valores de  $\theta_v$ , comprovou a pouca sensibilidade do modelo em relação às variações deste ângulo. Para a região do infravermelho, a melhoria do desempenho do modelo foi proporcionada pelo aumento dos valores da reflectância do dossel (VMRs) em decorrência da visada mais oblíqua. Esse aumento promoveu a aproximação entre os VMRs e seus respectivos VCRs.

Para os horários subsequentes (09:50:46 a 10:10:06 h), verificou-se que os valores de RQMP referentes às bandas 1, 2 e 3 foram semelhantes àqueles encontrados para os dois primeiros horários da manhã (08:06:49 a 08:36:28 h), cujos dados foram também obtidos com  $\theta_v$  iguais a 0 e 15, respectivamente. Este resultado apontou para uma comprovação do efeito de  $\theta_v = 30$  sobre a reflectância do dossel determinada no horário de 08:41:11 a 08:51:29 h.

Na região do infravermelho os valores de RQMP foram menores do que aqueles determinados nos dois primeiros horários da manhã, devido ao aumento da reflectância do dossel causado provavelmente pela evaporação do orvalho.

Em realidade o que foi verificado aqui foi uma aproximação dos VMRs com seus respectivos VCRs e não o contrário.

Nos dois últimos horários (12:36:54 a 12:58:33 h) os valores de RQMP apresentaram uma diminuição na região do visível, indicando que no horário de 12:48:30h a 12:58:33h o modelo alcançou seu melhor desempenho devido à maior aproximação entre os VMRs e VCRs.

#### Peroba

A Figura 5 apresenta os gráficos referentes aos VMRs e VCRs médios medidos e calculados para nove horários distintos.

O IAF médio deste dossel de peroba foi igual a 0,6, e as plantas foram dispostas em fileiras equidistantes.

Considerando inicialmente os resultados obtidos no dia 11.04.91 e os três primeiros e únicos horários de medições radiométricas (08:17:33 a 09:25:05 h) apresentados nas Figuras 5a e 5b, verificou-se que entre o primeiro destes horários e o segundo, houve um intervalo de uma hora entre as coletas de dados,

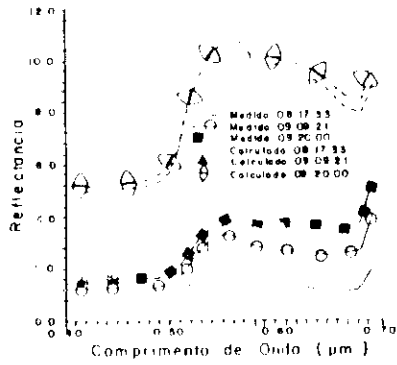


Fig. 5 a

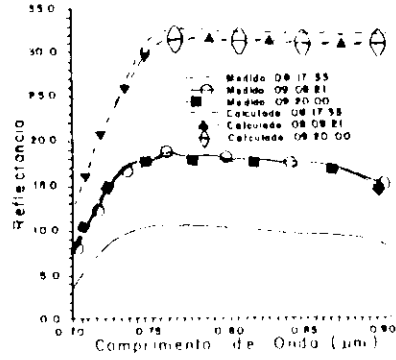


Fig. 5 b

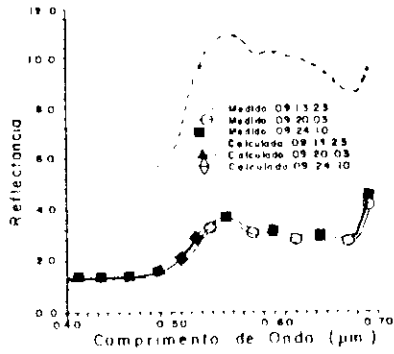


Fig. 5 c

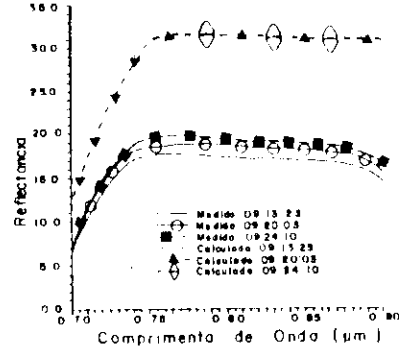


Fig. 5 d

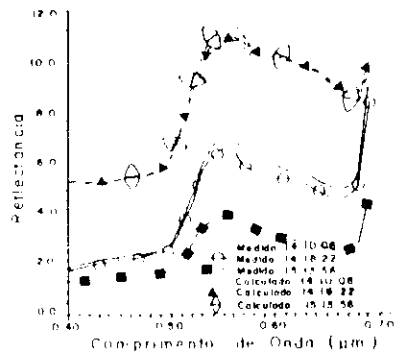


Fig. 5 e

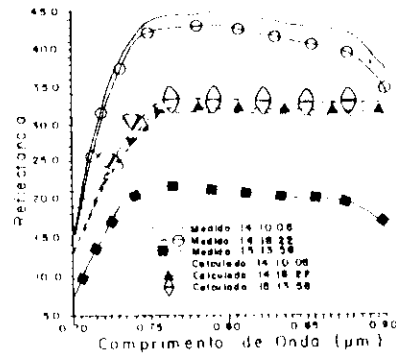


Fig. 5 f

FIGURA 5 - Representação gráfica dos VMRs e VCRs referentes ao dossel de peroba nas diversas situações de iluminação e de visada  
 FIGURE 5 - Graphical representation of the VMRs and VCRs values for the peroba seedling canopy in the different situations of illumination/view

o que acarretou a modificação na geometria de iluminação. Assim, as diferenças entre os VMRs destes primeiros horários e aqueles referentes aos dois horários subsequentes não pode ser atribuído exclusivamente às variações de  $\theta_v$ .

Para as regiões do visível e infravermelho os valores mínimos de reflectância do dossel foram determinados no primeiro horário, ou seja, numa situação de iluminação mais oblíqua (maior  $\theta_v$ ). JACKSON *et al.* (1979) e RANSON *et al.* (1986) afirmaram que em geometrias de iluminação semelhantes a esta e visada vertical ( $\theta_v = 0$ ), o sombreamento entre as fileiras torna-se máximo, o que acarreta uma diminuição nos valores de reflectância do dossel relativa à região do visível. Para a região do infravermelho JACKSON *et al.* (1979) afirmaram que esse efeito não é tão pronunciado. Segundo RANSON *et al.* (1986), com o aumento da elevação solar e conseqüente diminuição do valor de  $\theta_v$ , a tendência da reflectância do dossel é aumentar na região do visível e diminuir na região do infravermelho. Os resultados alcançados nos dois horários subsequentes ao primeiro horário deste dia 11.04.91 comprovaram estas afirmações para a região do visível, mas seguiram uma tendência oposta na região do infravermelho.

Uma vez que a geometria de iluminação sofreu uma variação significativa entre o primeiro horário e os dois horários seguintes, o efeito de  $\theta_v$  pode explicar o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais somente nestes dois últimos horários em questão. BRAKKE & OTTERMAN (1990) verificaram que o aumento de  $\theta_v$  acarretou no aumento da reflectância de dosséis de culturas agrícolas nas regiões do visível e infravermelho.

Os resultados alcançados no dia 12.04.91 apresentados nas Figuras 5c e 5d, para os três horários da parte da manhã, (09:13:23 a 09:31:15), foram semelhantes àqueles obtidos no dia anterior, destacando-se o menor período de tempo empreendido entre as coletas de dados radiométricos, o que acarretou na minimização da alteração da geometria de iluminação. Desta forma, foi possível verificar o efeito do aumento dos valores de  $\theta_v$  sobre a reflectância do dossel, tendendo à elevá-la.

A orientação espacial das fileiras das plantas deste dossel de peroba foi coincidente com o alinhamento do canteiro (azimute do canteiro =  $\psi_v = 335$ ), estando as plantas equidistantes uma das outras. Este fato pode explicar os baixos valores da reflectância do dossel determinados nos horários matutinos nos dois dias mencionados. Para estes horários os VCRs não apresentaram as mesmas magnitudes de variação, mantendo-se sempre superiores aos seus respectivos VMRs. Isto pode ser explicado pela já mencionada pouca sensibilidade do modelo em relação às variações dos parâmetros biofísicos, de iluminação e de visada e à sua maior sensibilidade em relação às variações de  $\rho$  e  $\tau$ .

Comparando a curva de reflectância hemisférica da folha de peroba apresentada na Figura 3, com as curvas dos VCRs apresentadas na Figura 5, constatou-se que o modelo apresentou os VCRs mais próximos aos valores de  $\rho$  referente à folha de Peroba, mais uma vez tendendo a apresentar a reflectância calculada do dossel com valores mais baixos que aqueles referentes a  $\rho$ , para ambas as regiões espectrais.

Nos horários de 14:10:06 a 14:22:15 h, cujas curvas encontram-se apresentadas nas Figuras 5e e 5f, foram identificados os maiores valores de

reflectância para o dossel de peroba, em toda a amplitude espectral considerada, sendo que entre estes dois horários não foi considerada a alteração da geometria de iluminação devido à proximidade temporal entre eles. Na região do infravermelho os VMRs chegaram a exceder os VCRs.

Nestes horários os valores de  $\psi$  foram mínimos, enquanto que os valores de  $\theta_s$  apresentaram-se muito próximos daqueles obtidos em horários próximos às 09:30 h. Para esta situação geométrica de iluminação e visada vertical (14:10:06 h a 14:17:00 h) o solo foi mais sombreado, uma vez que as sombras foram mais projetadas entre as plantas, mantendo um maior número de folhas iluminadas. Com isso, o efeito do solo, que nos horários da manhã, dominou o sinal captado pelo sensor (radiômetro) em cada IFOV devido ao maior sombreamento das plantas, foi minimizado, acarretando o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais. Aliado à isso, houve ainda a evaporação do orvalho, que nestes horários era totalmente inexistente.

A visada com  $\theta_v = 15^\circ$ , para o horário de 14:18:22 a 14:22:15 h, acarretou uma ligeira diminuição na reflectância do dossel na região do infravermelho em relação a  $\theta_v = 0^\circ$  para o horário das 14:10:06 a 14:17:00 h, o que foi coerente com os resultados alcançados por RANSON *et al.* (1986) e BRAKKE & OTTERMAN (1990) referentes à dinâmica da reflectância de um dossel em relação ao aumento de  $\theta_v$ .

Para o horário de 15:13:56 a 15:17:39 h, cujas curvas encontram-se também apresentadas nas Figuras 5e e 5f, foi verificada uma diminuição na reflectância do dossel em toda a amplitude espectral considerada. Neste horário devem ser considerados os efeitos das geometrias de iluminação e de visada. Entre este horário e os dois que o antecederam, houve uma diferença de aproximadamente 50 minutos. Este período de tempo foi suficiente para promover uma alteração de aproximadamente  $10^\circ$  em  $\theta_s$  e em  $\psi_s$ . Ainda neste último horário,  $\theta_v$  foi igual à  $30^\circ$ , com  $\psi$  igual à  $38^\circ$ , em direção oposta ao retroespalhamento. Comparando esta geometria de iluminação com aquela do horário de 08:17:33 a 08:26:31 h, verificou-se que ambas foram semelhantes, diferindo-se somente em  $\psi$ .

Devido aos valores novamente elevados de  $\theta_s$ , as plantas voltaram a ser sombreadas no sentido da diagonal ao canteiro, aliado ainda à visada oposta ao retroespalhamento, tendendo então a diminuir os valores da reflectância do dossel (48% em relação aos horários anteriores, próximos às 14:00 h).

A demora entre as coletas de dados radiométricos realizadas neste horário das 15:13:56 a 15:17:39 h e nos dois outros horários que o antecederam foi devido à execução de uma rega acidental no canteiro que continha o dossel de peroba. Diante de condições atmosféricas favoráveis, optou-se por realizar as medições radiométricas, mesmo estando as folhas cobertas por água. A presença de gotículas de água na superfície das folhas pode também ter contribuído para a diminuição da reflectância do dossel na região do infravermelho.

Os VCRs não apresentaram as mesmas amplitudes de variação em todos os horários, o que comprovou os resultados alcançados na análise de sensibilidade.

O Quadro 2 contém os RQMP determinados para cada banda e em cada horário de medição radiométrica.

Da mesma forma como conduzida a análise destes valores de RQMP para o dossel de eucalipto, fixando-se o horário, verificou-se que os valores mínimos de RQMP foram atingidos nas bandas 1 e 3, sendo detectado um ligeiro aumento destes valores na banda 2 e um aumento ainda maior na banda 4. Isto pode ser explicado pelas mesmas constatações de GAUSMAN *et al.* (1973) sobre as variações relativas entre os valores de reflectância espectrais de folhas de vinte espécies agrícolas. Como já mencionado anteriormente, em

QUADRO 2 - Valores de RQMP para o dossel de Peroba  
TABLE 2 - RQPM values for the peroba seedling canopy

Horário	$\theta_v$	Banda 1 azul	Banda 2 verde	Banda 3 vermelho	Banda 4 infraver.
08:17:33	0	22,29989	33,45124	23,46388	32,76114
09:09:21	15	13,46933	22,49426	11,86768	16,57025
09:20:00	30	12,06133	20,03072	10,33950	12,55013
09:13:23	0	14,22440	22,53691	12,90277	16,57025
09:20:03	15	13,25913	20,89461	11,60475	15,00109
09:24:10	30	12,60520	19,85140	11,05580	14,10329
14:10:06	0	4,68474	5,66597	2,70606	5,75582
14:18:22	15	5,14061	6,90130	3,22597	3,99145
15:13:56	30	11,60877	20,61034	9,99946	10,58664

termos absolutos estas diferenças conferem à região do visível uma amplitude muito menor do que aquela referente à região do infravermelho. Assim, o modelo teve uma "chance" maior de determinar valores de reflectância mais próximos dos medidos em campo.

Analisando os valores de RQMP referentes a ambas as regiões espectrais, para os horários matutinos, verificou-se suas diminuições com o avançar das horas e com o aumento dos valores de  $\theta_v$ . Isto deveu-se à dinâmica da reflectância do dossel sob o efeito ora exclusivo da geometria de iluminação, ora de  $\theta_v$  e finalmente devido à ação conjunta de ambas as geometrias. Uma vez que os VCRs não apresentaram a mesma magnitude de variação, o modelo atingiu seus melhores desempenhos (ou menos insatisfatórios) quando as folhas foram melhor iluminadas e, conseqüentemente, os VMRs aproximaram-se de seus respectivos VCRs.

O mesmo não foi verificado para os horários próximos às 14:00 h, indicando que o aumento dos valores de  $\theta_v$  distanciou ainda mais os VMRs de seus respectivos VCRs na região do visível. Para a região do infravermelho, o efeito de  $\theta_v$  foi exatamente o contrário.

## CONCLUSÕES

Neste item são apresentadas as conclusões deste trabalho segundo as hipóteses formuladas.

## DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DOS DOSSÉIS

### Parâmetros Biofísicos

Na análise de sensibilidade os resultados demonstraram que com o aumento do valor do IAF, houve uma diminuição da reflectância na região do visível e um aumento na região do infravermelho. Esse efeito não foi evidente na reflectância medida dos dosséis devido à influência de outros parâmetros sobre suas reflectâncias, tais como sombras (região do visível) e orvalho (região do infravermelho).

A avaliação da ação do aumento ou diminuição do ângulo de inclinação foliar deve ser considerada conjuntamente com a densidade do dossel (maior ou menor IAF) e com as geometrias de iluminação e visada. Para um dossel denso, iluminação oblíqua (maior  $\theta_v$ ) e visada vertical ( $\theta_v = 0$ ), o aumento do ângulo de inclinação foliar acarretou um aumento da reflectância do dossel. Para a mesma situação e uma iluminação menos oblíqua, o aumento deste ângulo acarretou uma diminuição na reflectância do dossel. Em condições de visada fora da vertical (maior  $\theta_v$ ), o aumento do ângulo de inclinação das folhas acarretou o mesmo efeito descrito para a visada vertical.

### Parâmetros Espectrais

Os valores de  $\rho$  das folhas de ambas as espécies apresentaram diferenças entre as reflectâncias espectrais dos dosséis devido a ação de parâmetros geométricos de iluminação e de visada e da própria DAF.

### Parâmetros Geométricos (da fonte e do sensor)

A avaliação do efeito da geometria de iluminação sobre a reflectância do dossel deve levar em consideração a densidade deste dossel, a disposição ou não das plantas em fileiras e a orientação destas fileiras (quando existirem) em relação aos azimutes de iluminação e de visada. Para dosséis densos e visada vertical, a diminuição do valor de  $\theta_v$  acarretou o aumento da reflectância do dossel, principalmente na região do visível. Na região do infravermelho, a comprovação deste efeito foi prejudicada pela presença do orvalho e sua evaporação coincidente com a diminuição dos valores de  $\theta_v$ . Para dosséis pouco densos e com plantas orientadas em fileiras equidistantes, como aquelas do dossel de peroba, o aumento da reflectância do dossel na região do visível, com a diminuição de  $\theta_v$ , foi atribuído à diminuição do sombreamento mútuo das mudas e do solo. Na região do infravermelho, ainda para este tipo de dosséis, houve também um aumento da reflectância do dossel com a diminuição de  $\theta_v$ , contudo não foi possível verificar se esse aumento foi exclusivamente devido à  $\theta_v$  ou à evaporação do orvalho presente na superfície das folhas.

O efeito do aumento de  $\theta_v$  deve ser analisado conjuntamente com o valor de  $\psi$ . Para dosséis densos e  $\psi$  assumindo valores próximos a  $90^\circ$ , o aumento de  $\theta_v$  acarretou o aumento da reflectância do dossel em ambas as regiões espectrais. Com a diminuição de  $\psi$  (direção oposta à de retro-espalhamento), o aumento de  $\theta_v$  acarretou a diminuição da reflectância do dossel, tanto na região do visível quanto na região do infravermelho, para dosséis menos densos e com plantas dispostas em fileiras.

## DO DESEMPENHO DO MODELO

Pelos resultados alcançados nos dois diferentes tipos de dosséis e na análise de sensibilidade, concluiu-se que os valores de reflectância calculados pelo modelo foram próximos daqueles referentes às reflectâncias espectrais hemisféricas das folhas das espécies consideradas.

Os valores de reflectância medidos de cada dossel, nas diversas condições de iluminação e de visada, apresentaram-se mais distantes daqueles referentes às reflectâncias hemisféricas das folhas, o que indicou a ação de outros parâmetros (biofísicos, geométricos e eventuais como orvalho, por exemplo) sobre a reflectância espectral destes dosséis.

A subestimativa desta ação mencionada e a superestimativa da participação das propriedades espectrais das folhas, por parte do modelo, resultaram em diferenças entre os VMRs e seus respectivos VCRs freqüentemente superiores a 10%, o que caracterizou os desempenhos do modelo como não satisfatórios.

A ocorrência de valores menores de RQMP nas regiões do azul e vermelho foi devido à menor variabilidade absoluta que a reflectância espectral da vegetação apresenta nestas regiões espectrais, o que conferiu ao modelo uma maior "chance" de determinar valores de reflectância mais próximos aos valores medidos.

## SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste item são apresentadas algumas sugestões e recomendações visando a condução de trabalhos futuros envolvendo a aplicação de modelos de reflectância da vegetação, tanto para o estudo da reflectância espectral de dosséis, quanto para a estimativa de parâmetros biofísicos.

### DA ELABORAÇÃO OU ESCOLHA DOS DOSSÉIS

Entendendo que as diferentes possibilidades de caracterização dos parâmetros biofísicos ainda não foram totalmente exploradas, recomenda-se a elaboração de outros tipos de dosséis, tanto no que se refere à densidade de mudas, quanto às suas alturas e à composição florística, para que suas reflectâncias espectrais sejam avaliadas em função das geometrias de iluminação e de visada e de suas diferenças arquitetônicas.

A consideração de plantas de maior porte para a elaboração destes dosséis, deve ainda ser explorada. Isso implicará na adequação de metodologias destinadas à determinação dos parâmetros biofísicos e para a coleta de dados radiométricos. Para tanto faz-se mister o aprimoramento e a adaptação de metodologias envolvendo o uso de fotografias hemisféricas tomadas no interior destes dosséis, e o seu posterior processamento digital em aplicativos destinados à determinação do IAF, fundamentados no balanço de energia.

A disposição das plantas no terreno em termos espaciais e quantitativos deverá levar em consideração não só a trajetória solar, como também a aplicação de delineamento estatístico que assegure uma maior confiabilidade à análise dos resultados.



## DO MODELO DE REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO

Os aprimoramentos destes modelos têm sido constantes. Como consequência, novas versões têm se tornado disponíveis visando a adequação dos modelos às diferentes condições encontradas na natureza. Para a vegetação de porte arbustivo e/ou arbóreo, ganham destaque as versões que consideram a existência de diferentes camadas horizontais (estratificação) e as diferentes proporções de sombra dentro do dossel.

## BIBLIOGRAFIA CITADA

- ANTUNES, M. A. H. 1993. **Aplicação dos modelos de reflectância SUITS e SAIL, no estudo do comportamento espectral da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. São José dos Campos. INPE - no prelo.
- BRAKKE, T. W. & OTTERMAN, J. 1990 Canopy bidirectional reflectance dependence on leaf orientation. **International Journal of Remote Sensing**, 11(6):1023-1032.
- CHANCE, J. E. 1977. Applications of Suits spectral model to wheat. **Remote Sensing of Environment**, 6:147-150.
- CHANCE, J.E.; LEMASTER, E.W. 1978. Plant canopy light absorption model with application to wheat. **Applied Optics**, 17: 2629-2636.
- CHANCE, E. & LEMASTER, E. W. 1977. Suits reflectance models for wheat and cotton theoretical and experimental tests. **Applied Optics**, 16(2):407-412.
- CHANCE, J. E. & LEMASTER, E. W. 1985. A test of the Suits vegetative- canopy model with LARS soybean- canopy reflectance data. **International Journal of Remote Sensing**, 6(5):665-672.
- COLWELL, J. E. 1974. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 3:175-183.
- DAUGHTRY, C. S. T. 1990. Direct measurements of canopy structure. In: Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, 5(1):45-60.
- FUSCO, L. & TREVESE, D. 1985. On the reconstruction of lost data in images of more than one band. **International Journal of Remote Sensing**, 6(9):1535-1544,.
- GAUSMAN, H. W.; ALLEN, W. A.; WIEGAND, C. L.; ESCOBAR, D. E.; RODRIGUEZ, R. R. & RICHARDSON, A. J. 1973. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. U.S. Department of Agriculture. **Technical Bulletin** 1465.
- GOEL, N. S. & DEERING, D. W. 1985. Evaluation of canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, GE-23(5): 674-721.
- GOEL, N. S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, 4:1-212.
- JACKSON, R. D.; PINTER, J. R.; IDSO, S. B. & REGINATO, R. J. 1979. Wheat spectral reflectance: interactions between configuration, sun elevation and azimuth angle. **Applied Optics**, 18:3730-3732.
- KRIEBEL, K. T. 1978. Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces. **Applied Optics**, 17:253-260.

- KRUG, T. 1992. **Statistical approaches to the estimation of missing values arising in remotely sensed data**. Sheffield. U.K. PhD. Thesis. University of Sheffield, 65 p.
- KUMAR, R. 1972. **Radiation from plants, reflection and emission: a review**. Lafayette, Indiana. Purdue Research Foundation. Research Project nº 5543. 88 p.
- MAJOR, D. J.; SCHAALJE, G. B.; WIEGAND, C. & BLAD, B. L. 1992. Accuracy and sensitivity analysis of SAIL model- predicted reflectance of mayze. **Remote Sensing of Environment**, 41(11):61-70.
- PINTER, P. J. & JACKSON, R. D. 1981. Dew and vapor pressure as complicating factors in the interpretation of spectral radiance from crops. In: **Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 2:547-554 University of Michigan. Ann Arbor, Michigan, USA.
- RANSON, K. J.; VANDERBILT, V. C.; BIEHL, L. L.; ROBINSON, B. F. & BAUER, M. E. 1981. Soybean canopy reflectance as a function of view and illumination geometry. In: **Proceedings of the 15th International Symposium of Remote Sensing of Environment**. University of Michigan. Ann Arbor, Michigan, USA. p.853-865.
- RANSON, K. J.; DAUGHTRY, C. S. T. & BIEHL, L. L. 1986. Sun angle, view angle and background effects on spectral response of simulated Balsan Fir canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(5):649-658.
- TUCKER, C. J.; GARRAT, M. W. 1977. Leaf optical system modeled as an stochastic process. **Applied Optics**, 16:635-642.
- VALERIANO, M. de M. 1992. **Reflectância espectral de trigo irrigado (*Triticum aestivum* L.) por espectralradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL**. São José dos Campos. INPE-5426 - TDI/483).
- WANJURA, D. F. & HATFIELD, J. L. 1988. Vegetative and optical characteristics of four-row crop canopies. **International Journal of Remote Sensing**, 9(2):249-258.