

# Avaliação dos Modelos Suits e Sail no Estudo da Reflectância da Soja (Glycine max (L.) Merrill)

MAURO A. HOMEM ANTUNES<sup>1</sup>  
GETÚLIO TEIXEIRA BATISTA<sup>1</sup>  
EDUARDO DELGADO ASSAD<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515  
12201-970 - São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>2</sup>EMBRAPA/CPAC-Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária  
Caixa Postal 700023  
73.300 - Planaltina, DF, Brasil

**Abstract.** The radiative transfer model applied to the spectral behavior of the agricultural crop canopy studies, consist of an aid-efficient instrument to carry out the use of remote sensing techniques for agriculture. In this work SUITS and SAIL canopy reflectance models performance was evaluated, based on the comparison between calculated and measured Bidirectional Reflectance Factor (FRB) for a soybean (Glycine max (L.) Merrill) canopy. According to this research, it was concluded that: a) both models had a good performance, mainly in red and near infrared wavelengths from 740 nm to 861 nm spectral range; b) SUITS and SAIL models had similar tendencies, but SAIL model performance was better than SUITS model; c) through sensibility analysis it was found that both models do not depend on the canopy vertical density, and a good precision in the input data for SAIL model, namely angular distribution and spectral proprieties of leaves, is needed to obtain a good performance in the FRB simulation.

## Introdução

Os modelos de transferência radiativa (TR) para simulação da reflectância são ferramentas úteis para a determinação de variáveis agronômicas e biofísicas do dossel através de inversão (Goel e Strebel, 1983), e para a realização de experimentos computacionais para a avaliação das relações das variáveis biofísicas do dossel com suas propriedades espectrais. Entretanto é necessário que estes modelos sejam primeiramente validados

sob diversas condições reais de campo, através da radiometria de campo, em que o equipamento é colocado a uma pequena distância do alvo e as variáveis que influenciam as propriedades ópticas do alvo em estudo são mais facilmente controladas.

Colwell (1974) menciona que os fatores que influenciam a reflectância de um dossel de vegetação são a reflectância e transmitância hemisférica das folhas (REF e TRANS), área foliar, orientação das folhas,

REF e TRANS das estruturas de suporte (hastes, troncos, galhos, pecíolos), reflectância do material subjacente (solo e folhas senescidas), ângulos zenitais do sol e de visada e ângulo azimutal. Assim, os modelos SUITS e SAIL levam em consideração estes fatores, e também o fluxo difuso, e consideram o dossel como sendo um meio turbido e unidimensional, composto de uma ou mais camadas (planos paralelos) infinitamente extensas e uniformes na horizontal, com um ou mais componentes aleatoriamente distribuídos nas camadas.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos de transferência radiativa SUITS e SAIL para a simulação do FRB (fator de reflectância bidirecional, conforme Nicodemus et al., 1977) de uma cultura de soja.

### Descrição dos modelos

O modelo SUITS foi descrito por Suits (1972), sendo uma extensão do modelo AGR (Allen et al., 1970) para a inclusão da característica não Lambertiana através da dependência do FRB em relação aos componentes verticais do dossel.

Conforme Suits (1972) para uma dada posição  $x$  no eixo vertical em uma camada, o fluxos difusos ascendente  $E_+$  e descendente  $E_-$  e o fluxo especular  $E_s$  são dados por (caráter espectral implícito):

$$\begin{aligned} dE_+/dx &= -a.E_+ + b.E_- + c.E_s; \\ dE_-/dx &= a.E_- - b.E_+ - c'.E_s \\ dE_s/dx &= k.E_s \end{aligned}$$

A radiância da camada ( $L_c$ ) e acima do dossel relativo a uma camada é definida pelas

equações (Suits, 1972):

$$\Delta L_c = [u.E_+/\pi + v.E_-/\pi + w.E_s/\pi] \Delta x; \\ L = \text{EXP}(Kx) L_c.$$

Para o cálculo dos coeficientes os componentes são projetados no plano horizontal e em dois planos verticais perpendiculares entre si, e suas propriedades espectrais (REF e TRANS) são tomadas em laboratório. Estes coeficientes são determinados para as diversas camadas, e no caso de haver mais do que um tipo de componente, deve-se calcular os coeficientes separadamente para cada componente e somá-los para encontrar o coeficiente final da camada.

As equações diferenciais que descrevem os fluxos são resolvidas aplicando-se as condições de contorno, e usando-se os coeficientes calcula-se o fluxo isotrópico dentro de cada infinitesimal camada. Esta radiância isotrópica é utilizada como fonte para se calcular um segundo e mais aproximado valor para a radiância. O processo é repetido iterativamente até que se obtenha uma convergência para um valor, sendo este utilizado para o cálculo da radiância no topo do dossel, somando-se a contribuição das camadas.

O modelo vem sendo testado sucessivamente por Suits (1972), Chance e LeMaster (1977), LeMaster et al. (1980), Verhoef e Bunnik (1981) e Chance e LeMaster (1985), para culturas de milho, trigo, algodão e soja.

Conforme Verhoef (1984) o modelo SAIL ("Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves") é uma extensão do modelo SUITS em que os coeficientes são calculados utilizando-se uma

função de distribuição de ângulos foliares (DAF).

São utilizadas as mesmas equações diferenciais de Suits (1972), com a diferença de que as 2 equações que definem a radiância dentro da camada e fora do dossel, foram reunidas em uma na forma diferencial:

$$dE_0/dx = w.E_s + v.E_- + u.E_+ - K.E_0$$

O SAIL tem sido muito utilizado na literatura, e comparações entre este e o Suits têm sido feitas por Verhoef e Bunnik (1981), Verhoef (1984) e Badhwar et al. (1985), onde os autores têm encontrado uma superioridade do SAIL.

### Metodologia

Foi instalado um experimento na EMBRAPA/CPAC, localizada em Planaltina-D.F., e consistiu de 30 parcelas (5m x 8m), com fileiras em nível orientadas a 60° NO em relação ao Norte Magnético, e espaçamento entre fileiras de 0,5 m. Foram plantadas as variedades Eureka, Savana, Cristalina, Doko e BR 79-31339, semeadas à razão de 20 sementes por metro linear. Cada parcela foi dividida em uma parte destinada às medições radiométricas e outra para coleta de amostras de 1,4 m<sup>2</sup> para determinação do índice de área foliar (IAF) em laboratório. Para este trabalho os parâmetros agrônômicos foram coletados considerando-se apenas uma camada.

A DAF foi calculada em intervalos de ângulos de 0° a 90° através do ajuste de função para a arquitetura observada na fotografia vertical de cada parcela. Conforme Bunnik (1978) estas arquiteturas foliares são

dadas pelas seguintes funções de densidade de probabilidade:

Planófila:  $f' = (2/\pi)(1 + \cos(2\theta_1))$   
Erectófila:  $f' = (2/\pi)(1 - \cos(2\theta_1))$   
Plagiófila:  $f' = (2/\pi)(1 - \cos(4\theta_1))$   
Extremófila:  $f' = (2/\pi)(1 + \cos(4\theta_1))$   
Esférica:  $f' = \text{sen}(\theta_1)$   
Uniforme:  $f' = 2/\pi$

onde  $\theta_1$  é o ângulo foliar.

No caso do Suits a DAF foi utilizada para o cálculo do ângulo médio foliar, utilizado no cálculo da área foliar projetada na horizontal e na vertical.

A REF e TRANS para as simulações dos modelos foram tomadas por Rudorff e Batista (1990) sobre a variedade Clark, medidas com o SPECTRON SE-590 adaptado com uma esfera integradora LICOR 1800-12.

O equipamento usado para as medidas radiométricas de campo foi o espectralradiômetro SPECTRON SE-590, composto de uma unidade controladora, 2 cabeças leitoras, uma com coletor cosseno para medir a irradiância incidente e outra com uma lente objetiva de 15° para medir a radiância do alvo. A faixa de atuação deste equipamento vai de 369,4 nm a 1113,7 nm, dividida em 252 bandas com largura nominal de 2,95 nm e largura real de 8 nm. Neste trabalho utilizou-se 46 bandas entre 514,0 nm e 918,6 nm, devido a problemas no equipamento constatados por Rudorff e Batista (1990). Como referência foi utilizada uma placa de sulfato de bário calibrada em relação a um padrão de laboratório.

As medições foram quase sempre realizadas na parte da manhã a partir das 9 horas, com as 2 cabeças leitoras do SPECTRON SE-590 fixadas sobre

um mastro de elevação de 3 m de altura, totalizando 193 medições em 12 campanhas radiométricas. Para se ter uma maior representatividade dos dados radiométricos quando ainda se tinha a estrutura de fileiras, foram realizados pares de medidas sobre e entre as fileiras (Daughtry et al., 1982).

O FRB foi obtido utilizando-se a metodologia de Duggin (1980):

$$FRB = \frac{L(\text{alvo})}{E} * C * F$$

onde:

L (alvo) = radiância refletida pelo alvo na direção do sensor;

E = irradiância solar no instante da medida, medida pelo coletor coseno;

C = fator de calibração entre as duas cabeças leitoras;

F = fator de calibração da placa de sulfato de bário.

O ângulo zenital de visada foi sempre 0° e o ângulo zenital solar foi obtido para cada parcela relativo ao momento da medida radiométrica. No início e no final das campanhas radiométricas foram tomados o FRB do solo e a medida do fluxo difuso, para serem utilizados nas simulações pelos modelos.

A comparação entre os dois modelos se deu através dos erros (FRB medido menos FRB calculado), percentagem de erro em relação ao medido, raiz do erro percentual médio quadrático (%rmse), análise da regressão entre FRB calculado e FRB medido e, teste "t".

### Resultados E Discussão

Na Figura 1 pode-se observar um exemplo de curva do FRB<sub>n</sub>

(FRB espectral) medido e o calculado pelos dois modelos. Para esta parcela os modelos subestimaram o FRB<sub>n</sub> no visível e que no infravermelho próximo (IVP) superestimaram. Esta tendência foi observada para todas parcelas na campanha de 10/02/90.

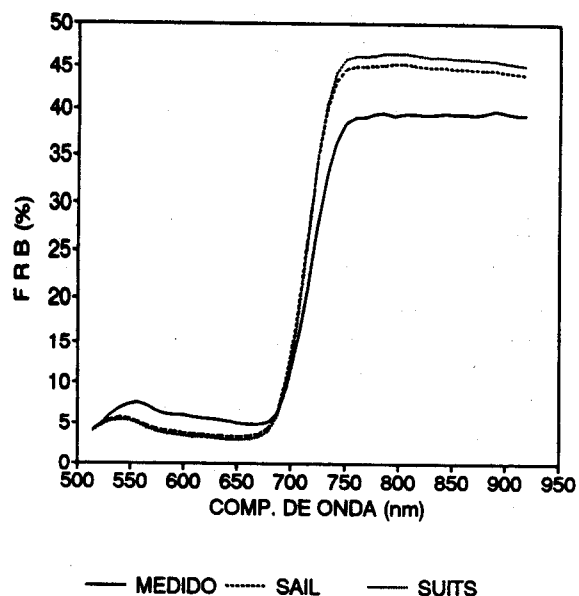


Figura 1 - Espectro medido e calculado pelos modelos SUITS e SAIL.

Na Tabela 1 estão os resultados em termos da média e desvio padrão das 193 regressões realizadas entre o medido e o calculado para cada parcela utilizando-se os 46 comprimentos de onda de 514,0 nm a 918,6 nm. Observa-se que na média as regressões estão bem próximas dos valores ideais, ou seja, intercepto próximo de zero e inclinação e coeficiente de determinação da reta ( $r^2$ ) próximos da unidade, sendo estes resultados considerados bons. Para 17 campanhas radiométricas durante todo o ciclo de duas variedades de trigo, LeMaster et al. (1980) encontraram um  $r^2$  médio de 0,88 para as regressões entre cada curva espectral medida e calculada.

**TABELA 1 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO INTERCEPTO, DA INCLINAÇÃO E DO  $r^2$  PARA AS 193 REGRESSÕES ENTRE FRB MEDIDO E CALCULADO PELOS MODELOS SUITS E SAIL. CADA REGRESSÃO FOI REALIZADA POR PARCELA COM OS 46 COMPRIMENTOS DE ONDA.**

	MODELO SUITS		MODELO SAIL	
	MÉDIA	DV. PAD.	MÉDIA	DV. PAD.
INTERCEPTO	-0,3891	1,9202	-0,0680	1,7258
INCLINAÇÃO	1,0680	0,1677	1,0379	0,1477
$r^2$	0,9908	0,0042	0,9894	0,0046

Neste tipo de análise de regressão verificou-se que o modelo SUITS teve um desempenho semelhante ao SAIL, e permitiu concluir que ambos modelos tiveram um bom desempenho ao aproximar a curva espectral calculada com aquela obtida através das medidas de campo.

Para o comprimento de onda (CO) de 547,5 nm, localizado no centro da faixa do verde, observa-se na Figura 2 que o SUITS e o SAIL subestimaram o FRB do dossel para a grande maioria das parcelas, com baixos valores de média e desvio padrão dos erros. Entretanto, apesar dos baixos valores dos erros, verificou-se que a média e o desvio padrão dos erros do SAIL foram de 15,80 e 13,87 respectivamente, devido aos baixos valores de FRB medido e calculado.

Na Figura 3 observa-se que para o CO de 652,5 nm (centro da faixa do vermelho) grande parte dos valores do FRB medido e calculado localizam-se na faixa de aproximadamente 2 e 3%. Os demais valores fora desta amplitude são da campanha radiométrica de 10/02/90, quando havia uma contribuição maior de solo exposto em relação às demais campanhas. Apesar de o aumento no FRB calculado não ser da mesma

grandeza do que ocorreu no medido, este aumento concomitante possibilitou a obtenção de um coeficiente de determinação da reta de regressão alto (0,77).

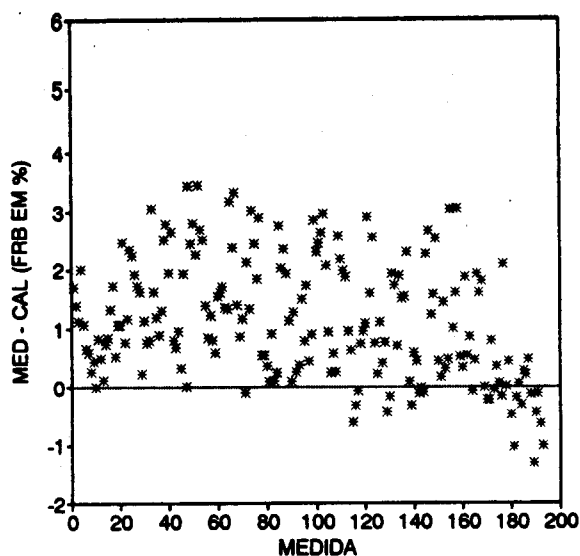


Figura 2 - Erros do modelo SAIL ao longo das 12 campanhas radiométricas. Comprimento de onda de 547,5 nm.

Como pode ser visto na Figura 4 os erros foram baixos a partir da medida 24 (57 dias após o plantio em diante),

variando de -1% a 1% com média de 0,25 e desvio padrão de 0,51. Para a primeira campanha as diferenças entre FRB medido e calculado foram maiores devido à simplificação do modelo ao assumir a uniformidade do dossel, enquanto que na realidade a cultura estava com estrutura de fileira. Entretanto devido aos baixos valores do FRB nesta faixa do espectro a percentagem de erro foi alta, com média de 9,55 e desvio padrão de 17,38 para o modelo SAIL. Assim, para este CO pode-se afirmar que o modelo SAIL teve um bom desempenho.

de os modelos terem superestimado o FRB do dossel para baixos valores de IAF. Para a regressão entre o FRB medido e calculado pelo modelo SAIL na faixa de 800 a 1100 nm, Badhwar et al. (1985) obtiveram valores de 20,92 e 0,590 para o intercepto e inclinação da reta e  $r^2$  de 0,77, valores estes bem próximos aos encontrados no presente trabalho para a faixa do IVP. Mesmo assim, os autores afirmam que o desempenho dos modelos pode ser considerado bom, quando se está interessado apenas no comportamento médio destes modelos.

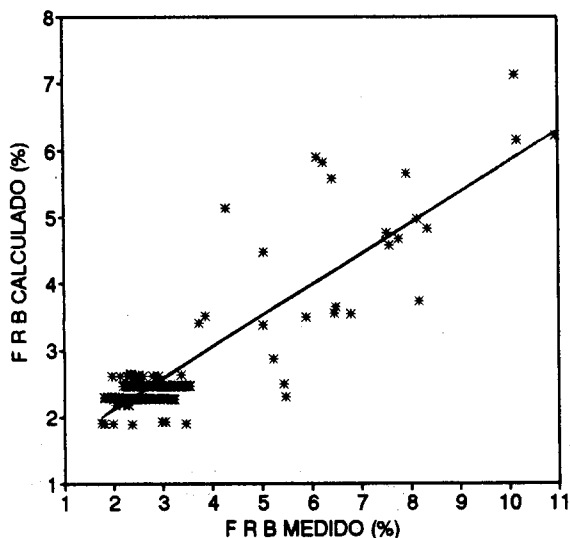


Figura 3 - FRB calculado pelo SAIL versus o FRB medido em 12 campanhas radiométricas. Comprimento de onda de 652,5 nm.

Observando o diagrama de dispersão da Figura 5, verifica-se que a regressão entre os valores de FRB calculado pelo modelo SAIL versus o FRB medido no campo para o CO de 804,3 nm forneceu um  $r^2$  de 0,74 com intercepto de 20,77 e inclinação de 0,64. Resultados semelhantes foram verificados também para o modelo SUITS. Isto ocorreu principalmente devido ao fato

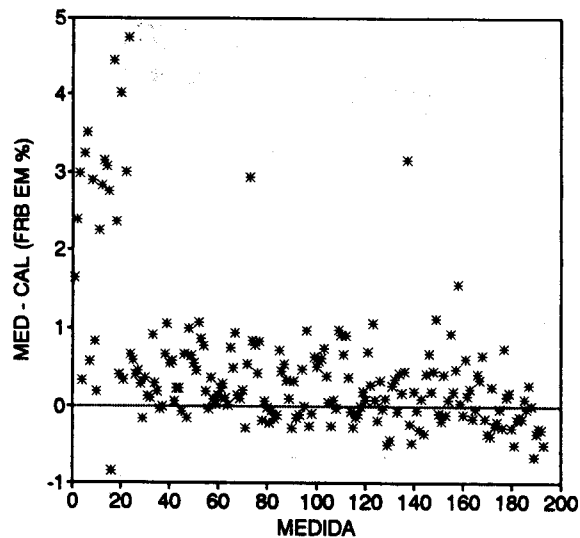


Figura 4 - Erros do modelo SAIL ao longo das 12 campanhas radiométricas. Comprimento de onda de 652,5 nm.

Os resultados das análises nos 46 comprimentos de onda de 514,0 nm a 918,6 nm são mostrados nas Figuras 6, 7, 8 e 9. Para cada comprimento de onda os cálculos foram realizados utilizando-se os 193 pares de FRB medido e calculado, relativos às parcelas medidas nas 12 campanhas.

Na Figura 6, observa-se que os dois modelos tiveram uma curva de %RMSE semelhantes em

termos de formato, entretanto o modelo SAIL teve menores valores para a grande maioria dos comprimentos de onda.

O intercepto da reta de regressão obtido pelos modelos SUITS e SAIL assumiram valores semelhantes na região do visível, enquanto que para o IVP o SAIL obteve menores valores, embora ainda relativamente altos (Figura 7). Na Figura 8 observa-se que o modelo SAIL obteve melhores valores para o intercepto da reta de regressão em quase toda faixa do espectral analisada.

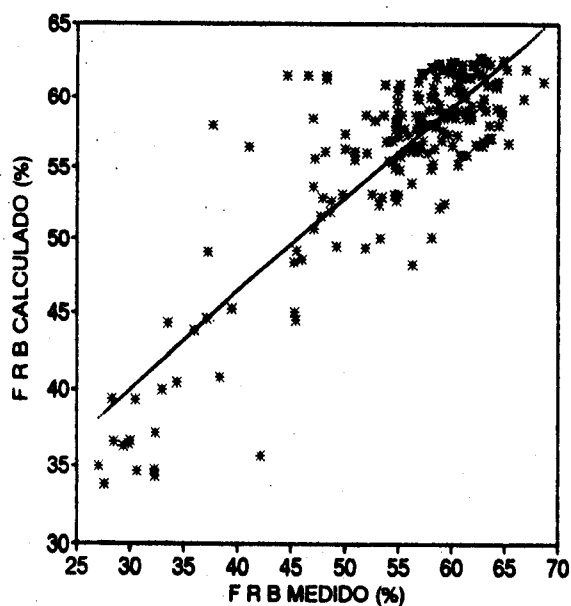


Figura 5 - FRB calculado pelo SAIL versus FRB medido no campo em 12 campanhas radiométricas. Comprimento de onda de 804,3 nm.

Também em termos de  $r^2$  o modelo SAIL foi superior ao SUITS principalmente na faixa espectral do vermelho e do IVP, conforme pode ser verificado na Figura 9. Estes valores de  $r^2$  são significativos mesmo ao nível de confiança de 99%, mostrando que a correlação existe e não se deve ao acaso. Estes resultados de regressão condizem com aqueles encontrados por Badhwar et al. (1985).

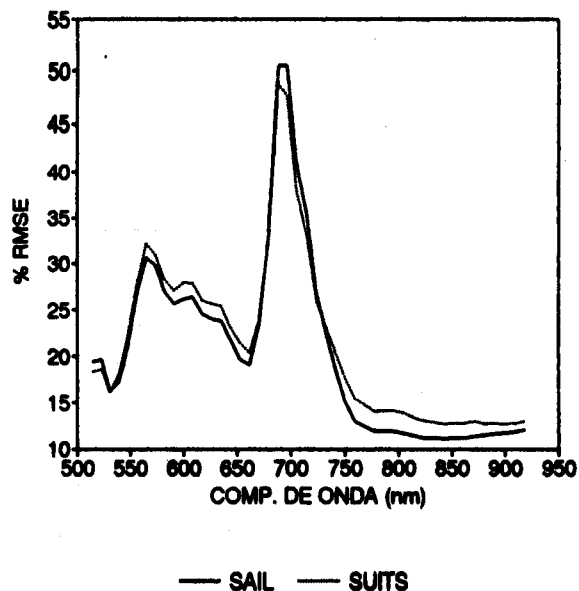


Figura 6 - Raiz do erro percentual médio quadrático versus comprimento de onda.

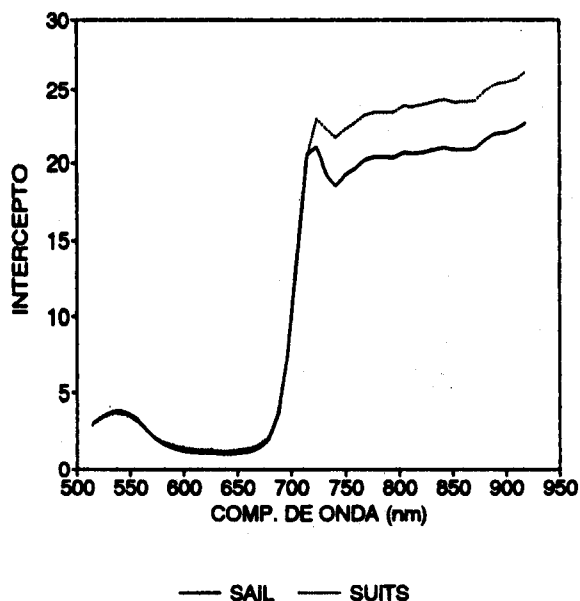


Figura 7 - Intercepto da reta de regressão entre FRB calculado e medido, versus comprimento de onda.

Foi realizado o teste de "t" para os pares de dados das Figuras 6, 7, 8 e 9 e coeficiente de correlação "r", no qual se verificou que os dois modelos são significativamente diferentes a 99% de probabilidade. Assim, o %RMSE e o intercepto da regressão foram menores para o SAIL, enquanto que para a

inclinação da reta de regressão, o  $r^2$  e o coeficiente de correlação o SAIL obteve maiores valores, confirmando a superioridade deste modelo.

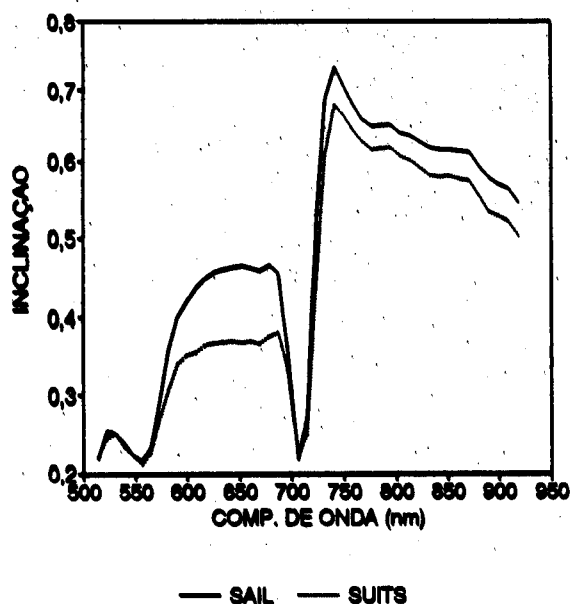


Figura 8 - Inclinação da reta de regressão entre FRB calculado e medido, versus comprimento de onda.

#### Análise de Sensibilidade do Modelo SAIL, Para a Condição de Visada no Nadir

Primeiramente foi verificado que ambos modelos não têm sensibilidade para a densidade do dossel na vertical. Isto significa que para mesmos valores de IAF, DAF, mesma geometria de iluminação e de visada, mesmas propriedades espectrais do solo e dos componentes do dossel e mesmo fluxo difuso, o modelo fornece valores de FRB iguais para diferentes espessuras de camadas.

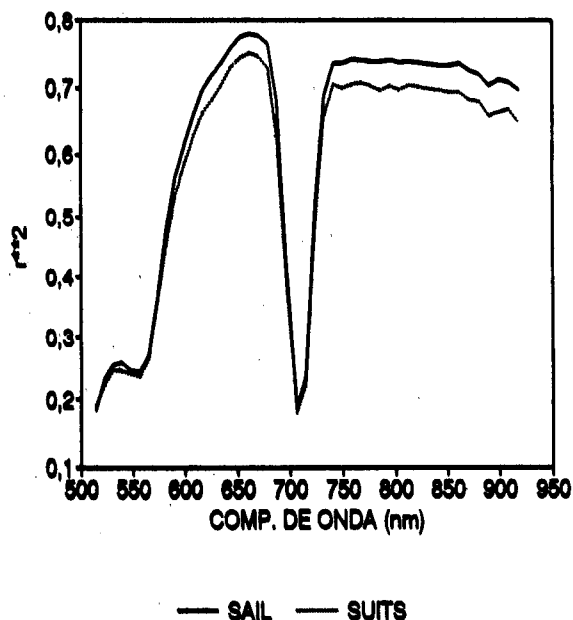


Figura 9 - Coeficiente de determinação da reta de regressão ( $r^2$ ) entre FRB calculado e medido, versus comprimento de onda.

Conforme esperado, verificou-se que o modelo SAIL é mais sensível a IAF para CO caracterizados por baixa absorção. Para o CO de 652,5 nm (804,3 nm) a saturação ocorreu para IAF 3 e 4 (8 e 11) para as arquiteturas planófilas e eretófilas respectivamente.

Com relação à DAF, verificou-se que as maiores diferenças verificadas nas curvas de  $FRB_n$  ocorreram na região do IVP, com maiores valores de  $FRB_n$  para as planófilas e menores para as eretófilas. No vermelho a tendência foi inversa e as diferenças foram menores. Foi verificado que o aumento do IAF causou a diminuição das diferenças de FRB entre as diversas arquiteturas e que as plagiófilas, extremófilas e uniformes, que têm ângulo médio foliar igual a  $45^\circ$ , apresentaram resultados de  $FRB_n$  praticamente iguais. Isto mostra que para estas três arquiteturas o modelo SAIL não foi sensível ao grau de dispersão dos ângulos foliares



em torno do ângulo médio.

Para o FRB do solo observou-se que este teve uma influência mais acentuada na região do IVP, com uma redução com o aumento do IAF. Estes resultados condizem com aqueles encontrados por Huete (1987), onde o autor mostra que maiores efeitos do solo ocorrem em faixas espectrais onde seu FRB é maior. Observou-se também que o FRB de dosséis mais eretos foram mais sensíveis ao FRB do solo.

Foi verificado que o modelo SAIL tem alta sensibilidade às propriedades espectrais das folhas, sendo este o parâmetro que determina as feições da curva espectral, e também que este foi mais sensível às variações nas propriedades ópticas das folhas em dosséis planófilos do que eretófilos, principalmente para baixos valores de IAF.

Para o dossel planófilo não houve grande sensibilidade ao ângulo zenital solar abaixo de 50°. Para dossel eretófilo a sensibilidade foi maior com uma diminuição desta sensibilidade com o aumento do IAF.

Foi verificado que o modelo SAIL não teve grande sensibilidade à percentagem de fluxo difuso. Assim, obteve-se uma diferença de  $FRB_n$  muito pequena para o fluxo 100% difuso e 100% direto.

### Conclusões

Os modelos SUITS e SAIL tiveram um desempenho satisfatório para a simulação do FRB da cultura de soja, principalmente na faixa do vermelho e do IVP de 740 nm a 861 nm. Assim, os dois modelos são validados para as condições do experimento de

campo utilizado neste trabalho. Observou-se que os dois modelos estudados tiveram um comportamento similar em termos de tendência de resposta, entretanto o SAIL foi superior ao SUITS, sendo esta conclusão de acordo com os resultados encontrados por Verhoef e Bunnik (1981), Verhoef (1984) e Badhwar et al. 1985).

Através da análise de sensibilidade do modelo SAIL conclui-se que erros na determinação da DAF, da REF e TRANS e do FRB do solo podem levar a variações nos resultados dos modelos. Verificou-se também que os dois modelos não são sensíveis à densidade do dossel na vertical.

### Referências

- Allen, W.A.; Gayle, T.V.; Richardson, A.J. Plant-canopy irradiance specified by Duntley equations. *J. Opt. Soc. Am.* 60 (8) 372-676, 1970.
- Badhwar, G.D.; Verhoef, W.; Bunnik, N.J.J. Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. *R. Sens. Envir.* 17 (2) 179-195, 1985.
- Bunnik, N.J.J. *The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relations with their morphological and optical properties.* (Doctoral Dissertation). Univ. of Wageningen, 1978. 175 p.
- Chance, J.E.; LeMaster, E.W. Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests. *App. Opt.* 16 (2) 407-412, 1977.

- Chance, J.E.; LeMaster, E.W. A test of the Suits vegetative-canopy reflectance model with LARS soybean-canopy reflectance data. *Int. J. R. Sens.* 6 (5) 665-672, 1985.
- Colwell, J.E. Vegetation canopy reflectance. *R. Sens. Envir.* 3 (3) 175-183, 1974.
- Daughtry, C.S.T.; Vanderbilt, V.C.; Pollara, V.J. Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. *Agron. J.* 74 (4) 744-751, 1982.
- Duggin, M.J. The measurement of reflectance factors. *Phot. Eng. R. Sens.* 46 (5) 643-647, 1980.
- Goel, N.S.; Strebel, D.E. Inversion of canopy reflectance models for estimating agronomic variables. I. Problem definition and initial results using the Suits model. *R. Sens. Envir.* 13 (6) 487-507, 1983.
- Huete, A.R. Soil and sun angle interaction on partial canopy spectra. *Int. J. R. Sens.* 8 (9) 1307-1317, 1987.
- LeMaster, E.W.; Chance, J.E.; Wiegand, C.L. A seasonal verification of the Suits spectral reflectance model for wheat. *Phot. Eng. R. Sens.* 46 (1) 107-114, 1980.
- Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; HSIA, J.J.; Ginsberg, I.W.; Limperis, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance.** Washington, DC, U. S. Dep. of Commerce, 1977. 52 p. (NBS Monograph 160) .
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. **Reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas de soja, medidos com SPECTRON SE-590 e esfera integradora LICOR 1800-12.** MD, Oct. 1990. Comunicação pessoal.
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. *R. Sens. Envir.* 31 (1) 53-63, 1990.
- Suits, G.H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *R. Sens. Envir.* 2 (2) 117-125, 1972.
- Verhoef, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *R. Sens. Envir.* 16 (2) 125-141, 1984.
- Verhoef, W.; Bunnik, N.J.J. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. *Coll. Int. Signat. Spec. d'Objets in Télédétection*, Avignon, France, 8-11 Sept. 1981. INRA, p. 273-289.

**Agradecimentos:** Este trabalho faz parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, o qual agradece ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro. Os autores agradecem à Fundação Banco do Brasil pelo suporte da campanha de campo através do Projeto ESTIMA.