

REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE CULTURAS AGRÍCOLAS (II): MODELAGEM

Márcio de Morisson Valeriano

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil.

Bolsista do CNPq - valerian@ltid.inpe.br

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

RESUMO – Apresenta-se uma revisão do histórico de desenvolvimento dos modelos de reflectância baseados na transferência radiativa em meios túrbidos. São abordados os desdobramentos e modificações desses modelos, desde a adaptação da teoria K-M a massa vegetais, passando às equações de Duntley, ao modelo AGR e, enfim, aos conhecidos modelos Suits e depois SAIL. Os modelos Suits e SAIL, consagrados em experimentos, calculam a reflectância da vegetação a partir de variáveis biofísicas e espectrais do dossel e de parâmetros relativos à geometria de iluminação/observação. A descrição dos dosséis vegetais é feita através dos índices de área de seus componentes, sobretudo área foliar, juntamente com a arquitetura da planta. Os dados espectrais dos componentes de dossel foram considerados fundamentais como base quantitativa para estudos sobre as relações espectro-agronômicas.

Palavras-Chave – sensoriamento remoto, dossel, reflectância espectral, modelagem.

ABSTRACT – A brief review on the development of the reflectance models based on radiative transfer in turbid medium is presented. The variants and modifications of these models are concerned, from the application of the K-M theory, the Duntley equations, the AGR model, to the well known Suits and SAIL models. Suits and SAIL models, tested in field trials, calculate the spectral reflectance of vegetation as a function of canopy biophysical and spectral parameters and of the viewing/illuminating geometry. The canopies are described through the area index of their components, mainly leaf

area, with the plant architecture. Canopy single component spectral data were considered of great importance as quantitative basis for studies concerning spectral-agronomic relationships.

Keywords: remote sensing, canopy, spectral reflectance, modeling.

INTRODUÇÃO

É importante estabelecer relações entre os Fatores de Reflectância Bi-Direcionais (FRBD) e dados biofísicos dos dosséis, uma vez que essa é a chave para uma interpretação quantitativa dos dados espectrais. A modelagem de reflectância dos dosséis é uma ferramenta de baixo custo que pode fornecer tais relações rapidamente e sob condições controladas. Além disso, esses modelos permitem muitas investigações teóricas que, por sua vez, otimizam a elaboração de planos de pesquisa em radiometria de culturas. De imediato, pode-se ressaltar as aplicações através de simulação de mudanças de variáveis e da inversão dos modelos (**Figura 1**).

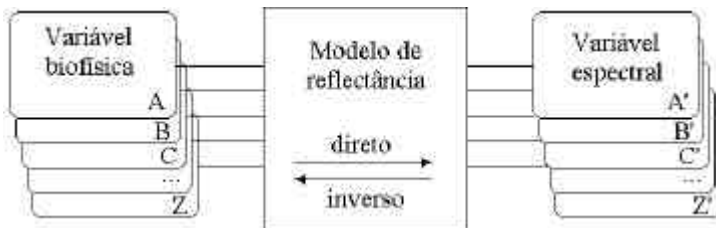


Figura 1 – Relacionamento das variáveis biofísicas e espectrais pelo modelo.

São conhecidos vários estudos no sentido de modelar o processo de interação dos dosséis vegetais com a energia eletromagnética dos quais surgiram alguns modelos de reflectância espectral da vegetação. Goel (1987), em sua revisão

da literatura sobre modelos de reflectância de dosséis vegetais, classificou-os em quatro grupos, segundo seus fundamentos: modelos geométricos, modelos de meio túrbido, modelos híbridos e modelos de simulação por computador.

O presente trabalho enfoca o desenvolvimento do modelo SAIL-*Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves* (Verhoef, 1984), pertencente ao grupo dos modelos de meio túrbido, os quais são baseados na teoria da transferência radiativa e que, a partir de evoluções com quatro parâmetros da teoria K-M, de Kubelka e Munk (1931), citados por Allen e Richardson (1968), ou teoria K-M, foi aplicada para o caso de dosséis vegetais.

DESENVOLVIMENTO

Os modelos de meio túrbido descrevem a transferência radiativa dentro de massas de elementos vegetais, através da decomposição da energia incidente pelos mecanismos de espalhamento e absorção do dossel. Esses modelos foram sucessivamente melhorados (Allen e Richardson, 1968; Allen *et al.*, 1970; Suits, 1972; Verhoef, 1984), evoluindo no sentido de descrever o dossel de modo cada vez mais realístico. Este histórico resume as principais evoluções e aplicações desses modelos, desde a teoria K-M até o modelo SAIL.

O MODELO AGR

A teoria de Kubelka e Munk (1931), ou K-M, citada por Allen e Richardson (1968) é uma representação teórica, por intermédio de dois parâmetros (coeficientes k de extinção, ou absorção, e s , de espalhamento), da propagação da luz num meio difusor. Allen e Richardson (1968) procuraram estabelecer até que ponto dois parâmetros podem determinar a reflectância e a transmitância

de um sistema de folhas. Admitiram eles que o dossel fosse lateralmente infinito. No sentido vertical foi considerada uma dimensão finita (n) correspondente ao Índice de Área Foliar (IAF) acumulado, medido do topo do dossel (onde $n=0$) ao solo, onde n é igual ao IAF total, cujo símbolo é N ($n=N$). A teoria K-M é baseada nas seguintes equações diferenciais, cujos termos estão representados no diagrama esquemático da **Figura 2**:

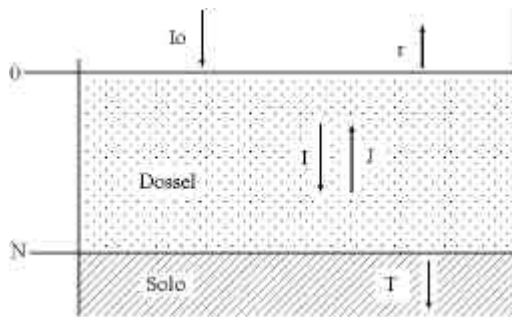


Figura 2 - Diagrama esquemático de um dossel vegetal e dos parâmetros da teoria Kubelka-Munk. (Adaptada de Allen e Richardson, 1968).

A Figura 2 representa o esquema geral dos modelos de meio túrbido. O meio é composto de uma quantidade (n) de elementos com distribuídos em arranjo espacial, com propriedades espectrais definidas em coeficientes de absorção e espalhamento (s e k). Através desses elementos, a energia radiante é decompõe-se nos seus fluxos descendentes (I) e ascendentes (J). Subjacente ao meio túrbido, encontra-se o solo.

$$\partial I = -(k+s) \cdot I \partial n + s \cdot J \partial n \quad (1)$$

$$\partial J = +(k+s) \cdot J \partial n + s \cdot I \partial n \quad (2)$$

O plano $n=0$ é a superfície iluminada do dossel e o plano $n=N$ é a superfície do solo, cuja reflectância será referida como r_g . Se I for a unidade, o fluxo

refletido (r) é designado reflectância e o transmitido (T), transmitância. Definem-se as relações:

$$I(n)=I \quad \text{e} \quad J(n)=r \quad (3)$$

quando $n=0$, e

$$I(n)=T \quad \text{e} \quad J(n)=r_g \cdot I(n) \quad (4)$$

quando $n=N$.

Resolvendo a equação (2) para I , e substituindo na equação (1), obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$\partial^2 J / \partial n^2 - a^2 J = 0 \quad (5)$$

$$\partial^2 I / \partial n^2 - a^2 I = 0 \quad (6)$$

A equação (6) foi estabelecida por analogia à equação (5). A constante a em (5) e em (6) é dada pela relação:

$$a^2 = k \cdot (k + 2s) \quad (7)$$

Resolvendo (5) e (6) e impondo as condições de contorno expressas em (3) e (4), obtêm-se as representações dos dois parâmetros (s e k) do fluxo relativo de luz no dossel. O fluxo refletido (r) e o transmitido (T) pelo dossel podem ser obtidos fazendo-se $n=0$ e $n=N$, respectivamente, o que resulta nas relações:

$$r = J(N, 0, r_g) \quad (8)$$

$$T = I(N, N, r_g) \quad (9)$$

A determinação da reflectância e da transmitância com dois parâmetros foi baseada em duas hipóteses simplificadoras: absorvância nula ou espalhamento nulo. No primeiro caso, com k tendendo a zero (num meio não absorvente) e N constante, J e I são lineares relativamente a n . A quantidade $J-I$, segundo a teoria K-M, para tal meio é independente de n , e dada por:

$$J - I = -(I - s \cdot N) - I + (T \cdot N^2 \cdot \mathbf{r}_g / (I - \mathbf{r}_g \cdot r)) \quad (10)$$

A reflectância e a transmitância de um dossel não absorvente podem ser obtidas, ainda, fazendo $n=0$ e $n=N$. Daí:

$$r = s \cdot N / (I + s \cdot N) \quad (11)$$

$$T = I / (I + s \cdot N) \quad (12)$$

Para verificar o segundo caso, de espalhamento nulo e absorvância finita, basta fazer $s=0$, o que resulta em:

$$J = \mathbf{r}_g \cdot \exp(-k(2 \cdot N - n)) \quad (13)$$

$$I = I_o \cdot \exp(-k \cdot n) \quad (14)$$

Estas duas equações descrevem a reflectância do solo subjacente, quando atenuada por um meio absorvente.

A teoria K-M mostrou larga aplicabilidade para a descrição da interação da luz com o dossel. Porém, ela só é exata com luz perfeitamente isotrópica num meio difusor ideal. A teoria não considera a variação do albedo do dossel em função do ângulo zenital solar f_s (Allen *et al.*, 1970). Ela é aplicável, portanto, dentro do dossel, após toda luz direta (ou especular) ser difundida. Quando um dossel é iluminado por luz direta, a teoria K-M deve ser generalizada de modo a levar em conta os ângulos solares, a orientação de folhas, e outros atributos da situação física. O sistema de equações de Duntley (1942), citado por Allen *et al.* (1970), é uma generalização da teoria K-M para cinco parâmetros, melhorando o ajuste entre a teoria e a experimentação. O uso de cinco parâmetros permite incluir orientação das folhas, ângulos solares e mais um atributo da planta, todos independentes entre si. Allen *et al.* (1970) demonstraram que as equações de Duntley podem, ainda, determinar a reflectância do dossel em função do ângulo solar, sob um sistema de equações que ficou conhecido

como modelo AGR (*Allen, Gayle e Richardson*). A teoria de Duntley é baseada nas equações diferenciais

$$\partial I'n / \partial n = -(\mathbf{m} + B' + F') \cdot I'n \quad (15)$$

$$\partial t / \partial n = F' I'n - \mathbf{m} \cdot t - B \cdot t + B \cdot s \quad (16)$$

$$-\partial s / \partial n = B' I'n - \mathbf{m} \cdot s - B \cdot s + B \cdot t \quad (17)$$

Onde \mathbf{m} , B e F são os coeficientes de absorção, retrodifusão e difusão, respectivamente, e \mathbf{m} , B' e F' seus correspondentes para fluxo especular, assim como I' é a fração especular de I . A solução da equação (15):

$$I'n = I'_o \cdot \exp(-q' \cdot n) \quad (18)$$

onde I'_o é a fração especular do fluxo incidente no topo do dossel e

$$q' = (\mathbf{m} + B' + F') \quad (19)$$

Algumas relações são consideravelmente simplificadas no caso especial de absorção desprezível, aplicável a folhas na região espectral de 1000nm. O balanço da radiação, neste caso, é independente de n . As equações generalizadas de Duntley permitem calcular a irradiância dentro de um dossel sobre solos com diferentes reflectâncias, supondo-se que a luz direta incidente no solo seja refletida como luz difusa. A atenuação da luz direta através de um dossel pode ser caracterizada pela relação

$$I' = I'_o \cdot \exp(-q' \cdot n \cdot \sec \theta_s) \quad (20)$$

Segundo Allen *et al.* (1970), um bom planejamento de métodos para a determinação dos parâmetros de Duntley (\mathbf{m} , B' e F') de um dossel deve se apoiar em medições dos fluxos ascendentes e descendentes no interior do dossel.

Este modelo consiste em uma única camada de componentes de dossel distribuídos aleatoriamente e não considera mudanças direcionais da reflectância em função do ângulo de observação.

O MODELO SUITS

O modelo de Suits (1972) é uma extensão do modelo anterior e consiste num número de camadas de dossel horizontalmente infinitas, cujos componentes são idealizados como combinações de painéis planos, orientados vertical e horizontalmente, com reflexão e de transmissão difusas (r_h e t_h). As projeções horizontais e verticais de cada componente de dossel podem ser determinadas a partir de medições físicas de plantas representativas (**Figura 3**).

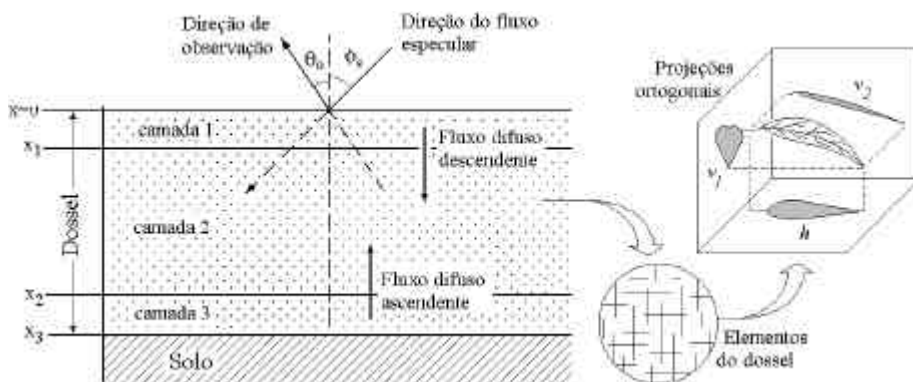


Figura 3 - Diagrama esquemático de um dossel vegetal no modelo Suits.

Como no modelo anterior, o fluxo radiante que interage com o dossel é dividido em direto (ou especular) e difuso. A densidade de fluxo difuso é, por sua vez, dividido em ascendente e descendente.

Como cada camada tem diferentes propriedades, a identificação da camada deve ser explicitada como índices nos símbolos das variáveis. Por exemplo,

$E(+d, i, x)$ representa o fluxo difuso ascendente na i -ésima camada e na altura x . As equações para os fluxos em cada camada são semelhantes às do modelo de Allen *et al.* (1970), de uma só camada:

$$\partial E(+d, i, x) / \partial x = -a_i E(+d, i, x) + b_i E(-d, i, x) + c_i E(s, i, x) \quad (21)$$

$$\partial E(-d, i, x) / \partial x = a_i E(-d, i, x) - b_i E(+d, i, x) - c'_i E(s, i, x) \quad (22)$$

$$\partial E(s, i, x) / \partial x = k'_i E(s, i, x) \quad (23)$$

Os coeficientes a , b , c , c' e k' são calculados a partir de medidas dos componentes do dossel (respectivamente, \mathbf{s}_h e \mathbf{s}_v as médias de área de projeções horizontal e vertical, n_h e n_v , os números médios de componentes horizontais e verticais por volume) em cada camada e do ângulo zenital de incidência do fluxo especular (\mathbf{q}_s), por meio das relações:

$$a = \mathbf{s}_h \cdot n_h \cdot (1 - \mathbf{t}_h) + \mathbf{s}_v \cdot n_v \cdot (1 - (\mathbf{r}_h + \mathbf{t}_h) / 2) \quad (24)$$

$$b = \mathbf{s}_h \cdot n_h \cdot \mathbf{r}_h + \mathbf{s}_v \cdot n_v \cdot (\mathbf{r}_h / 2 + \mathbf{t}_h / 2) \quad (25)$$

$$c = \mathbf{s}_h \cdot n_h \cdot \mathbf{r}_h + 2/p \cdot \mathbf{s}_v \cdot n_v \cdot (\mathbf{r}_h / 2 + \mathbf{t}_h / 2) \cdot \tan \mathbf{q}_s \quad (26)$$

$$c' = \mathbf{s}_h \cdot n_h \cdot \mathbf{t}_h + 2/p \cdot \mathbf{s}_v \cdot n_v \cdot (\mathbf{r}_h / 2 + \mathbf{t}_h / 2) \cdot \tan \mathbf{q}_s \quad (27)$$

$$k = \mathbf{s}_h \cdot n_h + 2/p \cdot \mathbf{s}_v \cdot n_v \cdot \tan \mathbf{q}_s \quad (28)$$

As condições de contorno estabelecem que o fluxo descendente, no topo da primeira camada ($x=0$), deva ser unicamente especular. Elas estabelecem também que os fluxos ascendente e descendente sejam contínuos na interface das camadas. No nível do solo, as exigências são de que todo o fluxo descendente que nele incida seja refletido, resultando em fluxo difuso ascendente. A prática corrente consistia em calcular a reflectância hemisférica do dossel, fazendo uma relação entre os fluxos ascendente e descendente no topo do dossel, o que equívale a considerar o fluxo difuso como isotrópico dentro do dossel. Ou seja, a reflectância do dossel deveria ser lambertiana, o que não ocorre. Assim, foi necessário considerar o caráter bidirecional da reflectância, o que requer a

determinação da radiância do dossel. A radiância (L) esperada dos componentes pode ser calculada a partir das equações (21), (22) e (23) em qualquer nível (x) particular do dossel:

$$\partial L \partial x = (u \cdot E(+d) + v \cdot E(-d) + w' \cdot E(s)) / p \quad (29)$$

onde

$$u = \mathbf{s}_h \cdot \mathbf{n}_h \cdot \mathbf{t}_h + \mathbf{s}_v \cdot \mathbf{n}_v \cdot (\mathbf{r}_h/2 + \mathbf{t}_h/2) \cdot 2/p \cdot \tan \mathbf{f}_v \quad (30)$$

$$v = \mathbf{s}_h \cdot \mathbf{n}_h \cdot \mathbf{r}_h + \mathbf{s}_v \cdot \mathbf{n}_v \cdot (\mathbf{r}_h/2 + \mathbf{t}_h/2) \cdot 2/p \cdot \tan \mathbf{f}_v \quad (31)$$

$$w' = \mathbf{s}_h \cdot \mathbf{n}_h \cdot \mathbf{r}_h + \mathbf{s}_v \cdot \mathbf{n}_v \cdot \tan \mathbf{q}_s \cdot \tan \mathbf{f}_v \cdot ((\sin \mathbf{y} / (p - \mathbf{y}) \cdot \cos \mathbf{y}) \cdot \mathbf{r}_h + (\sin \mathbf{y} - \mathbf{y} \cdot \cos \mathbf{y}) \cdot \mathbf{t}_h) / 2p \quad (32)$$

O fator \mathbf{y} foi introduzido como a diferença azimutal dos ângulos de observação (\mathbf{j}_o) e iluminação (\mathbf{j}_s). A fração $p_v(\mathbf{f}_v, x)$ dos componentes que podem ser vistos à profundidade x , do ângulo de observação \mathbf{f}_v , é dada por:

$$\partial p_v(z_v) / \partial x = k \cdot p_v(\mathbf{f}_v) \quad (33)$$

A radiância pode ser calculada somando-se as contribuições para a radiância através do dossel, e adicionando-se a radiância do solo, tudo relativamente às frações p_v de cada componente, como vistas da posição do observador.

$$L = \int_{-n}^0 p_v(z_v, x) (u \cdot E(+d) + v \cdot E(-d) + w' \cdot E(s)) \partial x / p + p_v(\mathbf{f}_v, x) (\mathbf{r}_g \cdot E(-d) + E(s)) / p \quad (34)$$

Chance e LeMaster (1977) desdobraram o modelo de Suits em três condições de uso:

Modelo I: modelo em camadas de Suits, cujas condições iniciais são quatro:

$$1) E(s, 1, 0) = 1 \quad (35)$$

$$2) E(-d, 1, 0) = 0 \quad (36)$$

3) continuidade do fluxo na interface das camadas

$$4) E(+d, 1, N) = \mathbf{r}_g \cdot (E(-d, i, N) + E(s, i, N)) \quad (37)$$

Modelo II: modelo de camada infinita de Suits; para dosséis densos, em que todo o fluxo descendente é refletido ou absorvido de modo que a chamada espessura infinita (espessura do dossel na qual os mecanismos de interação com o fluxo estejam saturados) tenha sido atingida. As condições iniciais e de contorno são:

$$1) E(-d,1,0)=0 \quad (38)$$

$$2) E(s,1,0)=1 \quad (39)$$

$$3) E(-d,1,x \rightarrow +\infty)=0 \quad (40)$$

Modelo III: modelo combinado de Suits. Os dois modelos anteriores são combinados para constituir um modelo de 2 camadas, sendo a primeira a superfície altamente reflexiva do dossel e a segunda suficientemente profunda para se atingir a profundidade óptica infinita das duas camadas. As condições são:

$$1) E(s,1,0)=1 \quad (41)$$

$$2) E(-d,1,0)=0 \quad (42)$$

3) continuidade entre as camadas 1 e 2

$$4) E(+d,2,x \rightarrow +\infty)=r_g \quad (43)$$

Pode-se modificar a suposição de ausência de luz difusa (condições 1 e 2) que se aplica aos três modelos para melhor representar as condições reais de iluminação. Denotam-se assim as frações difusa e especular por f_d e f_s , respectivamente, modificando-se as duas condições para:

$$1) E(s,1,0)=f_s \quad (44)$$

$$2) E(-d,1,0)=f_d \quad (45)$$

Define-se a profundidade óptica infinita de dossel neste modelo (x_{∞}), a um dado comprimento de onda, como sendo a menor profundidade na qual a reflectância obtida pelo modelo de uma camada de Suits de profundidade x está

dentro de 5% em torno da reflectância obtida pelo modelo de camada infinita. A profundidade infinita tem o seguinte significado físico: maiores profundidades de dossel produzem apenas insignificantes alterações na reflectância. Assim esta profundidade infinita é uma medida do limite superior de IAF acima do qual ele não afeta a reflectância do dossel.

Nos resultados desse trabalho, o x_{y} para algodão variou de zero (a 690nm) até um IAF de 6,24 (a 1050nm). Quando x_{y} é nulo significa que a reflectância do dossel infinito se assemelha à do solo. Outros dados obtidos para trigo indicam que essas reflectâncias se assemelham entre 650nm e 700nm, sugerindo que, em geral, a reflectância do dossel nessa região pode ser uma boa estimativa da r_g .

Allen e Richardson (1968) já haviam observado fenômeno análogo, quando empilharam folhas de algodão na abertura do radiômetro: a reflectância parou de variar com duas folhas na região do visível, e com oito na região do infravermelho próximo. Pelo modelo de Suits, isso ocorreria com duas folhas para o visível e com seis para o infravermelho próximo.

Chance e LeMaster (1977) simularam dois dosséis, um de camada única de 50cm e outro com duas camadas de 25cm, sendo a segunda camada com folhas mais reflexivas. Observaram que as curvas de reflectância só se distinguem no infravermelho próximo, o que demonstra que a reflectância no visível deve-se às folhas próximas à superfície do dossel, enquanto o infravermelho sofre efeitos do comportamento espectral de camadas inferiores. Portanto, esse modelo pode ser usado para se ter uma avaliação qualitativa da filtragem seletiva da luz exibida pelos dosséis.

Em outro estudo, Chance e LeMaster (1978) apresentaram uma extensão do modelo de Suits para o cálculo da absorção do fluxo pelo dossel. Isso é possível sem a necessidade de adicionar qualquer parâmetro além dos já existentes no modelo. Partindo das equações (21), (22) e (23), estabeleceram outras relações:

Seja $A(x)$ a quantidade acumulada de energia por área, absorvida, desde a superfície do dossel até uma camada horizontal, na profundidade x . Assim, $A(x+\Delta x)-A(x)$ é a energia total absorvida numa camada i que vai da profundidade x até $x+\Delta x$. A energia que entra nessa região,

$$\partial E(s,i,x)+E(-d,i,x)+E(+d,i,x+\partial x) \tag{46}$$

e a que sai,

$$\partial E(d,i,x)+E(d,i,x+\partial x)+E(s,i,x+\partial x) \tag{47}$$

portanto,

$$\begin{aligned} (A(x+\partial x)-A(x))/\partial x &= (E(d,i,x+\partial x)-E(+d,i,x))/\partial x + \\ &- (E(-d,i,x+\partial x)-E(-d,i,x))/\partial x \\ &- (E(s,i,x+\partial x)-E(s,i,x))/\partial x \end{aligned} \tag{48}$$

de modo que, no limite em que ∂x se aproxima de zero,

$$\partial A/\partial x = (\partial E(d,i,x)/\partial x - \partial E(-d,i,x)/\partial x) - \partial E(s,i,x)/\partial x \tag{49}$$

Deve-se ressaltar que a equação (49) tem validade apenas para o interior daquela camada i . A expressão $\partial A(x)/\Delta x$ não é válida nos limites da camada. As condições para se resolver a equação (49) são:

$$A(0)=0 \tag{50}$$

e, se x_i é um limite entre camadas,

$$\begin{aligned} \lim A(x) &= A(x_i) \\ x_+ &\rightarrow x_i \end{aligned} \tag{51}$$

Assim, definindo $A(x_i)$, fica assegurada a continuidade da solução através dos limites entre as camadas. A solução da equação (49) é a relação básica do modelo de absorção da luz, dada por:

$$A(x) = E(+d, i, x) - E(-d, i, x) - E(s, i, x) - E(+d, l, 0) + E(-d, l, 0) + E(s, l, 0) \quad (52)$$

Observa-se que os três primeiros termos são o fluxo líquido ascendente, na altura x do dossel, enquanto os últimos são o fluxo ascendente na superfície do dossel. Chance e LeMaster (1978) determinaram o limite superior de absorção por um dossel, visto que a absorção cresce assintoticamente com o IAF verde. Procederam a uma comparação do modelo de absorção com dados experimentais obtendo boa concordância.

Baret (1988) desenvolveu um modelo teórico simplificado de absorção por um dossel, também baseado no modelo de Suits. Explorando as relações teóricas estabelecidas naquele modelo, chegou a um modelo da absorção de luz pelo dossel em função do comportamento dos FRBD. Baret (1988) testou seu modelo e os resultados simulados mostraram-se coerentes com os resultados de modelos analíticos mais complexos.

LeMaster *et al.* (1980) executaram um trabalho no sentido de avaliar o desempenho do modelo de Suits bem como para levantar parâmetros para o trigo, tomando dados semanais durante o crescimento da cultura. Fazendo um controle das características espectrais dos componentes isolados do dossel, foi visto que estes se mantiveram razoavelmente constantes (com intervalo de variação de 10%) para a maior parte do ciclo. A aplicação do modelo mostrou-se razoável para várias condições da cultura, mas a concordância foi sempre pior no início e no final do ciclo, devido à descontinuidade do dossel nessas fases.

O MODELO SAIL

O modelo SAIL (Verhoef, 1984) visa melhorar a resposta angular do modelo de Suits e suas variantes, calculando seus coeficientes a partir do índice de área

foliar total e de uma função de Distribuição Angular de Folhas (DAF). Assim, o modelo de Suits passa a ser um caso especial do modelo SAIL, considerando-se um dossel extremófilo (folhas horizontais e verticais apenas).

A distribuição angular de folhas é uma função da densidade probabilística de orientação $g(\mathbf{q}_l, \mathbf{j}_l)$, onde \mathbf{q}_l e \mathbf{j}_l são os ângulos zenital e azimutal, respectivamente, da normal à superfície superior das folhas. Além da DAF, o único outro parâmetro que descreve a morfologia do dossel é o IAF. O modelo integra a contribuição de cada classe de inclinação foliar nos fatores de espalhamento e extinção de cada camada. Isso torna a representação bem mais realista. O fato é que cada inclinação de folha gera um padrão espacial de interceptação e espalhamento da luz, não passível de ser reproduzido através da média ponderada dos padrões associados a folhas horizontais e verticais (**Figura 4**). Cada classe angular de um elemento de dossel resulta num sistema de vetores em que são considerados as direções de observação ($\mathbf{q}_o, \mathbf{j}_o$) e iluminação ($\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s$). O cálculo é simplificado pela adoção do ângulo \mathbf{y} como a diferença de azimute entre esses dois vetores.

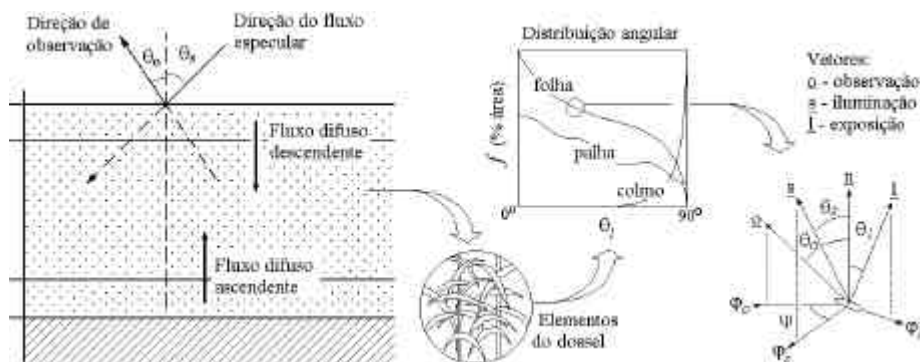


Figura 4 - Diagrama esquemático de um dossel vegetal no modelo SAIL.

Cálculos comparativos mostram que, nos perfis de reflectância bidirecional em função dos ângulos de observação, a descontinuidade no ponto nadir, presente nos resultados do modelo de Suits, não ocorrem no SAIL. As maiores diferenças entre os dois modelos ocorrem com iluminação a zênite ou a ângulos zenitais de observação menores que 45° . Badhwar *et al.* (1985) compararam os resultados dos modelos SAIL e Suits em dosséis de soja e milho, sob diversos ângulos de observação, com as reflectâncias medidas. O ajuste foi fraco para os dois modelos, sendo pior para o de Suits. Ambos os modelos apresentaram intervalo de variação dos resultados menores do que os resultados experimentais, tendendo a superestimar os FRBD pequenos e a subestimar os grandes.

EXPERIMENTOS COM MODELAGEM SAIL

Para verificar se diferenças entre resultados e modelo poderiam ser explicadas por mudança de alguns parâmetros, Badhwar *et al.* (1985) fizeram uma análise de sensibilidade para o modelo SAIL. Simularam variações, uma de cada vez, de reflectância e transmitância de folha (r_h e t_h , respectivamente), além dos parâmetros DAF, f_s , r_g e IAF dentro de limites razoáveis. Observaram que nenhuma mudança sistemática desses parâmetros poderia explicar as diferenças encontradas. Mudanças na f_s por um fator igual a 2 produziram mudanças calculadas menores que 0,5% no resultado. Igualmente, mudando-se a r_g em 50%, a reflectância mudou em menos que 1%. Em Valeriano (1992), simulações da variação de r_g também resultaram em modificações sutis, restritos à condição de pequenos IAF. Mudanças na reflectância e transmitância das folhas alteraram a reflectância calculada em 30%, causando mudanças lineares na reflectância do dossel (Badhwar *et al.*, 1985; Valeriano, 1992). A DAF e a

geometria de observação causaram mudanças sistemáticas na reflectância, mas não alteraram o comportamento da diferença relativa entre a reflectância calculada e a medida.

Uma análise de dados sobre soja, usando o SAIL (Goel e Thompson, 1984) mostrou que o desempenho no infravermelho próximo poderia ser melhorado se o IAF e a DAF fossem alterados. De qualquer modo, o melhor ajuste foi obtido quando a DAF foi considerada como sendo uma função delta de Dirac centrada no ângulo médio da distribuição observada. Foi observado empiricamente que, quando o IAF foi aumentado na proporção entre a largura do dossel e o espaçamento entre linhas (o que corresponde a um fator em torno de 1,14) e a DAF substituída pela função delta, os resultados do modelo tiveram o melhor ajuste aos dados experimentais. O aumento do IAF se justifica (erros de amostragem e o tipo de dossel, em linha), mas a melhoria advinda da concentração da DAF não encontrou justificativa experimental.

Goel e Deering (1985) apresentaram uma técnica de inversão do modelo SAIL, que foi aplicada para determinação do IAF para soja e para uma cobertura de gramínea. Nessa técnica, é feito inicialmente um ajuste entre as reflectâncias medidas e as do modelo. As medidas têm que abranger um número razoável de direções de observação/iluminação. Para minimizar o número de parâmetros desconhecidos no modelo, supuseram que o dossel fosse constituído somente por folhas. Baseados nas medidas de FRBD, variaram os valores de IAF de modo a se atingir o menor desvio modelo-medida e mantiveram fixos os valores dos demais parâmetros. As estimativas obtidas dessa forma mostraram-se muito boas e para a cobertura de gramínea, quando uniforme, e para a soja. Para a cobertura incompleta de gramínea, a estimativa foi razoável apenas quando se

restringiram os ângulos zenitais solares a no máximo 50°. Isso indica a aplicabilidade da inversão do modelo SAIL na estimativa do IAF de dosséis uniformes.

Em geral, são usados conjuntos separados de parâmetros biofísicos e espectrais para cada componente do dossel, o que não pode ser feito com essa técnica. Os valores de cada parâmetro obtido pela inversão do modelo vêm a ser, portanto, as médias dos valores isolados realmente exibidos pelos vários componentes do dossel.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho advém da dissertação de mestrado do autor “Reflectância espectral do trigo irrigado (*Triticum aestivum*, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL”, desenvolvida com bolsa de estudo da CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, W. A.; RICHARDSON, A. J. (1968). Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, v.58, n.8, p.1023-1028.
- ALLEN, W. A.; GAYLE, T. V.; RICHARDSON, A. J. (1970). Plant-canopy irradiance specified by the Duntley equations. *Journal of the Optical Society of America*, v.60, n.3, p.372-376.
- BADHWAR, G. D.; VERHOEF, W.; BUNNIK, N. J. J. (1985). Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment*, v.17, n.2, p.179-195.
- BARET, F. (1988). Un modele simplifie de reflectance et d'absorptance d'un couvert vegetal. *Coll. Int. Signatures Spectrales d'objects en télédétection*. Bordeaux, 4, 18-22.

- CHANCE, J., E.; LEMASTER, E., W. (1977). Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests. *Applied Optics*, v.16, n.2, p.407-412.
- CHANCE, J., E.; LEMASTER, E., W. (1978). Plant canopy light absorption model with application to wheat, *Applied Optics*. v.17, n.16, p.2629-2636.
- GOEL, N. S. (1987). Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, v.3. 212p.
- GOEL, N. S.; DEERING D. W. (1985). Evaluation of a canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.23, n.5, p.674-684.
- GOEL, N., S.; THOMPSON, R., L. (1984). Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. Estimation of leaf angle using measured canopy reflectances. *Remote Sensing of Environment*, v.16, n.1, p.69-85.
- LEMASTER, E., W.; CHANCE, J., E.; WIEGAND, C., L. (1980). Seasonal verification of the Suits spectral reflectance model for wheat. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.46, n.1, p.107-117.
- SUITS, G H. (1972). The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, v.2, n.2, p.117-125.
- VALERIANO, M. M. (1992) Reflectância espectral do trigo irrigado (*Triticum aestivum*, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 127p.
- VERHOEF, W. (1984). Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, v.16, n.2, p.125-141.

