



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-6988-TDI/657

**AVALIAÇÃO DOS MODELOS SUITS E SAIL NO ESTUDO DA
REFLECTÂNCIA DA SOJA (*Glycine Max (L.) MERRILL*).**

Mauro Antonio Homem Antunes

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Getúlio
Teixeira Batista e pelo Dr. Eduardo Delgado Assad, aprovada em 06/10/92.

528. 711. 7 : 63

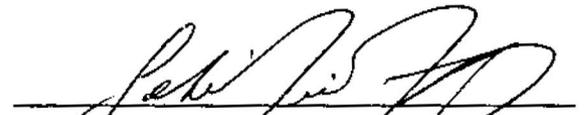
ANTUNES, M.A.H.

Avaliação dos modelos SUITS e SAIL no estudo da reflectância da soja (Glycine max (L.) MERRIL). / M.A.H. Antunes – São José dos Campos: INPE, 1992. 140 p. – (INPE-6988-TDI/657).

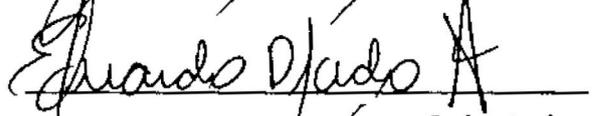
1. Modelos. 2. Transferência radiativa. 3. SUITS. 4. SAIL. 5. Reflectância bidirecional. 6. Soja. 7. Vegetação. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Getúlio Teixeira Batista


Orientador/Presidente

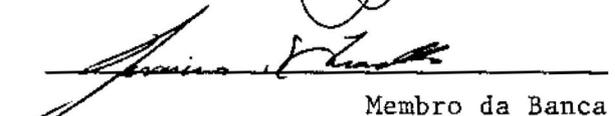
Dr. Eduardo Delgado Assad


Orientador

Dr. Antonio Roberto Formaggio


Membro da Banca

Dr. Jerônimo dos Santos Travelho


Membro da Banca

Dr. Hilton Silveira Pinto


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Mauro Antonio Homem Antunes

São José dos Campos, 06 de outubro de 1992

Ao Criador e à Sua obra prima, a Criação, dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio que jamais faltou.

Aos orientadores pelo apoio no direcionamento dos trabalhos e valiosos incentivos.

Ao CNPQ e à FAPESP, pelo suporte financeiro.

À EMBRAPA/CPAC, que forneceu todo apoio logístico para a realização do trabalho de campo, em especial ao Dr. Eduardo Delgado Assad, aos motoristas, ao pessoal de apoio de campo, ao estagiário Jean e aos pesquisadores não envolvidos no Projeto, mas que contribuíram voluntariamente para a realização do trabalho.

À Fundação Banco do Brasil, que através do Projeto ESTIMA, financiou a coleta de dados no campo e a aquisição de equipamentos, indispensáveis à realização deste e de outros trabalhos.

Um agradecimento especial ao Dr. Yoichi Izumiyama, que pacientemente me ensinou como coletar os dados agronômicos e repassou valiosos conhecimentos a respeito da fisiologia da planta soja.

Ao Bernardo F. T. Rudorff e Dr. Getúlio T. Batista, que viabilizaram minha ida ao campo e forneceram gentilmente os dados espectrais de folhas, indispensáveis para esta dissertação.

Aos Dr. José C. N. Epiphânio e ao Dr. Antônio R. Formaggio, pelo acesso aos computadores de suas respectivas salas.

Ao Maurício A. Moreira, pela minuciosa revisão da dissertação, e pelo acesso à sala e ao computador.

Ao Coimbra, pelo desenho de algumas figuras.

À Dra. Corina pelas valiosas discussões a respeito dos tratamentos estatísticos.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao INPE, pela oportunidade de fazer este curso de mestrado.

RESUMO

Os modelos de transferência radiativa, aplicados ao estudo do comportamento espectral de dosséis agrícolas, constituem em uma poderosa ferramenta auxiliar para a utilização das técnicas de Sensoriamento Remoto na agricultura. Neste trabalho, foi avaliado o desempenho dos modelos SUITS e SAIL, através da comparação do Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) calculado pelos modelos, com aquele medido em experimento de campo sobre a cultura de soja (Glycine max (L.) Merrill). De acordo com os resultados desta pesquisa, chegou-se às seguintes conclusões: a) Os dois modelos tiveram tendências de comportamento semelhantes, porém o SAIL foi superior ao SUITS, principalmente na faixa do vermelho e do infravermelho próximo; b) Para o modelo SAIL, a regressão linear simples entre o FRB medido e o calculado forneceu valores de r^2 de 0,77 para comprimentos de onda no centro da faixa do vermelho e de 0,74 para os comprimentos de onda na faixa de 740 nm a 861 nm; c) Os modelos estudados não dependem da densidade do dossel na vertical; d) Através de uma análise de sensibilidade verificou-se que dos dados de entrada para o modelo SAIL, a distribuição angular de folhas e as propriedades espectrais destas necessitam de uma boa precisão, para que os resultados sejam satisfatórios.

EVALUATION OF SUITS AND SAIL MODELS FOR SOYBEAN (*Glycine max* (L.)
MERRILL) CANOPY REFLECTANCE STUDY.

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) in a soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) under the same conditions. According to this research, it was concluded that: a) SUITS and SAIL models had similar tendencies, but SAIL model performance was better than SUITS model; b) for the SAIL model, the linear regression between calculated and measured FRB had a r^2 value of 0,77 for the wavelength in the red spectral region, and r^2 value of 0,74 from 740 nm to 861 nm spectral range; c) both models do not depend on the canopy vertical density; d) through sensitivity analysis, it was found that a good precision in the input data for SAIL model, namely angular distribution and spectral attributes of leaves, is needed to obtain a good performance in the FRB simulation.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xxiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA</u>	5
2.1 - Radiometria de campo	5
2.2 - Resposta espectral de alvos agrícolas	9
2.3 - Modelos de transferência radiativa	17
2.3.1 - Modelo SUITS	23
2.3.2 - Modelo SAIL	31
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS</u>	37
3.1 - Descrição do experimento de campo	37
3.2 - Parâmetros agronômicos	40
3.3 - Parâmetros espectrais	46
3.3.1 - Reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas	46
3.3.2 - Reflectância do solo	47
3.4 - Parâmetros de iluminação e de visada	48
3.4.1 - Fluxo difuso	48
3.4.2 - Ângulos de iluminação e de visada	48
3.5 - Medidas do fator de reflectância bidirecional espectral (FRB _b) do dossel ...	49
3.6 - Implementação computacional dos modelos	53
3.7 - Metodologia de análise dos resultados	54
3.7.1 - FRB calculado pelos modelos SUITS e SAIL versus FRB medido no campo	54
3.7.2 - Análise das diferenças entre FRB medido no campo e FRB calculado pelos modelos (erros)	55
3.7.3 - Raiz do erro percentual médio quadrático (%RMSE)	55
3.7.4 - Análise da regressão entre FRB calculado pelos modelos SUITS e SAIL, e o FRB medido no campo	55
3.7.5 - Teste "t" em pares de medidas	56
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	59
4.1 - Análise dos resultados por parcela	59
4.2 - Análise do FRB em quatro comprimentos de onda específicos	65

4.3 - Não dependência do FRB em relação à densidade do dossel na vertical	80
4.4 - Análise de sensibilidade do modelo SAIL	83
4.4.1 - Índice de área foliar (IAF)	83
4.4.2 - Distribuição angular de folhas (DAF)	87
4.4.3 - Reflectância do solo	79
4.4.4 - Reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas	92
4.4.5 - Ângulo zenital do sol	94
4.4.6 - Fluxo difuso	100
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE A - CÓDIGOS FORTRAN PARA OS MODELOS SUITS E SAIL .	117

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Geometria de feixes elementares da radiação incidente e refletida	6
2.2 - Coeficiente de espalhamento bidirecional $w(\theta_i)$, e coeficiente de extinção $K(\theta_i)$, para $L'=1/m$, como função do ângulo de visada, para diferentes ângulos de inclinação foliar	35
3.1 - Configuração do experimento	38
3.2 - Esquema de uma parcela. A é a área destinada às campanhas radiométricas e colheita de grãos, e B é a área destinada à coleta de plantas para serem processadas em laboratório	41
3.3 - Distribuição angular de folhas (DAF): a) função densidade de probabilidade (FDP), calculada através das equações 3.1; b) distribuição acumulada de folhas	45
3.4 - Percentagem dos fluxos difusos mínimo, médio e máximo, medidos sombreando-se a placa de sulfato de bário	49
4.1 - FRB calculado pelos modelos SUITS e SAIL e FRB medido, por comprimento de onda, referente à parcela 1 medida em 10/02/90	60
4.2 - Espectro medido no campo em 30/03/90, e calcula do pelos modelos SUITS e SAIL, para a parcela 1	60
4.3 - Espectro medido no campo em 30/03/90, e calcula do pelos modelos SUITS e SAIL, para a parcela 18	61
4.4 - Regressão do FRB calculado pelo modelo SAIL versus FRB medido no campo em 30/03/90, para todos comprimentos de onda, referentes à parcela 1	63
4.5 - FRB calculado pelo modelo SAIL, FRB medido no campo em 30/03/90, erro e percentagem de erro, por comprimento de onda, referentes à parcela 1	64
4.6 - FRB calculado pelo modelo SAIL, versus FRB medido em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 547,5 nm	66
4.7 - Percentagem de erro ao longo das 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 547,5 nm	66

4.8 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus FRB medido na campanha radiométrica de 30/03/90, para o comprimento de onda de 547,5 nm	67
4.9 - FRB calculado pelo modelo SAIL e medido no campo em 30/03/90 para a parcela 18; reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas de soja, medidas 56 dias após o plantio; e FRB médio do solo utilizado no experimento de campo	68
4.10 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus o FRB medido em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 652,5 nm	69
4.11 - Percentagem de erro ao longo das 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 652,5 nm	70
4.12 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus FRB medido na campanha radiométrica de 30/03/90, para o comprimento de onda de 652,5 nm	71
4.13 - FRB calculado pelo modelo SAIL, FRB medido no campo, erro e percentagem de erro para o comprimento de onda de 652,5 nm, por parcela. Dados referentes à campanha radiométrica de 30/03/90	72
4.14 - Diagrama de dispersão do FRB calculado versus FRB medido no campo em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 705,5 nm	72
4.15 - Percentagem de erro ao longo das 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 705,5 nm	73
4.16 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus FRB medido no campo em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 804,3 nm	74
4.17 - Resíduo da regressão linear simples entre FRB calculado e medido, para o comprimento de onda de 804,3 nm, versus o FRB medido no campo (variável independente)	75
4.18 - Raiz do erro percentual médio quadrático versus comprimento de onda. Para cada comprimento de onda, foram utilizados nos cálculos 193 pares de FRB calculado e medido	76
4.19 - Intercepto do eixo das ordenadas (coeficiente a) versus comprimento de onda, obtido da regressão linear simples entre FRB calculado e medido no campo. Cada regressão foi realizada utilizando 193 pares de FRB calculado e medido	77

4.20 - Inclinação da reta (coeficiente b) versus comprimento de onda, obtido da regressão linear simples entre FRB calculado e medido no campo. Cada regressão foi realizada utilizando 193 pares de FRB calculado e medido . . .	78
4.21 - Coeficiente de determinação da reta (r^2) versus comprimento de onda, obtido da regressão linear simples entre FRB calculado e medido no campo. Cada regressão foi realizada utilizando 193 pares de FRB calculado e medido . . .	79
4.22 - FRB calculado pelo modelo SAIL para um dossel de soja planófilo e outro eretófilo, em função do IAF. Comprimento de onda de 547,5 nm e ângulo zenital solar de 5 graus	84
4.23 - FRB calculado pelo modelo SAIL para um dossel de soja planófilo e outro eretófilo, em função do IAF. Comprimento de onda de 652,5 nm e ângulo zenital solar de 5 graus	85
4.24 - FRB calculado pelo modelo SAIL para um dossel de soja planófilo e outro eretófilo, em função do IAF. Comprimento de onda de 804,3 nm e ângulo zenital solar de 5 graus	86
4.25 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja planófilos com IAF entre 2,0 e 2,5. Ângulo zenital solar de 15 graus	87
4.26 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja planófilos com IAF entre 5,0 e 5,5. Ângulo zenital solar de 15 graus	88
4.27 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja com IAF 1 e diversas DAFs. Ângulo zenital solar de 35 graus	88
4.28 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja com IAF 8 e diversas DAFs. Ângulo zenital solar de 35 graus	90
4.29 - Valores mínimo e máximo do FRB do solo medidos no campo, por comprimento de onda	91
4.30 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja com DAF planófila e IAF variando de 1, 4 e 8, para duas condições de reflectância do solo. Ângulo zenital solar de 15 graus	92
4.31 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para um dossel de soja planófilo e com IAF 6, para diferentes propriedades espectrais de folhas	93

4.32 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 1 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 547,5 nm	95
4.33 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 8 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 547,5 nm	95
4.34 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 1 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm	96
4.35 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 2 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm	97
4.36 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 4 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm	98
4.37 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 8 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm	98
4.38 - FRB para o comprimento de onda de 852,0 nm para três tipos diferentes de DAF com IAF 1, como função do ângulo zenital solar	99
4.39 - FRB para o comprimento de onda de 852,0 nm para três tipos diferentes de DAF com IAF 4, como função do ângulo zenital solar	99
4.40 - FRB para o comprimento de onda de 852,0 nm para três tipos diferentes de DAF com IAF 8, como função do ângulo zenital solar	100
4.41 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para um dossel de soja planófilo com IAF 4 e três condições de percentagem de fluxo difuso. PDIF 1 é a mínima medida no campo, PDIF 2 é a máxima medida no campo e PDIF 3 é a máxima medida no campo multiplicada por 1,5	102
4.42 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para um dossel de soja planófilo e três condições de fluxo difuso incidente (PDIF igual à média das medidas de campo, incidência 100% direta e incidência 100% difusa). O IAF utilizado foi de 1 e 8, e ângulo zenital solar de 30 graus para o fluxo direto	103

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 - Valores de média e desvio padrão para os coeficientes a, b, e r^2 , obtidos da regressão entre FRB medido no campo e FRB calculado pelos modelos SUITS e SAIL, para cada uma das 193 parcelas. Para cada parcela a regressão foi feita para o conjunto dos 46 comprimentos de onda	62
4.2 - Valores de t calculado, para o %RMSE, coeficiente a, coeficiente b, r^2 e r, entre pares de medidas dos modelos SUITS e SAIL	79

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_s	- Ângulo zenital do sol
θ_o	- Ângulo zenital de visada
ψ	- Diferença de azimute entre sol e visada
θ_l	- Ângulo foliar
ω	- Ângulo sólido
Ω	- Ângulo sólido projetado
ρ	- Reflectância direcional hemisférica de folhas
τ	- Transmitância direcional hemisférica de folhas

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABSOR	- Absortância direcional hemisférica de folhas
APAR	- Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
DAF	- Distribuição angular de folhas
FDRB	- Função de distribuição de reflectância bidirecional
FOV	- Campo de visada do radiômetro
FR	- Fator de reflectância
FRB	- Fator de reflectância bidirecional
IAF	- Índice de área foliar
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVP	- Infravermelho próximo (região do espectro eletromagnético entre 700 nm e 1300 nm)
PDIF	- Percentagem de fluxo difuso
R	- Reflectância
REF	- Reflectância direcional hemisférica de folhas
TR	- Transferência radiativa
TRANS	- Transmitância direcional hemisférica de folhas
VIS	- Visível (região do espectro eletromagnético entre 400 nm e 700 nm)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto vem se afirmando como uma ferramenta útil e indispensável para monitorar culturas agrícolas, graças principalmente às suas características de repetitividade e possibilidade de aquisição de dados em várias bandas espectrais. Além disso, pode ser mais prático para acompanhamento e avaliação de grandes áreas, quando comparado aos métodos convencionais de campo. O monitoramento de cultura agrícola envolve a estimativa de área plantada, avaliação das condições fitossanitárias e estimativa da produção de fitomassa e/ou grãos. Desta forma, tem-se procurado desenvolver metodologias para a estimativa da produtividade de culturas, através de técnicas de Sensoriamento Remoto. Tal informação é de importância para o estabelecimento de estratégias para o transporte, armazenamento e comercialização de safras agrícolas, por órgãos governamentais e de iniciativa privada. Além disso, possibilita uma avaliação da eficiência do financiamento de safras agrícolas.

Para se atingir este objetivo, é necessário que sejam investigadas as relações existentes entre as variáveis agronômicas e biofísicas da cultura com a produtividade de fitomassa e de grãos, e com o comportamento espectral das culturas com as quais se deseja trabalhar. Para isso, as relações dos dados espectrais transformados em índices de vegetação, com as variáveis agronômicas, biofísicas e produtividade têm sido investigadas.

Estes índices são derivados das medidas espectrais em duas ou mais faixas do espectro, e desenvolvidos na maioria dos casos para serem sensíveis às variações da biomassa e minimização de efeitos do solo (Pearson e Miller, 1972; Kauth e Thomas, 1976; Richardson e Wiegand, 1977; Tucker, 1979; Guyot e Baret, 1991).

Porém, estes índices de vegetação não têm sensibilidade a todas as variáveis agronômicas que interferem no crescimento e produtividade das culturas, as quais muitas vezes estão relacionadas com dados multi-espectrais. Isto ocorre porque estes índices não derivam diretamente das variáveis biofísicas e arquiteturais, que determinam a resposta espectral de um dossel de plantas.

Apesar dessa limitação, estes índices de vegetação são importantes no Sensoriamento Remoto. Eles são largamente utilizados para monitorar culturas e para a previsão de safras, através das relações entre os dados espectrais e a produtividade de grãos.

Resultados promissores, da utilização desses índices de vegetação, são demonstrados nos trabalhos realizados por Tucker et al. (1980), Pinter et al. (1981), Hatfield (1983), e Rudorff e Batista (1989).

Outra abordagem na utilização de dados espectrais para monitorar culturas, refere-se à utilização de modelos que integram conhecimentos sobre as respostas fisiológicas das plantas cultivadas às variações no meio físico em que se encontram, e que determinam sua produção final. Estes modelos têm potencial de serem utilizados nos estudos da integração de dados de Sensoriamento Remoto, para monitorar culturas e gerar previsões de safras com base física e biológica, levando a resultados confiáveis.

A produção de uma cultura é função da quantidade de nutrientes disponíveis absorvidos e de carbono fixado, e da eficiência com que este carbono é fixado e utilizado na formação da parte de interesse a ser colhida. Isto depende fundamentalmente do potencial genético e de suas respostas ao meio ambiente. Com relação ao processo de fixação de carbono, este depende principalmente das condições de iluminação, do arranjo das folhas e da capacidade das plantas de absorver a radiação fotossinteticamente ativa que penetra nas folhas. Ressalta-se portanto a importância da inclusão da APAR (fração da radiação fotossinteticamente ativa que foi absorvida), nos modelos de determinação da produtividade das culturas.

Neste sentido, os modelos de transferência radiativa (TR) para simulação da reflectância são de grande utilidade, uma vez que as variáveis que determinam o fator de reflectância calculado por estes modelos derivam diretamente das propriedades biofísicas e arquiteturais do dossel em estudo. Em consequência, há uma maior segurança, quando estes modelos são utilizados para determinar variáveis agrônômicas e biofísicas do dossel, e para estimar a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

Entretanto, devido às simplificações assumidas na derivação destes modelos, a transferência radiativa em um dossel pode não ser descrita satisfatoriamente. Daí a necessidade de se trabalhar na validação destes sob diversas condições da vegetação, variando os parâmetros de entrada dentro das amplitudes que podem ser encontradas em condições reais de campo. Somente após se ter certeza de que os modelos são precisos dentro de certos limites aceitáveis, é que eles podem então se tornar uma ferramenta promissora, úteis no mapeamento e separação de culturas agrícolas e na previsão de safras através das técnicas de Sensoriamento Remoto.

Shannon (1975), menciona que avaliar um modelo, significa avaliar o nível de confiança em que as inferências tiradas dos resultados do modelo são corretas e aplicáveis para o sistema real. O autor afirma que o conceito de validação deve ser considerado como sendo de grau, não sendo meramente uma decisão binária em que o modelo é julgado como válido ou inválido. Segundo o autor, a validade de um modelo deve ser colocada em uma escala de 0 a 1. Deste modo, o que se verifica na realidade é o grau de confiança que se pode ter no modelo ao se tentar representar um sistema.

Um modelo de altíssimo desempenho provavelmente terá um custo extremamente alto tornando-o inviável. Por outro lado se o modelo tem um desempenho extremamente baixo, provavelmente seu custo será muito baixo, mas poderá não ter utilidade prática. Entretanto o que se deve procurar, na prática, é o máximo de benefício com o mínimo de custo, e conciliar estas duas variáveis (custo e benefício), de modo a se obter um modelo ideal para o caso em consideração.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos de transferência radiativa SUITS e SAIL, na simulação do fator de reflectância bidirecional da cultura de soja, através de comparação com dados medidos no campo, comparando também o desempenho dos dois modelos.

Para atingir este objetivo foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Estudo de revisão de literatura sobre modelos de transferência radiativa, aplicados a dosséis de culturas agrícolas;
- 2) Montagem de experimento de campo para a coleta dos dados necessários para a simulação dos modelos e para medição do fator de reflectância bidirecional do dossel de soja sob as mesmas condições;
- 3) Estudos para implementação dos modelos SUITS e SAIL;
- 4) Simulações do fator de reflectância bidirecional com os modelos SUITS e SAIL, para as condições em que foram realizadas as medidas radiométricas de campo;
- 5) Análise dos resultados obtidos, comparando o fator de reflectância bidirecional medido no campo com o calculado para as mesmas condições;
- 6) Realização de análise de sensibilidade do modelo SAIL, para verificar se a precisão dos dados de campo está condizente com a sensibilidade do modelo.

CAPÍTULO 2REVISÃO DE LITERATURA2.1 - RADIOMETRIA DE CAMPO

A radiometria de campo consiste na aquisição de dados radiométricos, onde o equipamento é colocado a uma pequena distância do alvo. Este procedimento visa minimizar os efeitos atmosféricos, e permitir um maior controle das variáveis que influenciam as propriedades ópticas do alvo em estudo.

A reflectância de uma superfície é definida como a razão do fluxo refletido pelo fluxo incidente nesta superfície (Nicodemus et al., 1977). Entretanto, Judd (1967) argumenta que se deve separar os dois tipos de reflexão possíveis (direta e difusa), e define reflectância como sendo a razão de uma porção especificada do fluxo refletido, pelo fluxo incidente.

Assim, a reflectância (R) é dada por:

$$R = M \text{ (W m}^{-2}\text{)} / E \text{ (W m}^{-2}\text{)},$$

onde:

M é a exitância devido à reflexão;

e E a irradiância incidente.

Porém, as grandezas envolvidas são de difícil medição, e não trazem informações a respeito das propriedades refletoras do alvo, com relação à geometria de iluminação e direção de visada do sensor.

Conforme Nicodemus et al. (1977) quantidade que caracteriza geometricamente as propriedades refletoras de uma área suficientemente grande, com superfície isotrópica uniforme e irradiada uniformemente, é a função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) ou f_r :

$$f_r(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i; E_i)}{dL_i(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i d\omega_i} \quad (\text{Sr}^{-1})$$

onde:

dL_r é a radiância refletida (infinitesimal);

E_i a irradiância incidente;

$L_i(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i d\omega_i$ é a irradiância incidente;

ω_i é o ângulo sólido;

θ e ϕ denotam o ângulo zenital e azimutal, respectivamente;

subscritos i e r denotam quantidades associadas com o fluxo incidente e refletido, respectivamente.

A Figura 2.1, adaptada de Nicodemus et al. (1977) ilustra a geometria de aquisição da FDRB, descrita pela fórmula acima.

A FDRB é uma razão de valores infinitesimais, que não podem ser medidos na prática. Uma vez que prediz uma densidade de reflectância por ângulo sólido, a FDRB pode assumir valores que variam de zero a infinito. No entanto, estas limitações não invalidam o valor conceitual desta grandeza (Nicodemus et al., 1977).

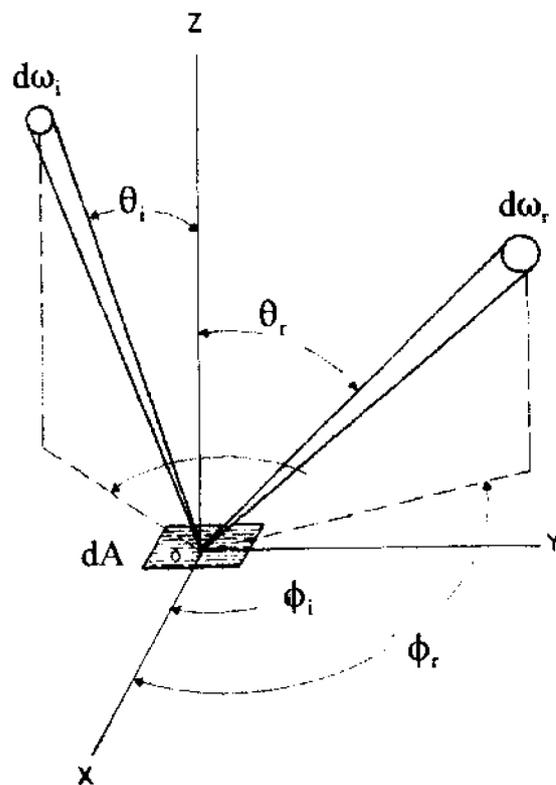


Fig. 2.1 - Geometria de feixes elementares da radiação incidente e refletida.

Judd (1967) menciona que, se a reflectância do difusor perfeito é a unidade, a razão entre o fluxo refletido por um alvo, e o fluxo refletido pelo difusor perfeito, será numericamente idêntica à reflectância deste alvo. Isto torna a reflectância uma grandeza facilmente mensurável, desde que se obedecem os seguintes critérios: o difusor perfeito deve ser irradiado identicamente ao alvo, e o equipamento de medição deve ter mesma abertura (ângulo sólido) para o alvo e para o difusor perfeito.

Para a obtenção do valor da reflectância de um alvo em uma dada direção, o procedimento ideal seria medir sua radiância nesta direção, confinada em um ângulo sólido infinitesimal, e dividir o valor encontrado pela radiância de um difusor perfeito sob mesmas condições de iluminação, confinada no mesmo ângulo sólido. Mas em condições reais, o que se mede é o fator de reflectância (FR), o qual é definido como a razão entre o fluxo radiante do alvo, por aquele que seria refletido por uma superfície Lambertiana e sem perdas por absorção ou transmissão, sob as mesmas condições de geometria de iluminação e direção dos raios (mesmo ângulo sólido). Conforme Nicodemus et al. (1977), o FR é descrito por:

$$FR(\omega_r, \omega_i) = \frac{\int_{\omega_r} \int_{\omega_i} fr(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i) L_i(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}{(dA/\pi) \int_{\omega_r} \int_{\omega_i} L_i(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}$$

onde:

$d\Omega = \cos(d\omega)$, sendo o valor de FR uma quantidade adimensional.

Em uma notação mais compacta, e levando em consideração o fato de a placa padrão não ser um difusor sem perdas, que na realidade são as condições em que as medidas são feitas em campo, Milton (1987) define o fator de reflectância como sendo:

$$FR(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r) (alvo)}{dL(\theta_r, \phi_r) (placa)} K(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i)$$

onde:

K é o fator de correção para a placa.

Segundo Robinson e Biehl (1979), a quantidade obtida da medição do alvo e a placa padrão, com equipamento de pequeno campo de visada (FOV), no caso menor que 20°, é denominada fator de reflectância bidirecional (FRB), sendo uma direção associada com o ângulo de visada e a outra com o ângulo solar. Robinson e Biehl (1979) argumentam que, para que o FRB medido seja uma boa aproximação do verdadeiro FRB do alvo, a placa de referência deve ter reflectância próxima à Lambertiana, a incidência da radiação no alvo deve ser dominada pela fração direcional, e o alvo não deve ter FRB radicalmente diferente do Lambertiano. Slater (1980) menciona que Lambert definiu uma superfície perfeitamente difusora, ou superfície Lambertiana, como sendo aquela para a qual a radiância (L) é constante para qualquer ângulo de reflexão em relação à normal à superfície.

O fator de reflectância bidirecional espectral (FRB_n) utilizado neste trabalho é definido como sendo pi (π) vezes a radiância do alvo na direção considerada, dividido pela irradiância sobre este mesmo alvo:

$$FR(\theta_r, \phi_r; \theta_s, \phi_s) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r) \text{ (alvo)}}{dL(\theta_r, \phi_r) \text{ (placa)}} K(\theta_r, \phi_r; \theta_s, \phi_s)$$

onde:

π, em unidade de Sr é o fator de conversão de radiância para irradiância, sendo obtido da integração em todo hemisfério do ângulo sólido projetado, como segue:

$$\pi = \int_{2\pi} \cos\theta_v d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\theta_v \sin\theta_v d\phi_v d\theta_v$$

Quando o céu está limpo e livre de nuvens, a incidência pode ser considerada como direcional, uma vez que a radiação incidente difusa tem seu efeito diminuído por estar distribuída no hemisfério, e também porque a fração difusa das proximidades da direção solar pode ser considerada como direcional (Robinson e Biehl 1979). Entretanto, a presença de nuvens no hemisfério celeste e de outros alvos nas proximidades do local de radiometria é na maioria dos casos inevitável. Conforme Robinson

e Biehl (1979), a contribuição de uma nuvem, que começa no horizonte e vai até o ângulo b em relação ao zênite, para o FRB de um alvo pode ser dada por:

$$L_c = F_h R(c) E_s R(t) (\cos b)^{5/2},$$

onde:

L_c é a radiância medida de um alvo e que consiste em contribuição da nuvem;

F_h é a fração azimutal do horizonte tomado pela nuvem;

$R(c)$ é a reflectância da nuvem;

E_s a irradiância direta;

$R(t)$ a reflectância do alvo;

e b é o ângulo zenital do topo da nuvem.

Como pode ser visto na equação acima, quando a nuvem está muito baixa e, ocupando apenas uma pequena fração azimutal do horizonte, a contribuição desta nuvem é muito baixa. Esta equação é inclusive de muita utilidade, para a determinação da contribuição de alvos que estejam próximos ao local das medições radiométricas, substituindo neste caso a reflectância da nuvem por aquela do objeto.

2.2 - RESPOSTA ESPECTRAL DE ALVOS AGRÍCOLAS

Os estudos da resposta espectral de alvos agrícolas começaram devido à necessidade de se interpretar com base física, imagens tomadas a nível de aeronave, e também para aplicações em estudos de fotossíntese das plantas. Com o lançamento de plataformas orbitais de Sensoriamento Remoto, houve um aumento de trabalhos direcionados ao conhecimento das características espectrais das plantas, principalmente na parte reflexiva do espectro.

Para que se possa compreender os fenômenos de interação da radiação eletromagnética com alvos vegetais, é necessário que se conheçam as propriedades espectrais dos órgãos das plantas que contribuem para o comportamento espectral do dossel como um todo. Assim, inicialmente os trabalhos foram na maioria voltados para o conhecimento das propriedades espectrais de folhas, tanto para fins de aplicação em Sensoriamento Remoto como para estudos de fotossíntese. Isto se deve ao fato de serem estes órgãos os principais responsáveis pelo comportamento espectral do dossel, devido à sua grande área exposta à radiação incidente, e também às suas propriedades de reflexão, transmissão e absorção. Revisões de trabalhos envolvendo medições do espectro de folhas

podem ser encontradas em Gates et al. (1965), Myers e Allen (1968), Sinclair (1973) e Gausman (1985).

Para Gates et al. (1965) são três os principais mecanismos que influenciam na resposta espectral das folhas:

- 1) pigmentos;
- 2) espaços entre água, que tem índice de refração igual a 1,33 e ar, com índice de refração igual a 1,00 e;
- 3) estruturas celulares da dimensão do comprimento de onda da luz, sendo que tais estruturas podem ser grãos de amido, mitocôndria, ribossomos, núcleo e outros plastídeos.

De acordo com Gates et al. (1965), na faixa do azul, nas proximidades do comprimento de onda de 445 nm, todos pigmentos predominantes (clorofila, carotenóides e xantofilas) absorvem, ao passo que na faixa do vermelho, por volta de 645 nm, apenas clorofila absorve. Mencionam que em geral o conteúdo destes pigmentos nos cloroplastos é de aproximadamente 6%, 29% e 65% para os carotenóides, xantofilas e clorofilas respectivamente, embora possa haver variações.

Para verificar o que ocorreria com a absorção na falta de clorofila, os autores acima citados fizeram medições do espectro de folhas de *Hedera helix albina* (planta desprovida de clorofila), e verificaram que, nesta condição, a absorção foi baixa, principalmente a partir de 500 nm. Knipling (1970) também conseguiu resultados em que a folha de gerânio sem clorofila, teve uma reflectância alta no visível quase no mesmo nível do infravermelho próximo (IVP). Thomas e Gausman (1977) conseguiram uma correlação inversa, entre dados espectrais e a concentração de clorofila e carotenóides, para os comprimentos de onda de 450, 550 e 670 nm. A melhor correlação ocorreu para o comprimento de onda de 550 nm, quando se combinou os dois tipos de pigmentos. Maas e Dunlap (1989) mediram a reflectância de folhas de milho, que receberam um tratamento com produto para as deixar albinas, e conseguiram um resultados em que a reflectância das folhas no verde e vermelho foi igual àquela do IVP. Estes trabalhos mostram que o mecanismo de reflexão são espaços ar-parede celular, e que na região do visível este mecanismo age mas a absorção dos pigmentos causa a diminuição da reflexão e transmissão.

A teoria a respeito da interação da luz com folhas, normalmente citada como sendo a primeira do gênero, foi publicada por Willstätter e Stoll em 1918,

posteriormente referenciada nos trabalhos de Allen et al. (1973), Kumar e Silva (1973) e Sinclair (1973). Esta teoria prevê que as reflexões ocorrem nas interfaces ar-parede celular, local onde há uma diferença de índice de refração entre os dois meios (Allen et al., 1973; Kumar e Silva, 1973; Sinclair, 1973). Segundo Sinclair (1973), Willstätter e Stoll lançaram a hipótese de que a reflexão acontece quando o ângulo crítico para reflexão total é atingido. Sinclair (1973) menciona que, para que aconteça a reflexão crítica, duas condições devem ser satisfeitas:

- a radiação deve passar de um material de alto índice de refração para um de baixo índice de refração e;
- o ângulo de incidência deve ser suficientemente grande.

Por esta teoria, é de se esperar que a face inferior das folhas dorsiventrais tenha uma maior reflectância do que a superior. Estas folhas têm mesófilo foliar diferenciado em parênquima paliádico, com células cilíndricas e densamente arranjadas na parte superior e lacunoso na parte inferior, com células de formatos e arranjos irregulares, com uma grande quantidade de ar entre as células. De acordo com a teoria, este tipo de arranjo de células levaria a uma maior reflectância da face inferior, devido à maior chance de ocorrerem reflexões em ângulos críticos. Willstätter e Stoll fizeram as medidas para validar a teoria na faixa visível do espectro, onde no geral espera-se que folhas dorsiventrais tenham reflectância maior. Nesta faixa espectral, Gupta e Woolley (1971) e Sinclair (1973) obtiveram resultados em que a reflectância da face inferior de folhas de soja foi maior que da superior. Entretanto, para o IVP, Woolley (1971), Gupta e Woolley (1971) e Sinclair (1973), mediram uma reflectância maior para a face superior da soja. Cabe observar que estes resultados foram obtidos para ângulos de incidência próximos à normal da folha. Para um ângulo de incidência de 70° Woolley (1971) obteve uma maior reflectância para a face inferior no IVP, atribuindo a este fato à reflexão especular na epiderme foliar.

Através do método de simulação por tracejamento de raios, Allen et al. (1973) testaram a teoria de Willstätter e Stoll, para uma folha dorsiventral com incidência na face superior, e obtiveram resultados em que a reflectância foi baixa demais e a transmitância alta demais. Kumar e Silva (1973) utilizaram o mesmo método para prever a reflectância e transmitância de folha de soja. Neste trabalho os autores verificaram que, com a utilização apenas de interfaces ar-parede celular, a reflectância foi subestimada e a transmitância superestimada. Em seguida, utilizaram o mesmo método, porém com oito

tipos de interfaces, conseguindo assim, uma melhor aproximação dos resultados da simulação com medidas realizadas em folhas de soja.

Sinclair (1973) lançou a hipótese de que a reflexão nas paredes celulares é mais difusa do que especular. Segundo o autor, as microfibrilas da parede celular, possivelmente produzem o espalhamento necessário para que ocorra a reflectância difusa. Por esta hipótese, a reflectância total da folha é determinada pela espessura total do material de parede celular, que por sua vez é função do número de paredes celulares no caminho da radiação.

Entretanto, a infiltração de folhas com líquidos de índices de refração diferentes, acarretou uma diminuição na reflectância de folhas (Woolley, 1971; Gausman et al., 1974), reforçando a teoria de que as reflexões ocorrem principalmente nas interfaces ar-parede celular. Os autores atribuíram o índice de refração da parede celular, como sendo o do líquido infiltrado que resultou na menor reflectância. Assim, Gausman et al. (1974) encontraram um índice de refração médio de 1,425 para folhas de 4 gêneros diferentes, e para a soja, Woolley (1971) encontrou um valor de 1,48.

A interação dos diversos tipos de mecanismos, cujas intensidades são determinadas por fatores biológicos internos da planta e de resposta ao meio ambiente, é que irá determinar as características espectrais de uma folha. Conforme Gausman (1985), os fatores biológicos que afetam as propriedades ópticas de uma folha são:

- concentração de pigmentos das folhas;
- estrutura interna;
- conteúdo de água;
- maturação ou idade da folha;
- posição nodal;
- condição de iluminação (folhas sob condição de sol versus folhas constantemente sombreadas);
- pubescência;
- senescência.

Assim, apesar de existirem algumas divergências, quanto aos mecanismos que atuam nas propriedades espectrais das folhas, na maioria dos casos são conhecidos os resultados (em termos de reflectância da folha), produzidos pela ação dos fatores que afetam as propriedades espectrais das folhas. Estes conhecimentos podem ser

úteis, como auxiliares nas determinações da relação causa-efeito, através de dados de Sensoriamento Remoto.

Entretanto, estudos de espectro de folhas são úteis, mas não constituem o único fator na determinação do comportamento espectral de alvos vegetais. Myers et al. (1966) já mostravam, através do uso de modelo e de estudos em campo, que apenas o espectro de folhas era insuficiente para prever a reflectância de culturas no IVP.

Colwell (1974), menciona que medidas empíricas e de modelagem têm sugerido que os fatores que influenciam a reflectância de um dossel de vegetação são:

- reflectância e transmitância hemisférica das folhas;
- área foliar;
- orientação das folhas;
- reflectância e transmitância hemisférica das estruturas de suporte (hastes, troncos, galhos, pecíolos);
- reflectância do material subjacente (solo, pedras, folhas senescentes);
- ângulo zenital solar;
- ângulo de visada;
- ângulo azimutal.

Além destes fatores citados por Colwell (1974), o fluxo difuso tem sido referenciado como sendo de importância na determinação da reflectância de um dossel. Este parâmetro tem importância por eliminar a característica direcional da irradiância sobre o dossel.

A resposta espectral de um dossel de plantas como um todo é o produto da interação de todos estes fatores, que, em maior ou menor intensidade, atuam na determinação de seu fator de reflectância bidirecional espectral (FRB_n). Um bom modelo de simulação de reflectância do dossel de vegetação deve considerar todos estes fatores, na mesma razão com que eles atuam na determinação do FRB_n , para poder representar as condições reais de campo com o máximo de fidelidade. Entretanto devido à impossibilidade de descrever fielmente todas as características do dossel, assumem-se algumas simplificações, fazendo com que os modelos forneçam resultados que apenas aproximam das condições reais da vegetação.

A seguir é mostrada uma breve revisão sobre as características espectrais de folhas e de solos, analisando também as implicações do ponto de vista de uso nos modelos de simulação de reflectância.

a) Reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas

Tanto o modelo SUITS como o SAIL assumem que as folhas são Lambertianas, possuindo propriedades ópticas semelhantes nas duas faces, sendo que os valores requeridos são de reflectância direcional hemisférica (REF), e transmitância direcional hemisférica (TRANS).

Para a medição da reflectância e transmitância em todo hemisfério utiliza-se uma esfera integradora, a qual é acoplada no equipamento que realizará as medições radiométricas. A esfera integradora tem a função de integrar a radiação refletida pela amostra em todo hemisfério. Este acessório consiste de uma esfera cujo interior é pintado com material altamente refletor, geralmente sulfato de bário. Possui uma janela para entrada do feixe de radiação, outra em que é colocada a amostra, e outra para a saída do fluxo que irá até os detectores. No caso da medição da TRANS, a amostra é colocada na janela de entrada do feixe de radiação e na outra janela, é colocado uma placa com mesmas propriedades de reflexão das paredes internas.

Quanto ao problema de se considerar as folhas como Lambertianas e com valores iguais de REF e TRANS para ambas faces, Badhwar et al. (1985) argumentam que isto pode levar a erros nos resultados dos modelos. Breece e Holmes (1971), medindo a REF e TRANS bidirecionais das folhas de soja, em diversas condições de geometria de iluminação e de visada, constataram uma alta REF do lado oposto ao de incidência, enquanto que a TRANS tendeu a ser quase Lambertiana, independente do ângulo de incidência. Verificaram ainda que a TRANS diminuiu à medida em que o ângulo de incidência aumentou. A reflectância foi mais próxima de Lambertiana, apenas quando o ângulo de incidência foi próximo à normal da folha.

Norman et al. (1985), calculando a REF de soja através da integração da função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) medida em laboratório, apresentam resultados em que há uma aumento da REF nas faixas do visível e IVP, com o aumento do ângulo de incidência na folha. Para a TRANS na faixa do IVP o efeito foi inverso, verificando-se uma diminuição com o aumento do ângulo de incidência, ao passo que no VIS não houve tendência de aumentar ou diminuir.

Walter-Shea et al. (1989) verificaram que, para folhas de soja o aumento do ângulo de incidência causou o aumento da REF, enquanto que a TRANS diminuiu. Os resultados encontrados pelos autores estão de acordo com aqueles encontrados por Norman et al. (1985), com a diferença de que as tendências verificadas para a faixa do IVP foram também verificadas para o visível.

Comparando medidas tomadas direcionalmente no nadir com aquelas integradas em todo hemisfério, Walter-Shea et al. (1989) verificaram que a REF (medida em todo hemisfério) foi maior que a medida direcionalmente no nadir, enquanto que a TRANS (medida em todo hemisfério) foi menor do que a medida direcionalmente no nadir. Para a reflectância bidirecional, os autores encontraram que os valores mínimos ocorreram para ângulos de visada do sensor próximo ao nadir, e que a transmitância bidirecional foi menos variável que a reflectância bidirecional.

Para verificar a influência das características não Lambertianas das folhas de soja no FRB calculado, Gerstl e Zardecki (1985) incluíram a característica de espalhamento anisotrópico de folhas em um modelo conjunto atmosfera/dossel. Concluíram que para as simulações realizadas imediatamente acima do dossel, este fator causa diferenças significativas no FRB, enquanto que a nível orbital o efeito foi insignificante. Reyna e Badhwar (1985) incluíram a reflectância especular no modelo SAIL, e assim conseguiram eliminar a dependência do erro em relação ao azimute relativo (diferença entre azimute de visada e solar), resultando em um melhor desempenho do modelo. Ross e Marshak (1989), obtiveram resultados mostrando que arquiteturas foliares mais horizontais, tendem a ter uma maior contribuição da reflexão especular, principalmente quando o sensor está visando de frente para o sol.

Estes resultados, verificados na literatura, mostram que a reflectância bidirecional das folhas tem uma grande dependência do ângulo de incidência da radiação e do ângulo de visada do sensor. Assim, provavelmente esta dependência influi nas características bidirecionais da reflectância do dossel.

Usualmente, as medidas de reflectância e transmitância direcional hemisférica (REF e TRANS), são tomadas com o auxílio de uma esfera integradora, com incidência próxima à normal da folha, o que pode levar a erros significativos uma vez que as folhas não são Lambertianas, conforme pôde ser verificado nos trabalhos de Breece e Holmes (1971), Norman et al. (1985) e Walter-Shea et al. (1989). Norman et al. (1985)

recomendam que uma incidência de 45° é mais representativa para a soja para as condições em que realizaram o trabalho.

Conforme pode ser visto na literatura, outro problema é que as folhas de soja têm propriedades ópticas diferentes para as duas faces, por ter mesófilo dorsiventral. Gupta e Wooley (1971) e Sinclair (1973), constataram que a face superior da folha de soja tem reflectância maior que a inferior, no IVP de 800 a 1200 nm enquanto que no visível a face inferior teve reflectância maior. Assim, a hipótese de que a face inferior é mais reflexiva do que a superior para mesófilo diferenciado, talvez seja válida apenas para a região visível do espectro, em concordância com a teoria de Willstätter e Stoll, citado por Sinclair (1973).

Por outro lado, para a TRANS no IVP (800-1200 nm), Gupta e Wooley (1971) encontraram um comportamento oposto, onde a face inferior teve maiores valores do que a face superior.

Estes resultados citados na literatura são importantes porque dão suporte para uma expansão dos modelos, para incluir as diferenças nas propriedades espectrais dos dois lados das folhas. Esta expansão consiste em apenas aumentar o número de coeficientes das equações diferenciais.

b) Reflectância do solo

Os solos têm a reflectância afetada pelos seus constituintes, que são minerais, matéria orgânica e sais (Myers e Allen, 1968), condições físicas da superfície como rugosidade (Myers e Allen, 1968; Baungardner et al., 1985; Norman et al., 1985), textura, estrutura, umidade (Myers e Allen, 1968; Baungardner et al., 1985), formação de crostas (Baungardner et al., 1985), percentagem de fluxo difuso incidente (Norman et al., 1985), restos culturais ou folhas secas sobre a superfície (Wanjura e Bilbro, 1986) e geometria de iluminação e visada (Epiphanyo e Vitorello, 1984; Norman et al., 1985).

Quando se trabalha com dosséis de plantas, é de grande importância que se tenha o conhecimento das características espectrais dos solos, uma vez que este pode ter influência na determinação do FRB total do conjunto solo-planta. A intensidade desta influência vai depender das características espectrais do solo, das características arquiteturais e espectrais do dossel e de seus componentes, da faixa do espectro em consideração, e da geometria de iluminação e de visada.

De acordo com Huete (1987), em caso de cultura com cobertura incompleta, o efeito do solo no FRB total do dossel depende de seu fator de reflectância, do ângulo solar e da percentagem de cobertura do solo pelas plantas. Conforme o autor, para uma cultura de algodão com 40% de cobertura e plantada em solo escuro, medidas radiométricas na faixa do vermelho realizadas com visada no nadir, foram menores para o ângulo zenital solar de 25° do que a 60°, enquanto que para um solo claro a medida a 25° foi maior. Entretanto, no IVP em um solo claro o FRB do dossel foi igual tanto para 25° como para 60° de ângulo solar. O autor verificou também que há uma maior sensibilidade do FRB do dossel ao FRB do solo no IVP, principalmente para menores valores de ângulo zenital do sol, quando mais solo é iluminado diretamente.

Gerstl e Zardecki (1985), estudando a influência da não Lambertianidade do solo no FRB da soja através de modelo de TR, concluíram que para os dados orbitais tomados com visada no nadir, não há influência desta característica do solo no FRB da soja. Entretanto, para simulações feitas fora do nadir e acima do dossel e sem a influência atmosférica, o FRB do dossel cujo solo é não Lambertiano foi diferente daquele realizado com solo Lambertiano, sendo que no nadir esta diferença ocorreu mas foi pequena.

Norman et al. (1985) verificaram que, à medida em que o solo se torna mais liso, a função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) medida tende a ser mais Lambertiana. Isto ocorre devido à diminuição de sombras e o fato de as superfícies das partículas serem Lambertianas. Observando os resultados da simulação do FDRB com modelo, os autores verificaram que variações direcionais da reflectância do solo são menores quando se aumenta a percentagem de fluxo difuso.

Acredita-se que a não Lambertianidade do solo não seja de grande importância para dosséis uniformes e que cobrem totalmente o solo. Isto se deve ao fato de que nestas condições, o fluxo que chega à superfície do solo é provavelmente bastante próximo ao isotrópico, uma vez que a transmitância das folhas é mais próxima à Lambertiana.

2.3 - MODELOS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

A transferência radiativa (TR) trata das leis e princípios que regem um campo de radiação em um meio que espalha, podendo ter propriedades de absorção e emissão. Portanto, é uma confirmação da lei de conservação da energia. É uma teoria

dedicada a problemas que envolvem os processos de interação da radiação ao longo de uma trajetória, através do conhecimento das características do meio e do campo de radiação que está interagindo com o mesmo, prevendo assim, o comportamento deste ao longo desta trajetória.

Para dosséis de plantas, os modelos de TR são uma extensão da teoria normalmente aplicada à atmosfera, para os quais assume-se condições de contornos e impõem-se restrições adequadas às características da vegetação e ao grau de precisão que se deseja obter com o modelo. Eles permitem identificar para uma dada condição do dossel, a relação causa-efeito que há entre as variáveis biofísicas deste dossel e o FRB medido, variáveis estas que fazem parte do rol de parâmetros de entrada para as formulações matemáticas, às quais os modelos são sensíveis.

Suits (1983) menciona que um modelo de simulação de reflectância do dossel fornece uma conexão lógica entre a arquitetura das plantas, a geometria da interação radiométrica e a radiação refletida resultante dos processos de interação. Menciona ainda, que tal modelo permite que se compreendam as razões para as alterações causadas por esta condição de arquitetura e pela geometria da interação, e que a validade de tais inferências podem ser testadas em condições de experimento de campo.

Os modelos podem ser classificados de diversas maneiras conforme a característica considerada. Assim, Strahler et al. (1986) mencionam que os modelos em Sensoriamento Remoto podem ser classificados em contínuos ou discretos, de alta ou de baixa resolução, determinísticos ou empíricos. Outros autores como Smith e Oliver (1972), Slater (1980), Berkhout (1986) classificam os modelos em determinísticos e estocásticos. Entretanto, neste trabalho será utilizada a classificação introduzida por Goel (1988), como segue:

- Modelos geométricos: Neste caso, as plantas ou estruturas da vegetação são descritas como sendo uma figura geométrica, com propriedades ópticas como reflectância e transmitância conhecidas e com arranjo definido sobre uma superfície de reflectância também conhecida. A reflectância final neste tipo de modelo, é fornecida pela integração das contribuições de todas partes que compõem o dossel, como a fração da figura geométrica e do solo com iluminação direta e difusa. Exemplos destes modelos aplicados para dosséis de vegetação podem ser vistos em Jackson et al. (1979), Richardson et al. (1975) e Strahler e Li (1981);

- Modelos de meio turbido: esta abordagem trata o dossel como sendo um meio turbido, em que os órgãos aéreos das plantas são considerados como partículas espalhadoras. A turbidez é dada não só pela distribuição e orientação dos elementos, como também pela suas propriedades ópticas (Ross, 1981). A vegetação é assumida como infinitamente extensa e uniforme na horizontal, composta de camadas dispostas em planos paralelos. Uma discussão de como o dossel pode ser conceitualmente considerado como um meio turbido, pode ser encontrada em Ross (1981) e na revisão sobre teoria de transporte de fótons em dosséis, em Myneni et al. (1989). Neste tipo de modelo são empregados os métodos de TR geralmente utilizados em astrofísica ou em física da atmosfera, métodos estes que consistem na solução do problema de transferência de radiação, para as condições especiais relativas à vegetação. Os modelos derivados das equações de Kubelka-Munk, e aqueles que utilizam da equação fundamental da transferência radiativa, são modelos de meio turbido;
- Modelos híbridos: utilizam de formas geométricas para descrever o arranjo do dossel, porém os órgãos aéreos das plantas são considerados como sendo partículas espalhadoras. Deste modo, cada forma geométrica da vegetação é considerada um meio turbido;
- Modelos de simulação computacional: Este tipo de abordagem utiliza técnicas computacionais para a geração de números aleatórios, que irão definir se um fóton encontrará um obstáculo ou não. Se encontrar, também será escolhida aleatoriamente a direção para onde este fóton vai ser espalhado. Também neste caso, as propriedades ópticas e orientação e arranjo dos elementos da vegetação devem ser conhecidos. Entretanto, as camadas podem ser não homogêneas, o que permite uma maior aplicabilidade para condições encontradas no campo. Normalmente, estes modelos utilizam o método de simulação Monte Carlo (Shannon, 1975), através da geração de números aleatórios para definir se o fóton é espalhado ou não e, em que direção será espalhado. Esta abordagem de simulação de reflectância de dosséis de plantas, pode ser encontrada nos trabalhos de Smith e Oliver (1974), Ross e Marshak (1988), Antyufeev e Marshak (1990).

No que diz respeito às características espaciais dos modelos, estes podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais.

Modelos unidimensionais assumem que o dossel de plantas é infinitamente estendido e uniforme na horizontal, permitindo variações apenas na vertical, através da estratificação em camadas.

Nos modelos bidimensionais, é possível a variação das características do dossel na horizontal em apenas uma direção, sendo adequados para dosséis que apresentam estrutura de fileira (Suits, 1983; Goel e Grier, 1986).

Além da variação na vertical, os modelos tridimensionais permitem variações das características horizontais do dossel em duas direções. Exemplos de modelos tridimensionais podem ser vistos em Kimes e Kirchner (1982), Norman e Welles (1983) e Goel e Grier (1988).

Conforme esta classificação, os modelos SUTS e SAIL, são modelos que consideram o dossel como sendo um meio turbido e unidimensional, composto de camadas infinitamente extensas e uniformes na horizontal.

Os modelos de meio turbido podem receber uma abordagem em que as interações da radiação são descritas por fluxos distintos dentro do dossel, ou através da utilização da equação da transferência radiativa adaptada para as condições da vegetação.

Modelos de reflectância de dossel que utilizam a equação fundamental da transferência radiativa, através da solução desta para as condições encontradas em dosséis de vegetação, podem ser vistos em Weinman e Guetter (1972), Beeth (1975), Ross (1981), Gutschick e Wiegel (1984), Gerstl e Zardecki (1985), Myneni et al. (1987a), Myneni et al. (1987b), Shultis e Myneni (1988).

Os modelos de fluxos são citados na literatura como sendo derivados das equações de Kubelka-Munk (KM), ou de suas equações expandidas, que são as equações de Duntley. Constituem de equações diferenciais com coeficientes que levam em consideração as características do meio em que se deseja prever os processos de interação da radiação.

Estes modelos, como é o caso do SAIL e do SUTS, são voltados para a solução de equações que descrevem um número limitado de fluxos, sendo portanto denominados também modelos de fluxos. Para os modelos SUTS e SAIL são quatro fluxos, sendo um fluxo direto descendente, dois fluxos difusos dentro do dossel (um ascendente e outro descendente), e um fluxo difuso ascendente na direção do sensor.

A precisão destes modelos depende: do número de fluxos, do número de coeficientes das equações, e da precisão destes coeficientes em prever o espalhamento e absorção pelo dossel. Este tipo de abordagem é mais fácil de se entender, é de fácil implementação computacional e demanda pouco tempo de processamento mesmo em computador do tipo PC. Estas vantagens talvez expliquem a grande difusão das técnicas de modelagem que utilizam estes modelos, o que proporcionou uma grande evolução dos mesmos, no sentido de melhorar a descrição do regime de radiação dentro de um dossel.

A transferência radiativa descrita por meio de fluxos, foi primeiramente abordada através da lei de Bouguer-Lambert, a qual se baseia em apenas um parâmetro do meio em estudo, o coeficiente de atenuação. Este tratamento prevê satisfatoriamente a transmitância, mas não prediz a reflectância (Myers e Allen, 1968). Foi utilizada em trabalhos preliminares sobre atenuação da luz pela vegetação, conforme menciona Allen e Richardson (1968). Esta lei é descrita pela seguinte equação (de acordo com Slater, 1980):

$$\Phi_z = \Phi_0 \text{EXP}(-\mu x),$$

onde:

Φ é o fluxo na direção x após percorrer uma distância x ;

e μ é o coeficiente de absorção.

Em 1862, Stokes estendeu a teoria para dois parâmetros com a finalidade de predizer a reflectância. Para verificar sua teoria utilizou-se de lâminas de vidro superpostas (Schutt, 1976).

Shuster em 1905, deu um tratamento ao problema com base em 2 equações diferenciais, expandindo a teoria para espalhamento, absorção e emissão em uma atmosfera nebulosa.

Em 1931, Kubelka e Munk retirou o parâmetro referente à emissão com a finalidade de prever a TR difusa em superfícies pintadas.

Allen e Richardson (1968) utilizaram as equações de KM, para prever a reflectância de folhas de algodão. Utilizaram neste estudo um espectrofotômetro que registra de 500 a 2500 nm. Obtiveram bons resultados em laboratório com desvio padrão entre os dados teóricos de simulação e experimentais de cerca de 1%. As equações de KM, utilizadas pelos autores são duas diferenciais lineares assim descritas:

$$dI/dz = - (k + s) I + s J ;$$

$$dI/dz = + (k + s) J - s I ;$$

onde:

I é o fluxo descendente;

J é o fluxo ascendente;

s é o coeficiente de espalhamento;

e k é o coeficiente de absorção.

Neste caso, os dois coeficientes estão relacionados tanto ao fluxo ascendente como descendente. Não havendo portanto, um coeficiente para o fluxo ascendente e outro para o descendente. É um modelo unidimensional que assume elementos uniformemente distribuídos no dossel e as dimensões são tidas como infinitas na horizontal.

Os autores argumentam ainda que o modelo pode ser facilmente empregado para condições de campo, em que as folhas da vegetação estejam uniformemente distribuídas. Neste caso, z pode ser colocado como sendo o índice de área foliar (IAF) acumulado do topo até o nível do solo.

Apesar disto, Allen e Richardson (1968) limitaram seus experimentos às condições de laboratório. O espectrofotômetro utilizado irradiava o alvo com um fluxo direto, e o sucesso do modelo talvez se deva ao fato de que ao penetrar na folha este fluxo passa a ser difuso, e a transmitância de folhas é bem próxima à Lambertiana, conforme pode ser visto em Breece e Holmes(1971).

A teoria de KM dá boa precisão somente para fluxo perfeitamente isotrópico, em um meio difusor ideal. Bons resultados são obtidos quando a iluminação é totalmente difusa. Não dá portanto respostas à variação do albedo com a variação do ângulo solar, quando se tem uma incidência especular (Allen et al., 1970).

Park e Deering (1982) expandiram os coeficientes das equações de KM, de modo a associar coeficientes de absorção e espalhamento tanto para fluxo ascendente como descendente. Desta maneira, o caminho óptico é representado pela fitomassa por unidade de volume (variável de densidade do dossel na horizontal). Os autores argumentam que o modelo perderia a sua aplicabilidade para dosséis onde há uma significativa variabilidade horizontal, como presença de estrutura de fileiras. O objetivo do trabalho foi estabelecer curvas de reflectância versus fitomassa, para diferentes tipos de cultura ou vegetação e sob diversas condições ambientais e agrônômicas, através da determinação de valores característicos de parâmetros que o modelo requer. Assim, através

do conhecimento da curva característica para aquelas condições, a determinação de fitomassa do dossel necessitaria apenas da reflectância como dado de entrada.

Revisões breves sobre a origem dos modelos de transferência radiativa para vegetação, podem ser encontradas em Myers e Allen (1968) e Schutt (1976) e, revisões sobre os modelos em vegetação e suas aplicações, em Goel (1982), Goel (1988) e Myneni et al. (1989).

2.3.1 - MODELO SUITS

O modelo SUITS foi desenvolvido a partir do modelo de Allen et al. (1970), chamado também de modelo AGR (de Allen, Gayle e Richardson).

Por sua vez, o modelo AGR foi desenvolvido a partir das equações de Duntley (1942), as quais derivaram-se das equações de KM.

Allen et al. (1970), utilizaram as equações de Duntley para incluir o efeito da reflexão do solo e para possibilitar o fornecimento dos valores de irradiância dentro do dossel, uma vez que as equações originais fornecem valores apenas para as regiões de contorno.

Assim, o modelo AGR baseia-se nas seguintes equações:

$$dI_n / dn = - (u' + B' + F') I_n';$$

$$dt / dn = F' I_n' - u t - B t + B s;$$

$$ds / dn = B' I_n' - u s - B s + B t.$$

Nestas equações, "I" refere-se ao fluxo incidente especular e, "t" e "s", aos fluxos difusos descendente e ascendente, respectivamente.

Para o fluxo especular temos:

u' é o coeficiente de absorção;

B' é o coeficiente de retroespalhamento;

F' é o coeficiente do espalhamento no sentido descendente.

Para o fluxo difuso:

u é o coeficiente de absorção;

B é o coeficiente de retroespalhamento.

Estes cinco coeficientes são determinados para a cultura em estudo, através de cinco medições independentes de irradiância transmitida no dossel.

Os autores encontraram que a luz especular é atenuada no dossel da seguinte ordem:

$$I' = I_0' \text{EXP}(-q_0' n \sec\theta_s),$$

onde:

θ_s é o ângulo zenital solar;

e n é o IAF acumulado.

Porém, a solução da equação acima é da forma:

$$I_n' = I_0' \text{EXP}(-q' n),$$

onde:

$$q' = u' + B' + F'.$$

Assim, temos que:

$$q' = q_0' \sec\theta_s,$$

e os três coeficientes se tornam:

$$u' = u_0' \sec\theta_s,$$

$$B' = B_0' \sec\theta_s,$$

$$F' = F_0' \sec\theta_s,$$

ou seja, os coeficientes dependem do ângulo solar.

Este modelo funciona como se existisse apenas uma classe de componentes, e os coeficientes não são derivados de propriedades espectrais e geométricas dos componentes do dossel. Desta forma, não permite avaliar os efeitos das variações dos parâmetros do dossel na reflectância. O fluxo que sai do dossel com direção ascendente é isotrópico e homogêneo. Portanto, o modelo não prevê variações da reflectância com o ângulo de visada.

Ao contrário do AGR, o modelo descrito por Suits (1972a), permite que exista mais de uma camada e que dentro da camada possa ter mais de um tipo de

componente. A característica não Lambertiana do dossel também é quantificada, uma vez que o modelo prevê modificações na reflectância devido à variação do ângulo solar e do ângulo de visada.

É um modelo unidimensional, para dossel com camadas horizontais extensas, cujos componentes estão aleatoriamente distribuídos. O modelo possui cinco equações com nove coeficientes. Para o cálculo dos coeficientes, os componentes são projetados no plano horizontal e em dois planos verticais perpendiculares entre si. Suas propriedades espectrais (reflectância e transmitância direcional hemisférica) são tomadas em laboratório.

Conforme Suits (1972a), a irradiância dentro do dossel (em $W.m^{-2}$) é dividida em três tipos de fluxo, e dada por três equações diferenciais com cinco coeficientes, as quais são:

$$dE_n(+d,i,x)/dx = -a_i E_n(+d,i,x) + b_i E_n(-d,i,x) + c_i E_n(s,i,x);$$

$$dE_n(-d,i,x)/dx = a_i E_n(-d,i,x) - b_i E_n(+d,i,x) - c_i' E_n(s,i,x)$$

$$dE_n(s,i,x)/dx = k_i E_n(s,i,x)$$

em que:

$E_n(+d)$ é o fluxo difuso ascendente;

$E_n(-d)$ é o fluxo difuso descendente e;

$E_n(s)$ o fluxo especular.

O subscrito n denota o componente espectral, enquanto que i e x são número de camada e a posição dentro da camada respectivamente. O dossel está localizado na parte negativa do eixo vertical, decrescendo de 0 (zero) no topo até o nível do solo.

Os coeficientes são determinados como segue:

$$a_i = [\sigma_h n_h (1-\tau) + \sigma_v n_v (1 - (\rho + \tau)/2)];$$

$$b_i = [\sigma_h n_h \rho + \sigma_v n_v (\rho/2 + \tau/2)];$$

$$c_i = [\sigma_h n_h \rho + (2/\pi) \sigma_v n_v (\rho/2 + \tau/2) \tan\theta_s];$$

$$c_i' = [\sigma_h n_h \tau + (2/\pi) \sigma_v n_v (\rho/2 + \tau/2) \tan\theta_s];$$

$$k_i = [\sigma_h n_h + (2/\pi) \sigma_v n_v \tan\theta_s];$$

onde:

oh é a área média das projeções no plano horizontal;

ov a área média das projeções nos dois planos verticais;

nh o número de projeções no plano horizontal por unidade de volume;

nv o número de projeções no plano vertical por unidade de volume e;

θ_s o ângulo zenital para o fluxo incidente especular;

ρ reflectância hemisférica direcional de folhas;

τ é a transmitância hemisférica direcional de folhas.

Estes coeficientes são determinados para as diversas camadas, e em 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.

Como condições de contorno, o modelo requer um fluxo incidente no topo igual a 1 (um) e fluxo incidente difuso igual a 0 (zero). Entre camadas, o fluxo incidente no topo de uma é igual ao fluxo descendente no fundo da camada anterior, e o fluxo ascendente inicial no fundo é igual ao fluxo ascendente no topo da camada inferior.

Para a reflectância devido ao fluxo incidente difuso o cálculo é realizado separadamente, e assume-se que a irradiância difusa sobre o dossel é isotrópica. Neste caso também o fluxo é colocado com valor 1 (um), para facilitar os cálculos.

Para o solo, a condição de contorno requer a soma das contribuições de reflectância deste solo, para fluxo incidente especular e difuso.

As equações diferenciais que descrevem os fluxos são resolvidas, e usando-se os coeficientes, calcula-se o fluxo isotrópico dentro de cada infinitesimal camada. Fluxo este que levaria à obtenção de valores iguais para a reflectância, independente do ângulo de visada.

Sabe-se porém que a reflectância de uma cobertura vegetal não é Lambertiana. Então, o modelo assume que este fluxo difuso isotrópico é apenas uma aproximação do fluxo real. Este fluxo isotrópico (irradiância) é usado para o cálculo da radiância para uma dada direção de visada, através da transformação em que $E = \pi L$ (L é a radiância), utilizando as propriedades geométricas e ópticas do dossel. Esta radiância é uma primeira aproximação para o fluxo não isotrópico, e ocorre devido à presença de componentes verticais no dossel (Suits 1972a; Suits 1972b).

Esta radiância não isotrópica é então utilizada como fonte, para novamente se calcular um segundo e mais aproximado valor para a radiância de cada infinitesimal camada. Assim, o processo é repetido iterativamente, até que se obtenha uma convergência para um dado valor. Este valor de radiância, obtido na última iteração, é utilizado para se calcular a radiância no topo do dossel, somando-se a contribuição de cada camada infinitesimal.

Suits (1972a) classifica este método de auto-consistente, uma vez que um fluxo incidente isotrópico, causa a radiância não isotrópica de uma camada infinitesimal, que por sua vez causará um fluxo também não isotrópico, e assim sucessivamente até que se consiga a convergência.

A radiância da camada, conforme mencionada acima, é dada pela equação (Suits, 1972a):

$$\Delta L_n = [u E_n(+d,x)/\pi + v E_n(-d,x)/\pi + w E_n(s,x)/\pi] \Delta x;$$

onde os coeficientes são:

$$u = \sigma_h \text{nh} \tau + \sigma_v \text{nv} (2/\pi) \tan\theta_o (\tau + \rho)/2;$$

$$v = \sigma_h \text{nh} \rho + \sigma_v \text{nv} (2/\pi) \tan\theta_o (\tau + \rho)/2;$$

$$w = \sigma_h \text{nh} \rho + \sigma_v \text{nv} (2/\pi) 2 \tan\theta_o \tan\theta_s (\tau + \rho)/2.$$

O coeficiente w foi modificado por Suits (1972b), para levar em conta a variação azimutal da reflectância. Foi introduzido o ângulo que é o ângulo azimutal entre o sol e a visada do sensor, variando de 0 a 180°. Porém, Suits (1983) modificou este coeficiente argumentando que a forma original estava errada.

Então a expressão correta para w é:

$$w = \sigma_h \text{nh} \rho + \sigma_v \text{nv} \tan\theta_o \tan\theta_s [(\text{sen}\psi + (\pi - \psi) \text{cos}\psi) \rho + (\text{sen}\psi - \text{cos}\psi) \tau]/2\pi.$$

Conforme Suits (1972b), a variação azimutal da reflectância se deve a uma maior ou menor contribuição da reflectância ou transmitância do fluxo especular incidente, sobre a componente vertical do dossel. Desta forma, o aumento da incidência de radiação difusa e uma maior contribuição de componentes horizontais no dossel tende a diminuir tal efeito.

A probabilidade de uma camada numa profundidade x ser vista de cima do dossel, em uma direção θ_0 é dada por $\text{EXP}(Kx)$, e a contribuição desta camada, para a radiância acima do dossel, é dada pela radiância na camada vezes a probabilidade do feixe não encontrar um obstáculo. Deste modo temos:

$$L_n(\text{acima do dossel}) = \text{EXP}(Kx) L_n(\text{na camada}).$$

sendo:

K e x o coeficiente de extinção e a espessura da camada, respectivamente.

O coeficiente K é semelhante ao coeficiente de extinção do fluxo direto, com a diferença de que agora é utilizado o ângulo zenital de visada:

$$K = \sigma_h n_h + (2/\pi) \sigma_v n_v \tan \theta_0].$$

Quando a camada de interesse está abaixo de mais de uma camada, deve-se somar os Kx de modo a se obter a probabilidade até o topo do dossel.

A radiância total é obtida pela soma das contribuições das camadas, mais a proveniente do solo.

A contribuição do solo para a reflectância total é dada por:

$$R_n(\text{solo}) = \text{EXP}(Kx) [\rho(\text{solo}) E_n(-d,i,x) + E_n(s,i,x)],$$

onde:

i e x denotam respectivamente a camada e a altura ao nível do solo.

Também neste caso, deve-se somar os Kx para obter a probabilidade total de o fluxo não ser interceptado até o topo do dossel. Como pode ser observado da equação anterior, o solo é considerado como sendo Lambertiano.

A reflectância do dossel é computada como:

$$R_n(\text{dossel}) = \pi L_n / E_n(s,0),$$

onde:

o denominador pode ser a unidade, o que facilita em grande quantidade os cálculos.

Suits (1972a) testou o modelo para uma cultura de milho com um mês de idade, e verificou a característica não Lambertiana do dossel, obtendo maior reflectância para maiores ângulos de visada. Verificou também a influência dos componentes verticais

na cultura, obtendo um comportamento menos Lambertiano quando se aumentou o número destes componentes em relação aos horizontais. No modelo, este comportamento é previsto pelos coeficientes u , v e w uma vez que são proporcionais à tangente do ângulo de visada θ_0 .

Kollenkark et al. (1982b) não encontraram aumento do fator de reflectância, na faixa espectral do vermelho, com o aumento do ângulo zenital solar, em cultura de soja com 100% de cobertura. No trabalho não foi mencionada a distribuição angular de folhas, sendo que este parâmetro é de grande importância na retirada de conclusões a respeito da variação da reflectância como função do ângulo de iluminação.

Suits (1972a), realizou simulações com o modelo para uma cultura de milho para verificar o efeito do ângulo zenital de visada, e observou um comportamento diferente para a reflectância calculada para a faixa do vermelho e infravermelho próximo (IVP). Segundo o autor, à medida que se aumentou o ângulo de visada foi observado uma diminuição na reflectância do vermelho e um aumento no IVP. O autor argumenta que isto se deve a uma menor contribuição do solo quando se aumenta o ângulo de visada. Como na região do vermelho aquele solo apresentava uma reflectância maior que a cultura, o aumento do ângulo de visada acarretou numa diminuição da reflectância pela menor contribuição do solo. O oposto é esperado em relação ao IVP, ou seja, uma maior contribuição da vegetação em uma faixa onde a sua reflectância é maior que a do solo, ocasiona uma maior reflectância total.

A distribuição angular de folhas também contribui, juntamente com o ângulo de visada, para a maior ou menor contribuição do solo. Assim, Goel e Strebel (1983) mencionam que a saturação da reflectância da vegetação ocorre para maiores valores de IAF, à medida que se tem uma maior contribuição de componentes verticais. Conforme os autores, nesta situação a radiação é menos absorvida pelos componentes do dossel na faixa espectral considerada.

Chance e LeMaster (1977), comparando a reflectância calculada pelo modelo SUITS com dados experimentais de campo nas culturas de trigo, não encontraram relação para a reflectância do trigo, em função do ângulo zenital do sol. Conforme Verhoef e Bunnik (1981), isto acontece devido à colocação da geometria das folhas apenas em projeções na vertical e na horizontal. Segundo Verhoef e Bunnik (1981), o modelo daria bons resultados apenas quando a cultura tivesse poucas folhas oblíquas.

Para ângulo de visada ao nadir e ângulo zenital solar de 42°, Chance e LeMaster (1977) observaram que o modelo superestimou a reflectância do trigo em todos os comprimentos de onda de 500 a 1000 nm. Entretanto, para a cultura do algodão e do trigo, os autores encontraram uma concordância entre a teoria da reciprocidade prevista pelo modelo para fluxo direto, e os resultados de campo.

Chance e LeMaster (1977) levantam também o problema de se utilizar duas camadas, quando os componentes variam as propriedades espectrais em função da altura no dossel. Os autores verificaram que para o algodão, a divisão do dossel em duas camadas e com um aumento de reflectância de folhas para a camada inferior, causou um aumento na reflectância total do dossel. Por outro lado, utilizando o mesmo banco de dados de variáveis agrônômicas e espectrais de uma cultura de soja, Chance e LeMaster (1985) e Badhwar et al. (1985) argumentam que o uso de uma camada, com apenas um tipo de componente, é o suficiente para a simulação do FRB, para o banco de dados que utilizaram.

LeMaster et al. (1980), fizeram comparações entre as reflectâncias obtidas pelo modelo SUITS e as medidas no campo para duas variedades de trigo, realizadas semanalmente durante o ciclo da cultura e somando 17 campanhas radiométricas. Obtiveram um coeficiente de determinação (r^2) médio de 0,88, para as regressões feitas separadamente para cada uma das 17 datas, utilizando dados radiométricos de 500 nm a 1150 nm com incrementos de 50 nm. Verificaram, também, que a resposta do modelo foi pior no início e no final do ciclo. Os autores atribuíram isto ao fato de que, nestas duas fases, a cultura tem pouca fitomassa verde e pouca cobertura do solo.

Chance e LeMaster (1985) testaram o modelo SUITS em soja, e obtiveram baixa proximidade entre a simulação e os dados medidos no campo. Encontraram maiores erros quando as medidas tomadas pelo sensor, foram feitas de frente ou de costas para o sol. Os autores concluíram portanto, que o modelo é inadequado para predizer a dependência da reflectância em relação ao azimute, e argumentam que isto ocorre porque se o fluxo incidente é especular, a reflectância e transmitância de folhas não é Lambertiana. Encontraram ainda que para todos ângulos de visada, os valores estimados para a reflectância, na banda IVP de 800 a 1100 nm, foram maiores do que aqueles obtidos com medidas tomadas no campo. Tal fato, levou-os à hipótese de que isto ocorre devido à baixa absorptância das folhas de soja para esta faixa do espectro, por serem de espessura fina. Ainda neste trabalho, os autores comentam o problema das diferenças de propriedades

ópticas das duas faces da folha de soja, principalmente para a reflectância na faixa do IVP, onde a face superior apresenta maiores valores do que a face inferior.

Uma propriedade do modelo SUITS, reportada por Chance e LeMaster (1977), é o fato de condizer com o princípio da reciprocidade para a reflectância. Por este princípio, conforme Chandrasekhar (1960), se a direção de incidência e emergência da radiação são trocados entre si, as funções de transmissão e retroespalhamento permanecem inalteradas.

Chen (1983), concluiu que a relação de reciprocidade, para a reflexão se mantém inalterada quando a incidência for totalmente especular, independente da reflectância do solo. Entretanto, o autor afirma que, para a transmissão, a reciprocidade se mantém apenas para um meio verticalmente uniforme e solo com reflectância zero. O autor menciona também, que a reciprocidade não acontece quando a contribuição relativa do fluxo difuso se torna significativa.

2.3.2 - MODELO SAIL

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 inclinação foliar (FDIF) (Verhoef e Bunnik, 1981). Os autores argumentam que a simplificação feita pelo modelo SUITS, colocando as folhas apenas como projeções horizontais e verticais é demais drástica. Assim, a utilização de uma FDIF para a obtenção da distribuição angular de folhas do dossel (DAF), é um meio de fazer com a arquitetura das plantas seja colocada de modo que as folhas estejam distribuídas em intervalos discretos de ângulos, de 0° a 90°.

O modelo SAIL inclui o SUITS como um caso especial, cujos coeficientes são relativos a um dossel com folhas completamente verticais ou horizontais. São utilizadas as mesmas equações diferenciais de Suits (1972a), com a diferença de que as 2 equações que definem a radiância, dentro da camada e fora do dossel, foram reunidas em uma e colocada na forma diferencial. As equações são quatro diferenciais lineares simultâneas que descrevem quatro fluxos, sendo apresentadas a seguir, conforme Verhoef (1984), onde se utiliza a simbologia de Bunnik (1978):

$$dE_s/dx = k E_s ;$$

$$dE/dx = -s E_s + a E_- - \sigma E_+ ;$$

$$dE_s/dx = s' E_s + \sigma E_- - a E_+ ;$$

$$dE_o/dx = w E_s + v E_- + u E_+ - K E_o . \quad (2.1)$$

Verhoef e Bunnik (1981), fizeram comparações entre os modelos SUITS e SAIL para estimar a reflectância da cultura do trigo, na região verde do espectro eletromagnético, com a função de distribuição angular de folhas esférica, e com ângulo zenital solar de 65°. Os autores obtiveram menores valores da reflectância com o modelo SUITS, quando se variou o ângulo de visada. A maior discrepância entre os dois modelos ocorreu quando o ângulo de visada foi próximo do nadir. Os autores argumentam que isto ocorreu devido à distribuição esférica das folhas ter uma maior fração de área foliar projetada na vertical, devido à simplificação feita pelo modelo SUITS. Ou seja, uma maior área foliar verticalmente orientada, fez com que uma menor fração de folhas fosse vista pelo sensor com visada vertical, na faixa do espectro onde a vegetação contribui mais que a superfície subjacente, levando a uma menor reflectância para o SUITS em relação ao SAIL.

Verhoef (1984), menciona que os coeficientes do modelo SAIL, quando calculados para uma vegetação com disposição das folhas totalmente horizontais ou verticais, são os mesmos do modelo SUITS. Verifica-se no trabalho de Verhoef (1984) que estes coeficientes não dependem dos ângulos de visada e de iluminação, quando as folhas estão todas na horizontal.

No modelo SAIL, a arquitetura do dossel também pode ser dividida em camadas com extensão infinita na horizontal, cujos componentes são pequenas folhas planas. As camadas são descritas morfologicamente: pelo IAF, pela função de densidade de inclinação foliar $f(\theta_i)$ e pela espessura da camada (h).

A través da função de densidade de inclinação foliar $f(\theta_i)$ é obtida a fração do IAF que está orientada de modo que a normal às folhas está dentro de um ângulo sólido. Esta fração do IAF (F) é expressa pela seguinte equação:

$$d^2 F(\theta_i, \phi_i) = F(d\phi_i/2\pi) f(\theta_i) d\theta_i,$$

onde:

θ_i é o ângulo de inclinação foliar e ϕ_i é o azimute foliar.

Entretanto, para a distribuição azimutal de folhas, o modelo assume que estas são uniformemente distribuídas em todas as direções.

É definido um sistema de coordenadas esféricas em que são colocados os vetores unitários para a visada, para iluminação à folha e para a normal à camada. Através deste sistema calcula-se o fator de conversão f_s , para corrigir a irradiância de uma dada direção sobre a camada de folhas, para aquela irradiância que incide sobre uma folha com inclinação θ_s , e o fator f_o para corrigir a radiância de uma folha com a inclinação θ_o , para a radiância da camada na direção de visada. Em ambos casos, um valor negativo implica que a iluminação ou observação é da face inferior da folha.

Para o fluxo difuso ascendente e descendente dentro do dossel (E_+ e E_-), os valores de irradiância da camada e das folhas são iguais, e assim os respectivos fatores de conversão assumem valor um.

Estes fatores de conversão são iguais à eficiência de extinção do fluxo pela folha, e portanto descrevem a capacidade da folha em interceptar o fluxo. São utilizados, junto com as propriedades geométricas do dossel (IAF e DAF), para deduzir os coeficientes de extinção da camada (k para fluxo incidente e K para o fluxo na direção do sensor). Estes coeficientes são dados por:

$$k(\theta_1) = (2/\pi) L' [(B_s - \pi/2) \cos\theta_1 + \text{sen}B_s \tan\theta_s \text{sen}\theta_1];$$

$$K(\theta_1) = (2/\pi) L' [(B_o - \pi/2) \cos\theta_1 + \text{sen}B_o \tan\theta_o \text{sen}\theta_1];$$

sendo:

$$L' = \text{IAF}/\text{altura};$$

$$B_s = \arccos(-1/\tan\theta_s \tan\theta_1);$$

$$B_o = \arccos(-1/\tan\theta_o \tan\theta_1).$$

Em ambos casos, quando $\theta_s + \theta_1$ e/ou $\theta_o + \theta_1$ são menores que $\pi/2$ deve-se colocar o valor de π para o respectivo B , pois não existe solução real para estas condições.

Para o cálculo dos coeficientes de espalhamento, são definidos também os fatores f_1 e f_2 . Estes fatores têm finalidade de definir a fração do hemisfério superior, que cada uma das duas faces da folha ocupa. Estão associados com o fluxo difuso incidente ou espalhado pelo respectivo lado, sendo que f_1 equivale ao lado que possui a maior parte do hemisfério.

Os coeficientes de espalhamento determinados pelas equações abaixo:

$$\sigma(\theta_i) = L' [(\rho + \tau)/2 + (\rho - \tau)/2 \cos 2\theta_i];$$

$$a(\theta_i) = L' [1 - (\rho + \tau)/2 + (\rho - \tau)/2 \cos 2\theta_i];$$

$$s'(\theta_i) = k(\theta_i) (\rho + \tau)/2 + L' \cos 2\theta_i (\rho - \tau)/2;$$

$$s(\theta_i) = k(\theta_i) (\rho + \tau)/2 - L' \cos 2\theta_i (\rho - \tau)/2;$$

$$v(\theta_i) = K(\theta_i) (\rho + \tau)/2 + L' \cos 2\theta_i (\rho - \tau)/2;$$

$$u(\theta_i) = K(\theta_i) (\rho + \tau)/2 - L' \cos 2\theta_i (\rho - \tau)/2;$$

$$w(\theta_i) = (L'/2 \pi) \{[\pi\rho - B_2 (\rho + \tau)] (2 \cos^2\theta_i + \sin^2\theta_i \tan\theta_s \tan\theta_o \cos\psi) + (\rho + \tau) \sin B_2 [(2 \cos^2\theta_i / \cos B_s \cos B_o) + \cos B_1 \cos B_3 \sin^2\theta_i \tan\theta_s \tan\theta_o]\},$$

onde:

ψ é o ângulo azimutal entre o sol e a visada;

$\sigma(\theta_i)$ é o coeficiente de retroespalhamento para o fluxo difuso;

$a(\theta_i)$ é o coeficiente de atenuação para os fluxos difusos;

$s(\theta_i)$ e $s'(\theta_i)$ são respectivamente os coeficientes de espalhamento (transmissão) e retroespalhamento para o fluxo especular;

$v(\theta_i)$ e $u(\theta_i)$ são os coeficientes de espalhamento para o fluxo difuso (reflexão e transmissão, respectivamente);

$w(\theta_i)$ é o coeficiente de espalhamento bidirecional para o fluxo especular.

Para os ângulos azimutais B_1 , B_2 e B_3 , Verhoef (1984) fornece uma tabela de decisão para determinar seus respectivos valores.

Os valores de ρ e τ são a reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas, as quais são consideradas difusoras perfeitamente Lambertianas, e sem diferenças nas propriedades ópticas entre as duas faces.

Verhoef (1984) menciona que o coeficiente de extinção na direção de visada $K(\theta_i)$, e o de espalhamento bidirecional $w(\theta_i)$ são os principais responsáveis pela sensibilidade do modelo à variação do ângulo de visada. O autor analisou estes coeficientes versus o ângulo de visada para diferentes θ_i , conforme pode ser visto na Figura 2.2.

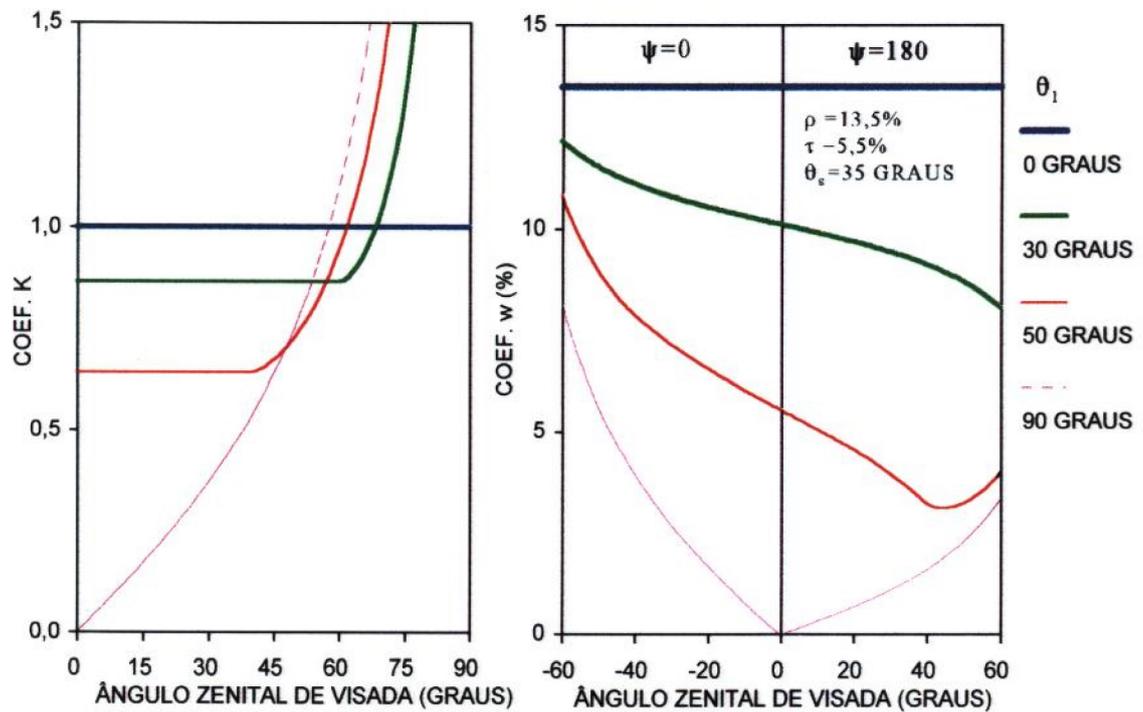


Fig. 2.2 - Coeficiente de espalhamento bidirecional $w(\theta_1)$, e coeficiente de extinção $K(\theta_1)$, para $L'=1/m$ como função do ângulo de visada, para diferentes ângulos de inclinação foliar.

Verifica-se na Figura 2.2, que para dosséis com todas folhas horizontais, os dois coeficientes permanecem constantes em função do ângulo de visada. Por outro lado, nota-se também a variação destes coeficientes aumenta em função do ângulo de visada, à medida que se aumenta o θ_1 .

A descrição mais próxima do real dos ângulos de inclinação foliar, é de fundamental importância para que se obtenha bons resultados na simulação. Deste modo, para descrever a arquitetura das plantas, Goel e Thompson (1984) mencionam que é mais conveniente utilizar uma distribuição angular de folhas contínua do que valores discretos, como é o caso da distribuição utilizada no modelo SAIL (Verhoef e Bunnik, 1981).

Goel e Strebel (1984) demonstraram que a distribuição beta, caracterizada por duas variáveis, aproxima bem a DAF para as arquiteturas de plantas, introduzidas por Idso e De Wit (1970), e também para valores medidos em dossel de soja.

No entanto, Badhwar et al. (1985) comentam que o modelo SAIL prediz melhor a reflectância se a inclinação de folhas for descrita pela função Delta de Dirac,

centrada no ângulo médio foliar. Isto significa utilizar o médio foliar para as simulações, em lugar da distribuição angular de folhas.

Ross e Marshak (1989) realizaram simulações do FRB no plano principal do sol utilizando um modelo que emprega o método de simulação Monte Carlo, para quatro diferentes DAFs. As distribuições angulares de folhas utilizadas têm diferentes graus de dispersão em torno do ângulo médio, porém com ângulo médio igual para as quatro distribuições (função Delta de Dirac, plagiófila, uniforme e extremófila). Os autores encontraram resultados, em que se verifica que apenas próximo ao "hot spot" o FRB calculado foi semelhante para as quatro DAF. As maiores diferenças foram observadas quando a visada foi de frente para o sol, em ângulos próximos ao valor do ângulo médio foliar, sendo que foram observados menores valores de FRB para as DAF com menor dispersão em torno do ângulo médio foliar.

Quanto à validação e comparação com outros modelos, Verhoef e Bunnik (1981), verificaram que o modelo SAIL não tem o comportamento verificado no SUITS, em que o gráfico do FRB como função do ângulo de visada do sensor tem o formato aproximado de "V". Os autores encontraram este resultado o trigo com IAF igual a 2 e DAF esférica, e argumentam que isto ocorre devido à grande presença de elementos verticais no dossel com DAF esférica.

Verhoef (1984) fez simulações para o SUITS e SAIL sob mesmas condições, concluiu que o SAIL teve um melhor desempenho, além de mostrar feições mais suaves com a variação do ângulo de visada.

Badhwar et al. (1985) fizeram um estudo comparativo entre o SAIL e o SUITS, através da comparação entre os dados de FRB medido em campo e os valores obtidos por simulação, para uma cultura de soja. Para a regressão entre FRB medido e FRB calculado pelo modelo SAIL, o r^2 foi de 0,506 e 0,773, para as faixas de 600 a 700 nm e 800 a 1100 nm, respectivamente. Os autores afirmam que o desempenho dos modelos pode ser bastante adequado, se o interesse está apenas no comportamento médio destes. Segundo os autores, ambos modelos têm deficiências que necessitam ser corrigidas, pois são muito genéricos. Segundo os autores, o modelo SAIL teve um desempenho melhor que o SUITS, por descrever melhor a arquitetura das plantas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO DE CAMPO

O experimento foi instalado na EMBRAPA/CPAC, localizada no município de Planaltina-Distrito Federal, cuja latitude é 15° 35' 30" S e longitude de 47° 42' 30" W. A área experimental caracteriza-se por apresentar um Latossolo Vermelho Escuro de textura argilosa, com vertente voltada para a direção 30° NE em relação ao Norte Magnético, e com declividade em torno de 4%. Análise química antes da instalação do experimento, revelou que o solo apresentava, em média, um pH em água de 5,8, saturação de alumínio de 0,14 me/100 ml, Ca + Mg de 2,35 me/100 ml, 36,55 microgramas/ml de K, e 8,13 microgramas/ml de P obtido com extrator MEHLICH.

O experimento consistiu de 30 parcelas sendo a metade irrigada. O tamanho de cada parcela foi de 40 m² (5m x 8m), com fileiras orientadas a 60° NO em relação ao Norte Magnético. O espaçamento entre fileiras foi de 0,5 m, e no plantio foram colocadas em média 20 sementes por metro linear de fileira. Cabe observar de antemão, que as parcelas 26, 27 e 29 tiveram uma população muito baixa, devido a falhas na germinação. A Figura 3.1 mostra a configuração do experimento.

Utilizaram-se, neste estudo, três níveis de fertilidade do solo, os quais foram obtidos através de uma adubação pesada, uma média e um nível sem adubação. A adubação pesada, por metro linear, consistiu de 45 g de superfosfato triplo, 100 g de superfosfato simples, 8,4 g de cloreto de potássio e 2 g de FTE - BR12 (adubo contendo micronutrientes). A adubação média, por metro linear, foi de 9 g de superfosfato triplo, 5 g de cloreto de potássio e 0,8 g de FTE - BR12.

Com a finalidade de garantir a correta distribuição do adubo nas fileiras, a mistura dos componentes químicos foi realizada individualmente, para cada 5 metros de fileira.

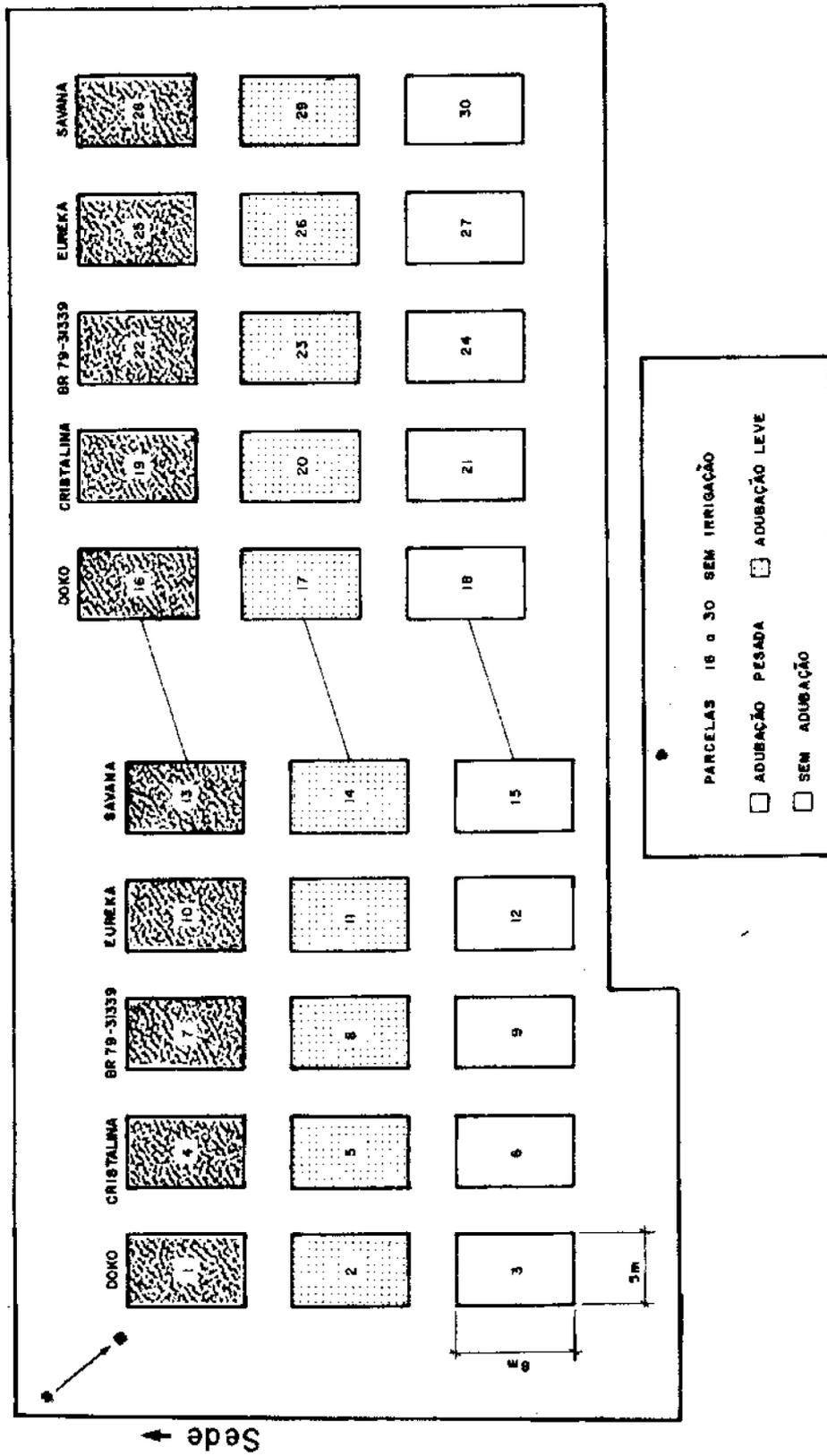


Fig. 3.1 - Configuração do experimento.

Utilizaram-se para este estudo, medidas radiométricas tomadas sobre cinco variedades de soja (Eureka, Savana, Cristalina, Doko e BR 79-31339). O experimento foi instalado para atender à análise de produtividade de diferentes variedades de soja por dados radiométricos, proposto pelo Projeto Estima (Estimativa de Produtividade Agrícola), realizado em convênio entre o INPE e a Fundação Banco do Brasil, com participação ativa da EMBRAPA/CPAC.

A duração do ciclo até a maturação e a altura média das variedades (à exceção da variedade BR 79-31339) são as seguintes:

- Eureka : 106 dias e 71 cm;
- Savana : 136 dias e 86 cm;
- Cristalina : 134 dias e 74 cm;
- Doko : 135-140 dias e 98 cm;

A variedade BR 79-31339, ainda em fase de teste, tem comportamento semelhante à Doko, em termos de ciclo e altura.

Normalmente o plantio da soja na região ocorre durante o período de outubro a meados de dezembro. Neste experimento o plantio foi realizado no dia 4 de janeiro de 1990. A razão do atraso foi devido a intensas chuvas, desde o final de outubro até o final de dezembro, o que não permitiu o preparo do solo e o plantio na época adequada. Entretanto, este atraso não acarretou problemas para o presente trabalho, uma vez que o desenvolvimento das plantas aconteceu normalmente.

No início do desenvolvimento da cultura foi necessário irrigar todo experimento, devido à ocorrência de um veranico (período seco), em uma época em que as plantas não resistiriam ao déficit hídrico. Para o manejo da irrigação, foram instaladas 3 baterias com 3 tensiômetros cada, nas parcelas 2, 8 e 14, nas profundidades de 10, 20 e 30 centímetros.

As práticas culturais empregadas no experimento (espaçamento, data de plantio, variedade, nível de fertilidade e disponibilidade de água) influenciam as características agronômicas das culturas (estágio de desenvolvimento, percentagem de cobertura, fitomassa, IAF), que por sua vez se manifestam no FRB da cultura (conforme Kollenkark et al., 1982a). Entretanto, para este estudo, assumiu-se que estes tratamentos culturais

se manifestaram apenas nas variáveis agronômicas IAF e percentagem de cobertura. O IAF foi medido no campo, e considerado nos modelos de simulação de reflectância, enquanto que a percentagem de cobertura interferiu apenas na primeira campanha radiométrica, uma vez que após esta o solo foi totalmente coberto pelas plantas.

3.2 - PARÂMETROS AGRONÔMICOS

Os parâmetros agronômicos necessários para entrada nos modelos em estudo são: índice de área foliar (IAF) e distribuição angular das folhas (DAF). Outros parâmetros tais como fitomassa fresca total, fitomassa fresca de folhas, fitomassa seca total, fitomassa fresca de folhas e produtividade de grãos, foram coletados para monitorar o crescimento das plantas e utilizados no Projeto ESTIMA, em trabalhos sobre crescimento e produtividade de plantas.

Cada parcela foi dividida em duas partes: uma destinada às medições radiométricas e outra, à coleta de plantas para obter os parâmetros agronômicos que necessitam ser trabalhados em laboratório. A parte destinada à coleta de plantas foi demarcada, com o auxílio de fitas e estacas, após as plantas terem germinado, de modo que para cada data de amostragem, já se sabia o local e tamanho da amostra a ser coletada. A Figura 3.2 ilustra como foram distribuídas estas áreas dentro da parcela.

Os processos envolvidos na obtenção das medidas agronômicas tais como IAF e fitomassa (fresca e seca, da planta toda e de folhas) seguem a metodologia utilizada por Izumiyama (1990). Para cada parcela, a metodologia de obtenção dos dados é descrita a seguir.

Uma amostra de 1,4 m² foi coletada, embalada em sacos plásticos e levada ao laboratório, onde foi feita uma primeira pesagem, para obtenção da fitomassa fresca total. Em seguida, retirou-se uma sub-amostra de cada parcela e colocou-se em outro saco plástico para ser pesada. Pesou-se também o resto da amostra para obter a percentagem sub-amostrada. As folhas da sub-amostra foram destacadas das hastes, e nesta fase as folhas cloróticas foram separadas das verdes, para se medir sua área e levar à estufa, possibilitando a determinação do índice de área foliar clorótico.

As folhas verdes foram então pesadas, para se ter a fitomassa de folhas frescas. As outras partes da planta foram levadas à estufa em embalagens de papel para secagem. Das folhas retiradas da amostra, uma parte era destinada à medição de área foliar, e o restante enviado à estufa para secagem. As folhas cuja área foi medida, foram levadas

também à estufa para obter a razão entre área foliar e massa foliar seca. Quando necessário, o material fresco foi colocado em câmara fria até a hora da manipulação, a uma temperatura de 5° C em média.

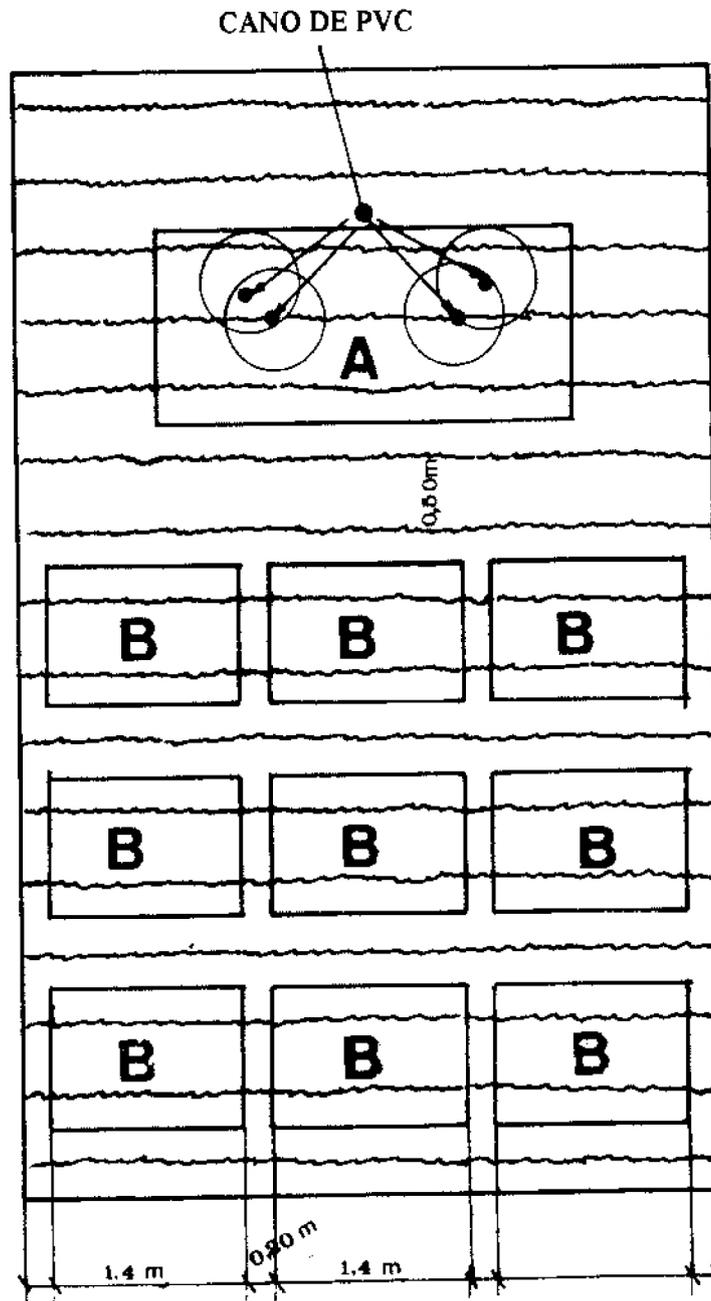


Fig. 3.2 - Esquema de uma parcela. A é a área destinada às campanhas radiométricas e colheita de grãos, e B é a área destinada à coleta de plantas para serem processadas em laboratório.

O tempo de permanência na estufa para secagem foi de no mínimo 72 horas, a uma temperatura de 65° C. e com circulação de ar. Ao serem retiradas da estufa, as amostras foram levadas para pesagem em caixas de isopor, com a finalidade de não absorver umidade do ar.

Até a data de 08/03 o medidor de área foliar (AF) foi um equipamento em que a área final é dada por:

$$AF = (1500 (A-B)) / (P-B)$$

onde:

A é a leitura referente à amostra de folhas;

B é a leitura do equipamento para o plástico que envolveu as folhas;

P é a leitura quando são passados cartões que somavam uma área igual a 1500 cm².

Após a amostragem do dia 08/03 foi utilizado outro equipamento, para o qual se necessita aplicar a cada leitura um fator referente à leitura de cartões com áreas conhecidas. Verificou-se utilizando cartões de área conhecida que os dois equipamentos forneciam resultados similares.

O índice de área foliar (IAF), que é a área de folhas dividido pela área de solo subjacente, é igual a:

$$IAF = \frac{MSF(g)}{1,4(m^2)} \frac{AF(cm^2)}{MS(g)} \frac{1}{10000}$$

onde:

MSF é a massa seca das folhas da amostra toda;

AF é a área foliar da sub-amostra;

MS é a massa seca das folhas usadas para medir área foliar;

e 1,4 é a área da amostra.

Em todas etapas acima descritas, utilizaram-se embalagens com tara conhecida. No caso das embalagens destinadas às folhas cloróticas, houve necessidade de se aplicar um fator multiplicativo à tara, devido à perda de água das embalagens, e a massa foliar muito baixa das amostras. As embalagens para as outras partes da planta não

necessitaram deste fator, porque a massa perdida foi insignificante, em relação à massa da amostra.

Apesar de ter sido medido o IAF clorótico, este não foi incluído no modelo por ter valores extremamente baixos ou, na maioria dos casos, inexistente. Por isso, acredita-se que sua contribuição não chega a ser significativa para o FRB_n da cultura.

Nas datas em que o material não foi coletado no mesmo dia da campanha radiométrica, o IAF foi obtido por interpolação. O objetivo foi de obter valores de IAF mais próximos àqueles do dia em que foi realizada a radiometria.

Após cada campanha de radiometria foi tirada uma fotografia vertical no local da medição, com o intuito de se obter a percentagem de cobertura do solo e também determinar a função de distribuição angular de folhas que melhor se ajustava a cada parcela. No entanto, nas campanhas de 05/03/90, 09/03/90 e 14/03/90, não foram obtidas fotografias verticais, devido a problemas com a máquina fotográfica. Nestes casos, foram tomadas as medidas do dia mais próximo em que se tem a fotografia.

Para a determinação da distribuição angular de folhas (DAF) foram utilizadas as funções introduzidas por Idso e De Wit (1970), sendo que o tipo de função a ser utilizada se baseou na observação de fotografias verticais da cultura. Conforme Bunnik (1978), estas arquiteturas foliares são dadas pelas seguintes funções de densidade de probabilidade:

$$\text{Planófila : } f = (2/\pi) (1 + \cos(2\theta_i));$$

$$\text{Erectófila : } f = (2/\pi) (1 - \cos(2\theta_i));$$

$$\text{Plagiófila : } f = (2/\pi) (1 - \cos(4\theta_i));$$

$$\text{Extremófila : } f = (2/\pi) (1 + \cos(4\theta_i));$$

$$\text{Esférica : } f = \text{sen}(\theta_i);$$

$$\text{Uniforme : } f = 2/\pi . \tag{3.1}$$

Estas funções foram integradas em intervalos de 10° para a faixa de 0° a 90°, de modo a se obter as frações de área foliar dentro de cada intervalo de ângulo, as quais serviram de entrada para o modelo SAIL. Cabe observar que o modelo SAIL implementado em computador, toma a fração de folhas de 80 a 90°, e a distribui em 5

intervalos de 2°, portanto os cálculos dos coeficientes levam em consideração uma DAF distribuída em 13 intervalos de ângulos. Segundo Verhoef e Bunnik (1981), isto se deve ao fato de que a reflectância calculada para ângulos de visada do sensor próximos ao nadir, são muito sensíveis a variações na DAF em ângulos foliares próximos à vertical.

No caso do modelo SUITS, utilizou-se esta DAF para se calcular ângulo médio foliar (θ_f), que por sua vez foi utilizado para calcular a área foliar projetada na horizontal e na vertical. O cálculo de θ_f é feito através do somatório de 0° a 90°, do produto da multiplicação da fração de folhas no intervalo pelo ângulo médio do intervalo correspondente. Na Figura 3.3 é mostrada a função densidade de probabilidade para ângulos de folhas, e distribuição acumulada de folhas, como função do ângulo foliar.

No modelo SUITS foram utilizados os coeficientes H (=oh nh) e V (=ov nv), que representam a área foliar por volume (ou IAF por espessura da camada), projetada na horizontal e nos dois planos verticais respectivamente. Estes coeficientes foram obtidos a partir do ângulo médio foliar (θ_f), utilizando as equações fornecidas por Bunnik (1978), mostradas abaixo:

$$IAF = (H^2 + V^2)^{1/2} / s$$

$$\theta_f = \arctan(V/H),$$

onde:

s é um fator menor que 1;

e θ_f é o ângulo foliar médio.

Resolvendo o sistema acima temos que:

$$H = (IAF s) / (\tan(2\theta_f) + 1)^{1/2};$$

$$V = H \tan\theta_f.$$

Para o fator s, são dados os seguintes valores, conforme Bunnik (1978): planófila (s=0,949); eretófila (s=0,949); plagiófila (s=0,960); extremófila (s=0,840); esférica (s=0,931); uniforme (s=0,900).

Quanto à distribuição azimutal de folhas, Badhwar et al. (1985) afirmam que a soja é heliotrópica não tendo, portanto, distribuição homogênea. Entretanto, Blad e Baker (1972) encontraram uma distribuição sem nenhuma direção preferencial.

Segundo Blad e Baker (1972), a pequena tendência verificada na orientação ocorreu devido à direção do vento prevalecente nas condições do experimento.

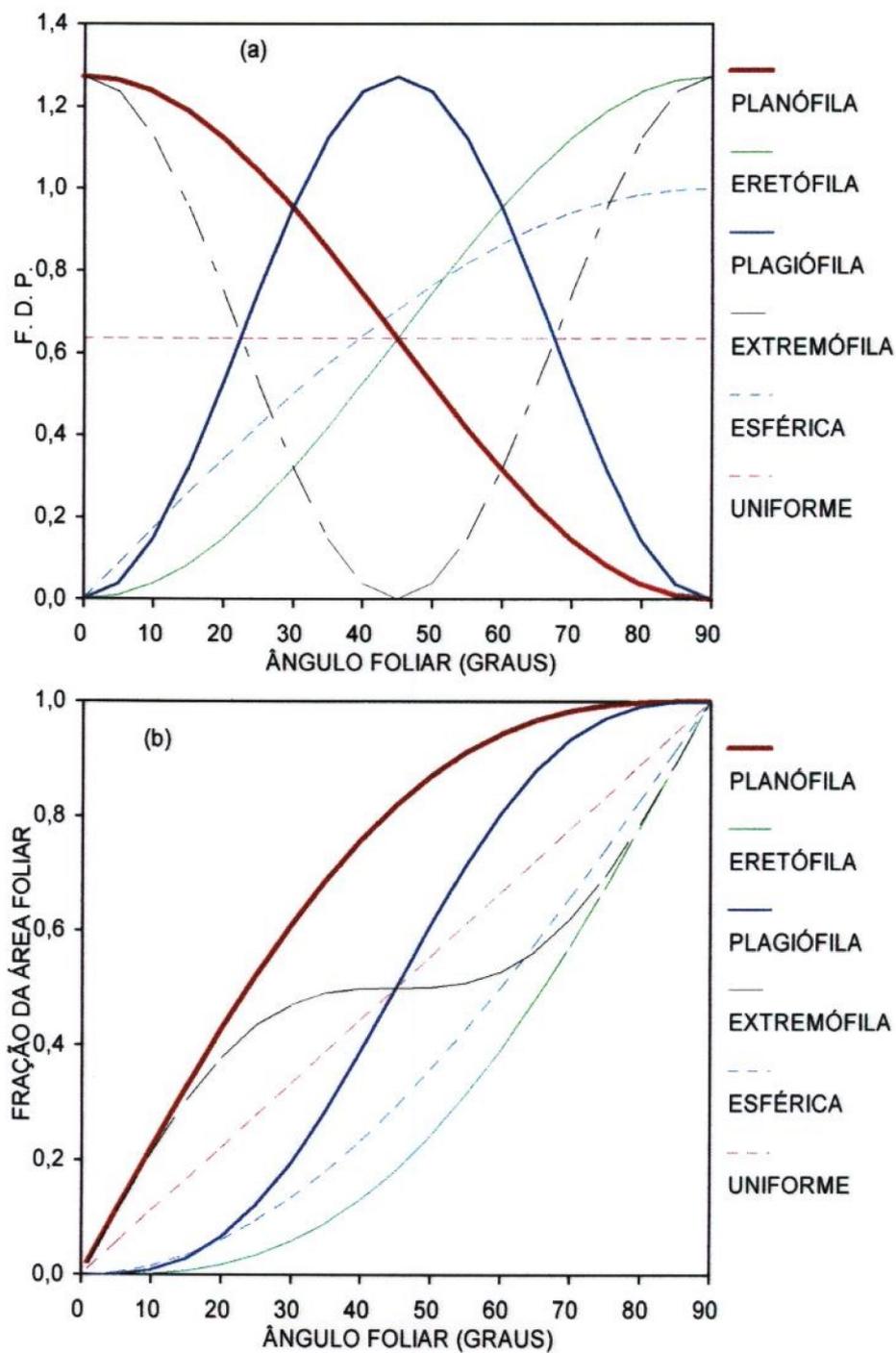


Fig. 3.3 - Distribuição angular de folhas (DAF): a) função densidade de probabilidade (FDP), calculada através das equações 3.1; b) distribuição acumulada de folhas.

Por outro lado, Kimes e Kirchner (1983) mostraram que durante o dia, as folhas de soja apresentam variações nos ângulos de inclinação e de azimute, devido ao heliotropismo e condições tais como "stress". Segundo os autores, as medições de ângulos foliares não devem ser realizadas separadamente para inclinação e azimute. Para retratar a variabilidade que ocorre durante o dia, tais coletas de dados não devem ser realizadas durante apenas um período do dia.

Entretanto, neste trabalho foi considerado que a distribuição azimutal das folhas é isotrópica, pois este parâmetro não foi medido no instante da medida radiométrica, e também porque os modelos implementados não estão adaptados para se trabalhar com distribuição azimutal não isotrópica de folhas.

3.3 - PARÂMETROS ESPECTRAIS

Os parâmetros espectrais de entrada para os modelos SUITS e SAIL, são a reflectância direcional hemisférica (REF) de folhas, transmitância direcional hemisférica (TRANS) de folhas, e reflectância do solo. O solo é considerado Lambertiano, portanto é utilizado o FRB em lugar da reflectância. Estes parâmetros de entrada para os modelos, devem ser medidos nas mesmas faixas do espectro eletromagnético, e de preferência na mesma largura de banda em que se vai medir FRB do dossel.

3.3.1 - REFLECTÂNCIA E TRANSMITÂNCIA DIRECIONAL HEMISFÉRICA DE FOLHAS

Neste trabalho REF e TRANS das folhas, utilizadas como entrada para as simulações com os modelos SUITS e SAIL, foram tomadas por Rudorff e Batista (1990) no ano de 1990, sobre a variedade Clark. Para determinar estes parâmetros, Rudorff e Batista utilizaram o SPECTRON SE-590¹⁾, ao qual foi adaptado uma esfera integradora LICOR 1800-12.

A razão de se utilizarem estes dados se deve à não disponibilidade de uma esfera integradora por ocasião da coleta dos dados de campo, para realizar medidas de REF e TRANS nas folhas das cinco variedades de soja consideradas neste trabalho.

⁽¹⁾ Marcas e modelos dos equipamentos mencionados neste trabalho são para benefício do leitor e não recomendação do autor.

A variedade Clark foi plantada em 05 de junho de 1990 e não recebeu nenhum tratamento especial. Foram feitas medições nas folhas do quinto nódulo contado do ápice, nos dias 31 de julho (início da fase reprodutiva), 14 de agosto, 28 de agosto e 07 de setembro (fase de floração plena).

Para que houvesse concordância nas fases de desenvolvimento entre a variedade Clark com aquelas do experimento de campo, utilizou-se, no modelo, a REF e TRANS obtidas da variedade Clark referente à data mais próxima em termos de dias após o plantio. Isto foi necessário porque as datas de plantio da variedade Clark e daquelas utilizadas no experimento de campo não foram coincidentes. Entretanto, foi observado que não houve grandes diferenças na REF e TRANS das folhas da variedade Clark entre as quatro datas utilizadas.

3.3.2 - REFLECTÂNCIA DO SOLO

Como o FRB do solo é um dado de entrada para o modelo SUITS e SAIL, este foi determinado a partir de medidas radiométricas realizadas sobre o "solo nu", no início e no final de cada campanha radiométrica, em local do lado do experimento de campo. Esta área foi mantida sempre livre de ervas daninhas e de restos culturais, e mantido sempre com o mínimo de rugosidade possível. Assumiu-se que o solo é Lambertiano e que, para a utilização nos modelos, as características espectrais do local onde foram realizadas as medições são iguais àquelas do solo onde eram realizadas as medições radiométricas sobre a soja. As medições foram realizadas com o mesmo equipamento utilizado para as medições de FRB do dossel e da percentagem de fluxo difuso, no caso o SPECTRON SE-590.

Entretanto, das 12 campanhas radiométricas, as medidas de FRB do solo realizadas em 03/03/90, em 02/04/90 e em 03/04/90 foram perdidas, por terem sido gravadas em fitas que estavam com problemas no início, e, também devido ao aparecimento de nuvens no final da campanha, impedindo a medição radiométrica. Neste caso foram utilizadas as medidas tomadas na campanha anterior ou posterior, tendo em vista que as propriedades espectrais dos solos não variam rapidamente, desde que esteja em condições semelhantes de umidade, rugosidade e conteúdo de matéria orgânica.

3.4 - PARÂMETROS DE ILUMINAÇÃO E DE VISADA

Estes parâmetros incluem o fluxo difuso, o ângulo de iluminação e o ângulo de visada.

3.4.1 - FLUXO DIFUSO

O fluxo difuso pode ser medido sombreando-se a placa de referência, como fez Ranson et al. (1984), ou sombreando-se o coletor coseno. Os valores obtidos são transformados em percentagem.

Para entrada em ambos modelos, utilizou-se a média de percentagem de fluxo difuso, de 8 medidas realizadas no campo, sombreando-se a placa de sulfato de bário, antes e depois de realizar as medidas na cultura. A média foi utilizada porque em algumas datas os dados para obtenção deste parâmetro foram perdidos, e também porque foi impraticável a obtenção de uma medida para cada parcela, durante a campanha radiométrica. A Figura 3.4 contém as curvas da percentagem (máxima, média e mínima) do fluxo difuso (PDIF) medido na placa de sulfato de bário.

3.4.2 - ÂNGULOS DE ILUMINAÇÃO E DE VISADA

O ângulo zenital solar (θ_s) foi obtido através de programa de computador, tendo como entrada as coordenadas geográficas do local, data e horário das medições. Através deste programa, foi calculado o ângulo zenital solar (θ_s) para cada parcela onde foi realizada medida radiométrica. Embora os modelos SUTS e SAIL levem em consideração este fator, foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar se houve tendência de variação no FRB calculado com a variação de θ_s . Isso foi feito porque uma campanha demorava em torno de uma hora e meia para todas parcelas, fazendo com que houvesse uma grande variação no ângulo solar, da primeira para a última parcela medidas.

As medições foram realizadas sempre com visada ao nadir, sendo o ângulo zenital de visada (θ_v) igual a zero. Portanto, não é definido o ângulo azimutal de visada e não é definida também a diferença de azimute entre o sol e a visada, que entra nos dois modelos utilizados neste trabalho.

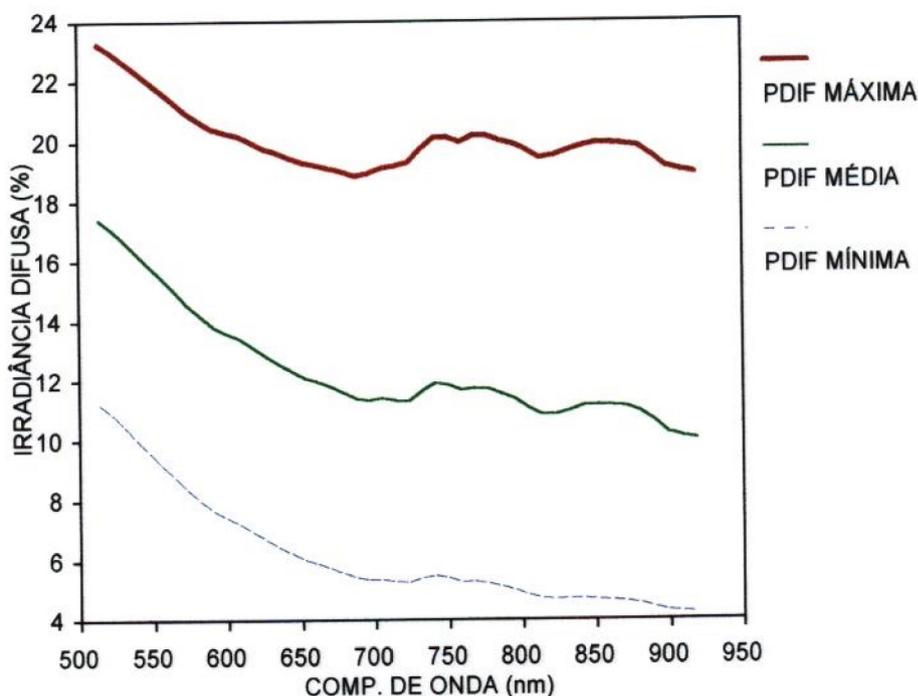


Fig. 3.4 - Percentagem dos fluxos difusos mínimo, médio e máximo, medidos sombreando-se a placa de sulfato de bário.

3.5 - MEDIDAS DO FATOR DE REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL ESPECTRAL (FRB_b) DO DOSSEL

Para a avaliação de um modelo é necessário que se façam medições do parâmetro que ele é capaz de simular, para permitir a validação do modelo. Como os objetivos deste trabalho são a avaliação dos modelos de simulação de reflectância SUITS e SAIL e a comparação entre eles, foram feitas medições do FRB do dossel, para as mesmas condições utilizadas nas simulações.

O equipamento usado para as medidas radiométricas foi o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590, composto das seguintes partes:

- unidade controladora CE 500 (LARAD 02:00);
- cabeça leitora CE 390-WB (LARAD 02:02), equipada com coletor coseno (LARAD 02:05);
- cabeça leitora CE 390-WB (LARAD 02:03), com lente objetiva de 15° (LARAD 02:04).

A faixa de atuação deste equipamento vai de 369,4 nm a 1113,7 nm, dividida em um total de 252 bandas, com largura nominal de 2,95 nm e largura real de 8 nm aproximadamente. A leitura é realizada ao mesmo tempo em todas bandas, graças a uma grade de difração. O intervalo de tempo entre medidas sucessivas é de aproximadamente 8 segundos.

Conforme foi constatado por Rudorff e Batista (1990) em campanhas anteriores, as medidas realizadas com este equipamento a partir de 900 nm não eram confiáveis devido a problemas de harmônico na grade de difração. Assim, colocaram-se filtros amarelos W_12 (menos azul) nas duas cabeças leitoras. Mesmo assim, verificou-se que a faixa espectral útil variou de 514,0 nm a 920,7 nm. Isto foi observado nas curvas espectrais obtidas nas parcelas e também através dos coeficientes de determinação (r^2), obtidos da regressão entre o coseno do ângulo zenital e a razão entre coletor coseno e placa de referência, que no caso foram baixos demais. Desta faixa útil utilizou-se de uma a cada 3 bandas espectrais, totalizando desta maneira 46 bandas com início em 514,0 nm e final em 918,6 nm.

Como referência, foi utilizada a placa de sulfato de bário LARAD 90:12, cuja calibração foi realizada no LARAD (INPE) dia 10/11/89, em relação a um padrão de laboratório.

Para a realização das medições, as 2 cabeças leitoras do SPECTRON SE-590 foram fixadas sobre um mastro de elevação de 3 m de altura, juntamente com uma máquina fotográfica. Em uma cabeça leitora a objetiva apontava para o nadir, integrando uma área circular de 0,5 m² no solo. A outra cabeça leitora, com um coletor coseno, fazia a leitura da irradiância imediatamente antes de cada leitura feita no alvo. Quando a cultura atingiu aproximadamente 0,5 m de altura, o mastro foi elevado em 0,5 m para que não houvesse muita variação da área integrada no topo da cultura.

Para que as medidas radiométricas fossem tomadas no mesmo local, fixou-se um cano de PVC de 50 cm de comprimento, com 10 cm acima do solo. O mastro foi colocado neste cano e girado para se fazer 4 pares de medidas coletor coseno/alvo, em pontos diferentes dentro da parcela, sendo 2 pares com o centro do FOV sobre a fileira e 2 na entrelinha. Conforme Daughtry et al. (1982), este procedimento permite obter um menor coeficiente de variação em relação a outros tipos de amostragens utilizados. Com isso visou-se uma maior representatividade dos dados radiométricos referentes à parcela,

quando ainda se tinha a estrutura de fileiras. A Figura 3.2 da página 41 ilustra esta configuração.

As medições foram quase sempre realizadas na parte da manhã a partir das 9 horas, à exceção de uma campanha que foi realizada à tarde. Procurou-se sempre realizar as campanhas com céu limpo. Entretanto, em alguns casos a percentagem de céu limpo foi de aproximadamente 60 a 80%. Nesta condição, tomou-se cuidado de não fazer medições quando as nuvens estivessem próximas à direção do sol.

O fato de o disco solar estar livre da influência das nuvens evita a interceptação de uma grande parte da radiação difusa, uma vez que grande quantidade deste fluxo difuso está nas proximidades do disco solar (Turner et al. 1971). Conseqüentemente, nuvens próximas do horizonte não alteram em muito a característica direcional do fluxo (Robinson e Biehl, 1979).

Entretanto, as nuvens causam uma alteração na qualidade da irradiância, uma vez que estas atuam como uma fonte direcional que contribui com fluxo difuso. Deste modo, devido ao aparecimento de excesso de nuvens, em algumas campanhas radiométricas não foi possível se fazer as medidas em todas parcelas. Quando as condições de cobertura de nuvens permitia, estas campanhas foram completadas no dia seguinte.

O número total de medias radiométricas realizadas totalizou 215. Entretanto, antes de se analisar os dados, foi realizada uma análise de regressão para cada comprimento de onda separadamente, em que a variável dependente era o FRB calculado e a independente o FRB medido. Esta teve o objetivo de se analisar os resíduos de cada regressão versus a ordem cronológica de obtenção dos dados, versus a variável independente do modelo de regressão, e versus o valor estimado para o FRB medido (conforme Draper e Smith, 1966). Para cada comprimento de onda, esta análise foi realizada primeiramente com os dados de cada campanha separadamente, e depois utilizando todas campanhas na regressão. Com isto constatou-se que algumas parcelas apresentaram comportamento muito distantes das demais, com valores de resíduo muito altos ou muito baixos ("outliers"), no caso das de número 26, 27 e 29 por terem uma baixa população de plantas, e outras devido à constatação de problemas na gravação dos dados pelo equipamento utilizado nas medidas radiométricas. Deste modo, restaram 193 parcelas para serem analisadas.

Para a obtenção do fator de reflectância bidirecional espectral (FRB_n) do dossel e do solo, foi utilizada a metodologia proposta por Duggin (1980), a qual utiliza a seguinte equação:

$$FRB_n = (L_n(\text{alvo})/E_n) C_n F_n \quad (3.2)$$

onde:

n = comprimento de onda;

$L_n(\text{alvo})$ = radiância refletida pelo alvo na direção do sensor;

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

C_n = fator de calibração entre as duas cabeças leitoras;

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

O fator de calibração entre as duas cabeças leitoras (C_n), foi calculado para cada medida e para cada comprimento de onda, através de equações de regressão linear. A variável independente destas equações é o coseno do ângulo zenital solar (θ_s) da medida para a qual se deseja calcular o FRB.

Para cada comprimento de onda, estas equações de regressão expressam a dependência do fator C_n em relação a θ_s . Os coeficientes "a" e "b" são obtidos pela regressão entre θ_s e a razão $E_n(\text{coletor coseno})/L_n(\text{placa})$, para um dia com céu totalmente limpo. Para isto, foram utilizados 36 pares de medidas de coletor coseno (cc) e placa de sulfato de bário (pl), tomadas de 8:53 às 12:00 horas a cada 5 minutos no dia 23/04/90. Assim, para cada comprimento de onda, foi realizada uma regressão entre a razão E_n/L_n e o coseno de θ_s , para obtenção dos coeficientes da reta, os quais foram utilizados juntamente com o ângulo θ_s de cada medida radiométrica para o cálculo do FRB_n .

O fator de calibração estimado é função dos coeficientes "a" e "b" da reta de regressão e do coseno de θ_s . Logo, a expressão 3.2 pode ser descrita da seguinte forma:

$$FRB_n = (L_n(\text{alvo})/E_n) (a + b \cos\theta_s) F_n \quad (3.3)$$

Como $FRB_n = (L_n(\text{alvo}) F_n) / L_n(\text{placa})$, então $(a + b \cos\theta_s)/E_n$ deve ser igual a $1/L_n(\text{placa})$.

Porém, $(a + b \cos\theta_s)$ é igual a $E_n(\text{cc})/L_n(\text{placa})$. Substituindo esta variável na equação 3.3, demonstra-se que o procedimento de calibração entre as duas

cabeças leitoras visa obter o valor da leitura da placa de sulfato de bário, que seria obtido no momento em que se obteve a leitura do coletor coseno.

A grande vantagem de se utilizar o método proposto por Duggin (1980) foi por ser prático para a obtenção das medidas, tornando as campanhas radiométricas mais rápidas.

3.6 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS

A versão do SUITS utilizada neste trabalho foi implementada em FORTRAN, para até cinco camadas de folhas, com até cinco componentes por camada. O programa fornece separadamente como resultado, o FRB para o fluxo 100% direto, e o FRB hemisférico direcional para o fluxo 100% difuso.

Neste trabalho, a implementação foi modificada para calcular o FRB total do dossel, para uma dada percentagem de fluxo difuso. Foram acrescentadas rotinas que tornam o programa mais dinâmico. Estas rotinas permitiram que os cálculos fossem feitos para o número de parcelas e de arranjos de ângulos por parcela que se desejar, e para até 260 bandas espectrais.

O modelo SAIL também foi implementado em FORTRAN, e na versão original os cálculos são realizados para uma única camada, na qual os únicos componentes considerados são as folhas. Os cálculos são realizados para 4 bandas Landsat, com o número variável de arranjos de ângulos de iluminação e visada. Os resultados são o FRB total, para as 4 bandas e para todos arranjos de ângulos colocados no arquivo de entrada, e os respectivos valores do índice de vegetação "greenness".

No trabalho isto também foi modificado, permitindo realizar cálculos para o número de bandas e número de parcelas que se desejar.

Ambos programas foram também modificados, para aceitarem nomes de arquivos diferentes. Isto facilitou sobretudo o manuseio dos dados. O Apêndice A contém as listagens dos códigos FORTRAN, para os dois modelos.

Para os dois modelos, é assumido na implementação computacional que a primeira iteração do método auto-consistente, dá uma boa aproximação para os fluxos dentro do dossel. A partir da radiância fornecida por esta primeira iteração nas camadas é calculada a radiância total do dossel, somando-se as contribuições de todas camadas e do solo, na direção de visada.

Foram desenvolvidos programas em TURBO PASCAL, para colocar os dados em formato e disposição adequados para o tratamento.

3.7 - METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A comparação entre os dados simulados e medidos no campo se deu de duas formas: por parcela e por comprimento de onda.

Na análise por parcela, o FRB_n medido e calculado foram comparados separadamente para cada medida radiométrica em uma parcela, utilizando todos 46 comprimentos de onda de 514,0 nm a 918,6 nm.

Na análise por comprimento de onda, os dados de todas as 193 parcelas foram agrupados e analisados em conjunto, para cada comprimento de onda.

Estas análises para verificar o desempenho dos dois modelos, consistiram em observar os seguintes diagramas de dispersão: do FRB calculado versus o medido no campo; do erro e da percentagem de erro.

Posteriormente, para se ter uma idéia do desempenho alcançado pelos dois modelos ao longo da faixa do espectro considerado, fez-se uma análise com base: no coeficiente de determinação (r^2); na raiz do erro percentual médio quadrático (%RMSE); e nos coeficientes "a" e "b" da reta de regressão.

As análises de regressão e do cálculo do %RMSE, foram realizados para cada comprimento de onda, utilizando-se dos dados das 193 parcelas provenientes das 12 campanhas radiométricas realizadas no campo.

3.7.1 - FRB CALCULADO PELOS MODELOS SUITS E SAIL VERSUS FRB MEDIDO NO CAMPO

Foram verificados em gráficos, os valores de FRB_n calculado por comprimento de onda e versus o FRB_n medido para algumas parcelas, com a finalidade de verificar o comportamento geral dos modelos. Esta análise permitiu observar apenas uma avaliação qualitativa, de como os modelos se comportaram ao longo do espectro.

3.7.2 - ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE FRB MEDIDO NO CAMPO E FRB CALCULADO PELOS MODELOS (ERROS)

Para cada comprimento de onda e para cada parcela, de 1 a 193, foi calculado o erro (FRB_n medido - FRB_n calculado) e a percentagem de erro. Esta análise envolveu gráficos e tabelas.

A percentagem de erro é dada por:

$$\text{Erro}_n(\%) = 100 (FRB_n(\text{medido}) - FRB_n(\text{calculado})) / FRB_n(\text{medido})$$

A percentagem de erro tem a vantagem de permitir a verificação das tendências dos erros do modelo em termos relativos. Uma percentagem de erro negativa indica que o modelo está superestimando o FRB do alvo. Ao contrário, se for positiva, significa que está subestimando-o.

3.7.3 - RAIZ DO ERRO PERCENTUAL MÉDIO QUADRÁTICO (%RMSE)

O RMSE (de "root mean square error") é uma outra medida do erro entre FRB medido e calculado, sendo seu cálculo dado pela seguinte fórmula (Goel 1988, Goel e Strebel 1983):

$$RMSE_n = (\Sigma[FRB_n(\text{medido}) - FRB_n(\text{calculado})]^2 / N)^{1/2}$$

onde:

N é o número de pares de medido e calculado, que, neste caso, são 193.

Entretanto, para o presente trabalho os cálculos foram normalizados de modo que a percentagem de erro foi utilizada em lugar do erro. O motivo desta substituição é porque as parcelas em que foram realizadas as medições radiométricas, diferiram-se quanto às suas características, principalmente o IAF, o que pode afetar o erro absoluto e não necessariamente a percentagem de erro.

3.7.4 - ANÁLISE DA REGRESSÃO ENTRE O FRB CALCULADO PELOS MODELOS E O FRB MEDIDO NO CAMPO

Neste trabalho foi utilizada a regressão linear simples calculada pelo método dos mínimos quadrados (Zar, 1974; Draper e Smith, 1966). Esta foi realizada de duas maneiras: por parcela, em que foram utilizados os valores de FRB medido e calculado em todos comprimentos de onda; e por comprimento de onda, em que são utilizados na

regressão os valores de FRB medido e calculado de todas parcelas, para um determinado comprimento de onda.

Para avaliação de modelos por regressão, Cohen e Cyert (1961) e Naylor e Finger (1967) sugerem: testar se o intercepto do eixo das ordenadas (coeficiente a) não é significativamente diferente de zero; se a declividade da reta (coeficiente b) não é significativamente diferente da unidade e; se o coeficiente de correlação (r) é significativo.

No caso deste trabalho, ao longo da faixa espectral considerada (514,0 nm a 918,6 nm), foram observados os seguintes parâmetros por comprimento de onda: gráfico do intercepto (coeficiente a); gráfico da inclinação da reta (coeficiente b); e gráfico do coeficiente de determinação (r^2), que indica a fração da variação na variável dependente, que é explicada pela variação da variável independente.

Para todas análises de regressão a variável dependente foi o FRB calculado e a independente o FRB medido.

A verificação se os valores de r^2 obtidos na regressão eram estatisticamente diferentes de zero, em outras palavras se eles eram significativos a um específico nível de confiança, foi realizada através do teste "t". Na realidade isto consistiu em consultar a tabela de valores críticos para o coeficiente de correlação fornecida por Zar (1974). Quando o número de parcelas é muito grande, implica que baixos valores de r^2 sejam estatisticamente diferentes de zero por este teste. Entretanto, o significado é que realmente existe uma correlação entre os dados, ainda que seja fraca, e que esta correlação encontrada não foi ao acaso.

Foi realizada também uma análise dos resíduos da regressão, para verificar se houve alguma tendência ou se estão distribuídos uniformemente ao longo do eixo das abscissas (Zar, 1974; Draper e Smith, 1966).

3.7.5 - TESTE "t" EM PARES DE MEDIDAS

Foi também realizado o teste "t", considerando as diferenças entre os pares de medidas ao invés da diferença entre as médias. Este teste visou verificar se os coeficientes "a" e "b" da reta de regressão, o coeficiente de determinação (r^2), e a %RMSE, calculados para o modelo SUITS e SAIL são iguais entre si. Para este teste, a hipótese nula foi de que os dois modelos são iguais, e a alternativa foi de que são diferentes.

O motivo de se realizar o teste aos pares dos parâmetros "a" e "b", r^2 e %RMSE, é porque estes assumem valores diferentes para os diferentes comprimentos de onda, impossibilitando assim o uso do teste "t" entre as médias, conforme Zar (1974).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os objetivos traçados, neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos da comparação entre o FRB calculado pelos modelos SUITS e SAIL, com o FRB medido no campo.

É mostrada, também, uma análise de sensibilidade, para verificar o efeito dos valores assumidos para os dados de entrada nas variáveis de saída do modelo.

4.1 - ANÁLISE DOS RESULTADOS POR PARCELA

A análise de regressão permitiu verificar o quanto há de concordância entre FRB medido e calculado, em todo o espectro considerado (de 514,0 nm a 918,6 nm).

Na Figura 4.1 estão contidos os gráficos do FRB_n calculado pelos modelos SUITS e SAIL e do FRB_n medido no campo, referentes à parcela 1 na data de 10/02/90. Pela figura, pode-se observar que os modelos subestimaram o FRB na faixa do visível (VIS) e na faixa do IVP os modelos superestimaram o FRB do dossel. Isto ocorreu porque os modelos assumem que as folhas são uniformemente distribuídas sobre o solo (dossel uniforme). Entretanto, na ocasião da medida as parcelas apresentavam uma percentagem de cobertura do solo baixa (em torno de 40 %), com as folhas concentradas em uma faixa, ao longo do centro das fileiras.

Observa-se ainda na figura, que os dois modelos apresentaram um comportamento semelhante, apesar de o SUITS apresentar maior discrepância em relação ao FRB medido.

Por outro lado, como pode ser observado na Figura 4.2, para a parcela 1 com medidas realizadas em 30/03/90, tanto no visível como no IVP o modelo subestimou os valores de FRB_n medido no campo, sendo que apenas em torno de 700 nm houve boa concordância entre medido e calculado.

Um bom exemplo de concordância entre o FRB_n medido e o calculado pode ser observado na Figura 4.3. Apesar de haver pequenas diferenças em algumas faixas do espectro, de modo geral observa-se uma tendência de as curvas de FRB_n calculadas pelos SUITS e SAIL estarem próximas das curvas de FRB_n medido no campo.

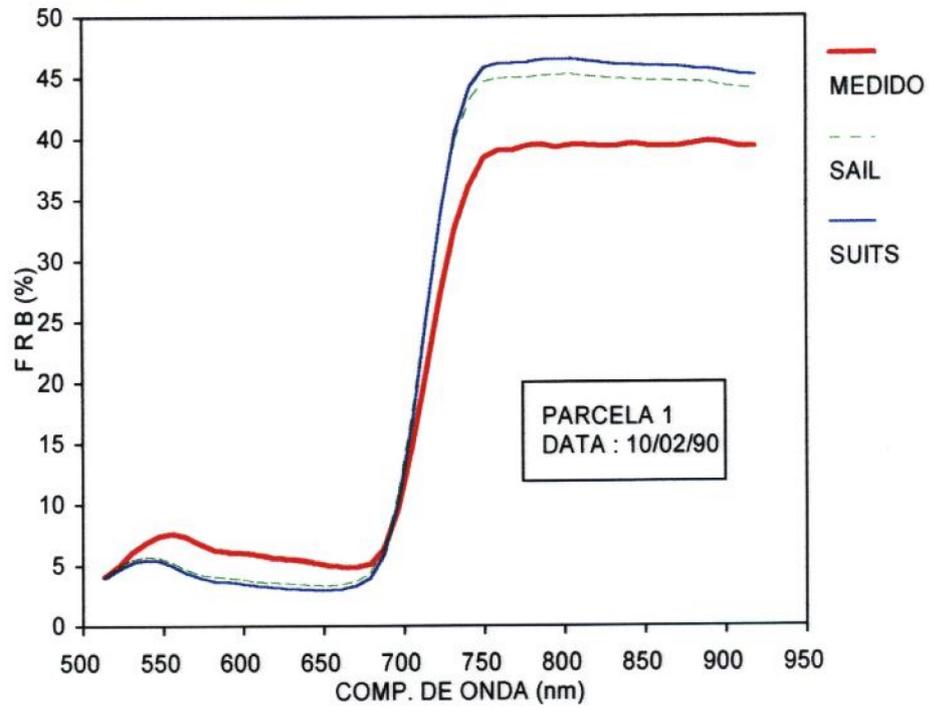


Fig. 4.1 - FRB calculado pelos modelos SUITS e SAIL e FRB medido, por comprimento de onda, referentes à parcela 1 medida em 10/02/90.

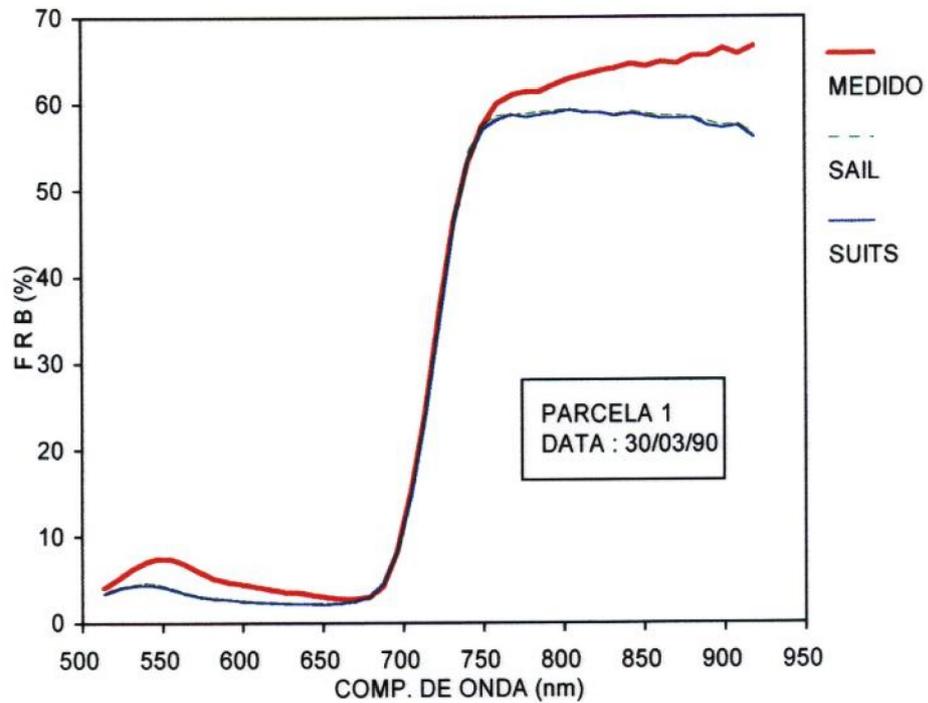


Fig. 4.2 - Espectro medido no campo em 30/03/90, e calculado pelos modelos SUITS e SAIL, para a parcela 1.

Devido à dificuldade de apresentação dos espectros das 193 medidas realizadas nas parcelas de campo, optou-se em fazer a verificação da concordância entre o FRB_n medido e calculado, através da análise de regressão para cada parcela, utilizando-se todos 46 comprimentos de onda de 514,0 nm a 918,6 nm. Nesta análise foram verificados os valores de r^2 , do intercepto e da inclinação da reta (coeficientes "a" e "b"). Estes resultados em termos da média e desvio padrão das 193 regressões realizadas para cada modelo, são mostrados na Tabela 4.1.

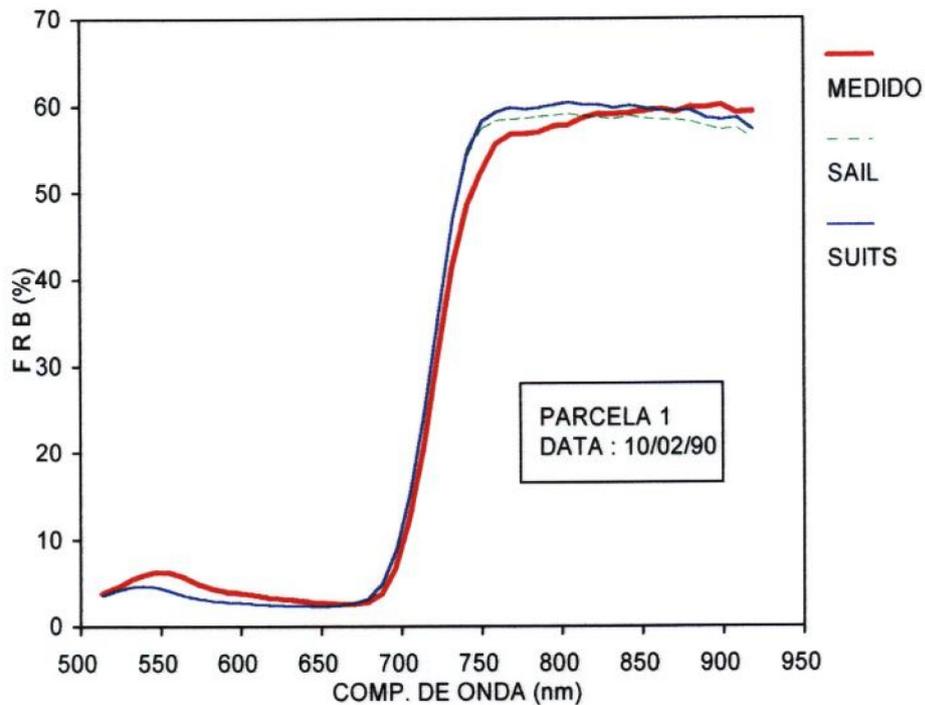


Fig. 4.3 - Espectro medido no campo em 30/03/90, e calculado pelos modelos SUITS e SAIL, para a parcela 18.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1, a média do coeficiente "a" foi bem próxima de zero, porém com alto desvio padrão em relação à média. A inclinação média das retas foi bem próxima da unidade e com baixo desvio padrão. Quanto ao r^2 , observa-se que os valores são bastante próximos da unidade, com desvio padrão próximo a zero. O teste "t" entre as médias da tabela acima revelou que a média dos coeficientes "a" e "b" são diferentes apenas a 90% de probabilidade, enquanto que a média entre os r^2 foi diferente até mesmo a 99% de probabilidade.

TABELA 4.1 - VALORES DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA O COEFICIENTE "a", COEFICIENTE "b" E r^2 , OBTIDOS DA REGRESSÃO ENTRE FRB MEDIDO NO CAMPO E FRB CALCULADO PELOS MODELOS SUITS E SAIL, PARA CADA UMA DAS 193 PARCELAS. PARA CADA PARCELA, A REGRESSÃO FOI FEITA PARA O CONJUNTO DOS 46 COMPRIMENTOS DE ONDA

	MODELO SUITS		MODELO SAIL	
	MÉDIA	Dv. Padrão	MÉDIA	Dv. Padrão
COEF. a	-0,3891	1,9202	-0,0680	1,7258
COEF. b	1,0680	0,1677	1,0379	0,1477
r^2	0,9908	0,0042	0,9894	0,0046

LeMaster et al. (1980) fizeram análise de regressão para a curva espectral medida e calculada para 2 variedades de trigo. Para uma das variedades encontraram um r^2 médio de 0,88 das 17 campanhas radiométricas durante todo o ciclo da cultura.

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.

Como exemplos dos resultados obtidos da regressão por parcela, são mostrados a seguir nas Figuras 4.4 e 4.5, os gráficos da parcela 1 correspondentes ao FRB medido e calculado, em função do comprimento de onda e, ao erro e à percentagem de erro, também por comprimento de onda.

Conforme pode ser observado na Figura 4.4, há uma boa concordância entre o FRB_n estimado pelo modelo SAIL com aquele obtido através de medidas de campo. Observa-se neste exemplo, um r^2 de 0,99 com coeficientes da reta de regressão ("a" e "b") de -0,66 e 0,94 respectivamente. Isto demonstra que o modelo SAIL teve um bom desempenho, ao ajustar a curva espectral calculada com aquela obtida através de medida feita no campo.

Por outro lado, observa-se na Figura 4.5 que, na região do visível, houve uma diferença pequena entre o FRB_n medido e o calculado (erro). Todavia, esta

pequena diferença deu origem a uma grande percentagem de erro, devido aos baixos valores da reflectância nesta faixa do espectro.

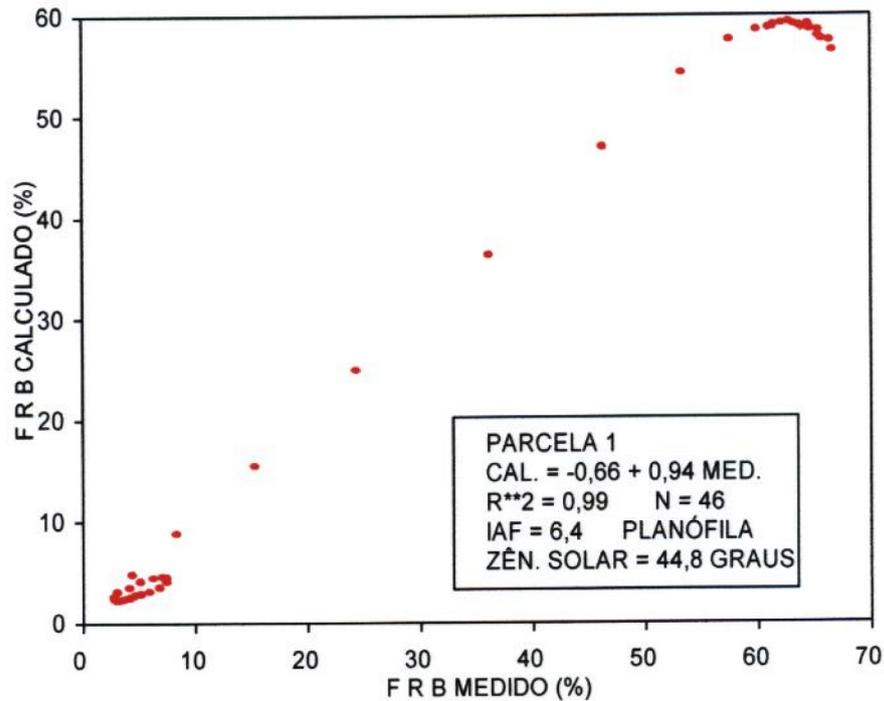


Fig. 4.4 - Regressão do FRB calculado pelo modelo SAIL versus FRB medido em 30/03/90, para todos comprimentos de onda, referentes à parcela 1.

O oposto se verifica na faixa do IVP onde o erro foi maior em relação ao VIS, e no entanto a percentagem de erro não foi tão acentuada como aconteceu no VIS, devido a valores mais altos de FRB_n .

Pode ser observado ainda na Figura 4.5 que, se não tivesse havido a tendência de aumento do FRB_n medido, a partir do comprimento de onda de 750 nm o erro nesta faixa seria desprezível. O IAF desta parcela nesta data foi de 6,4. Desta forma descarta-se a possibilidade de que tal aumento tenha sido causado pelo aumento do FRB_n do solo, em função do comprimento de onda.

Cabe ressaltar aqui que para todas as parcelas, foi observado que os dois modelos tiveram um comportamento semelhante ao ocorrido para a parcela 1, em termos de simular a curva espectral do FRB_n ao longo do espectro considerado. Os resultados contidos na Tabela 4.1 confirmam isto, onde se vê que a média do r^2 foi muito alta, com um desvio padrão muito baixo.

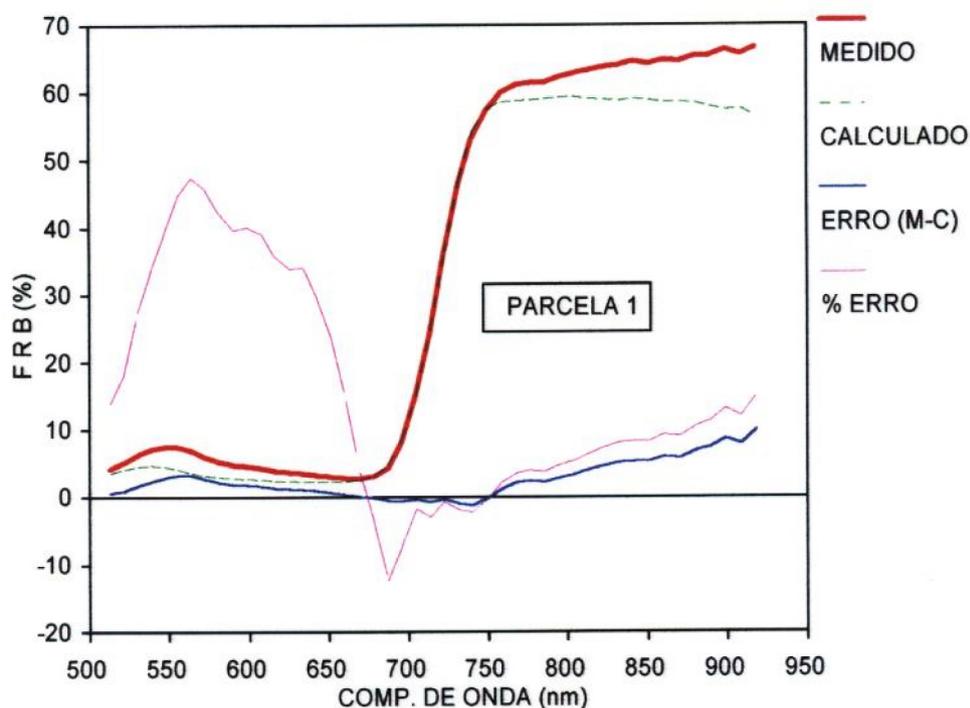


Fig. 4.5 - FRB calculado pelo modelo SAIL, FRB medido no campo em 30/03/90, erro e percentagem de erro, por comprimento de onda, referentes à parcela 1.

Por outro lado, foi observado que na primeira campanha de medição (10/02/90) os dois modelos subestimaram o FRB_n da cultura da soja para todas parcelas na região do visível, devido aos baixo IAF apresentado pelas parcelas nesta data.

O fato de os modelos subestimarem o FRB_n da cultura da soja para a faixa do visível, está relacionado com o FRB_n do solo e com fato de os modelos considerarem dossel com distribuição uniforme dos elementos sobre o solo. Cabe observar que na data de 10/02/90, as folhas do dossel estavam concentradas em uma faixa ao longo das fileiras, com parte do solo ainda descoberto. LeMaster et al. (1980) também observaram um pior desempenho do modelo SUITS para o início e no final do ciclo de duas variedades de trigo.

Entretanto, para a região do IVP, nas parcelas medidas em 10/02/90, verifica-se que os modelos, na maioria dos casos, superestimou o FRB_n do dossel. Apenas para 3 parcelas o FRB_n foi subestimado pelo modelo SAIL. Esta superestimação também se deve ao fato de os modelos considerarem os elementos do dossel estão uniformemente distribuídos sobre o solo.

4.2 - ANÁLISE DO FRB EM QUATRO COMPRIMENTOS DE ONDA ESPECÍFICOS

Observando os gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, onde se verificam o FRB calculado e o medido versus comprimentos de onda, nota-se que tanto o medido como o calculado tiveram comportamentos semelhantes, para os comprimentos de onda dentro de uma mesma faixa espectral.

Tal comportamento levou à decisão de se fazer análises estatísticas, apenas para alguns comprimentos de onda em faixas características. Os comprimentos de onda utilizados nesta etapa foram: 547,5 nm; 652,5 nm; 705,5 nm e; 804,3 nm. Estes correspondem respectivamente às proximidades do pico de resposta do verde, pico de absorção do vermelho, região de transição entre o vermelho e IVP, e região média do IVP.

As análises foram realizadas para os resultados do FRB calculado e o medido, o erro e a percentagem de erro, obtidos das 193 parcelas em que foram feitas medidas radiométricas. Os resultados das análises foram também colocados em gráficos, para cada comprimento de onda considerado nesta etapa.

a) Comprimento de Onda de 547,5 nm

Para este comprimento de onda, a correlação entre o FRB medido e calculado foi muito baixa, e, como pode ser visto na Figura 4.6, não se verifica nenhuma dependência do FRB calculado em relação ao FRB medido. Neste caso não foi encontrada correlação linear entre o FRB medido e o calculado. Isto ocorre devido à pouca sensibilidade do FRB em relação ao IAF neste comprimento de onda.

Observando-se a Figura 4.7, percebe-se que os modelos SUITS e SAIL subestimaram o FRB do dossel para a grande maioria das parcelas. Entretanto, ao se calcular a média e o desvio padrão dos valores absolutos dos erros do modelo SAIL, verificou-se que estes valores foram relativamente baixos (média de 1,13 e desvio padrão de 1,026). Como os erros são consistentemente positivos, isto leva à possibilidade de se aplicar uma correção para o FRB calculado, melhorando os resultados sem fazer refinamentos no modelo, conforme sugere Travelho (1992)

Constata-se ainda, pela Figura 4.7, que para este comprimento de onda a percentagem de erro é bastante alta, assumindo valores de 15,80 de média e 13,87 para o desvio padrão.

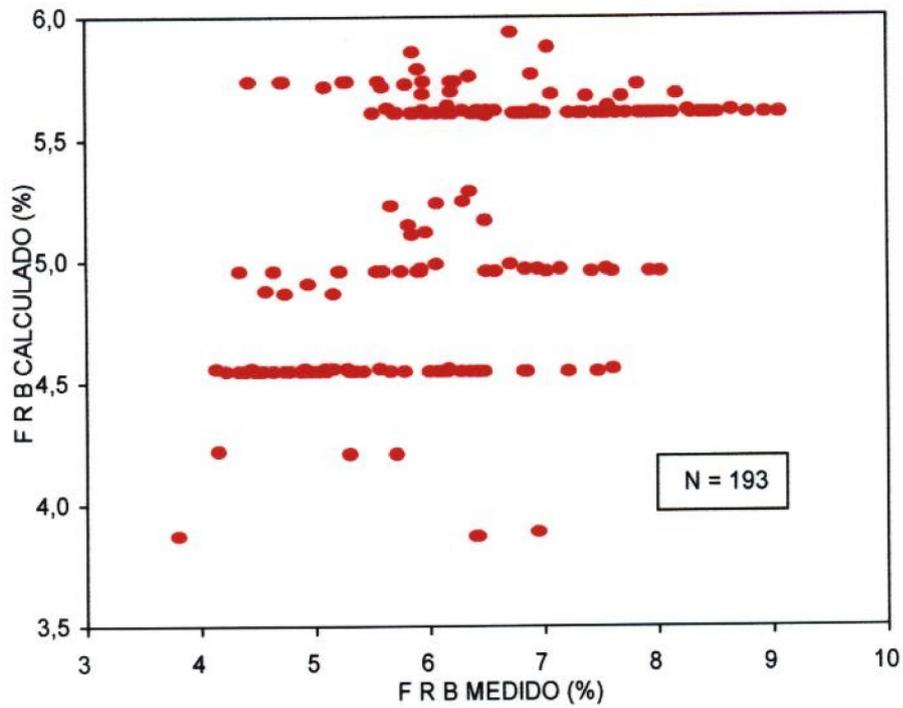


Fig. 4.6 - FRB calculado pelo modelo SAIL, versus FRB medido em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 547,5 nm.

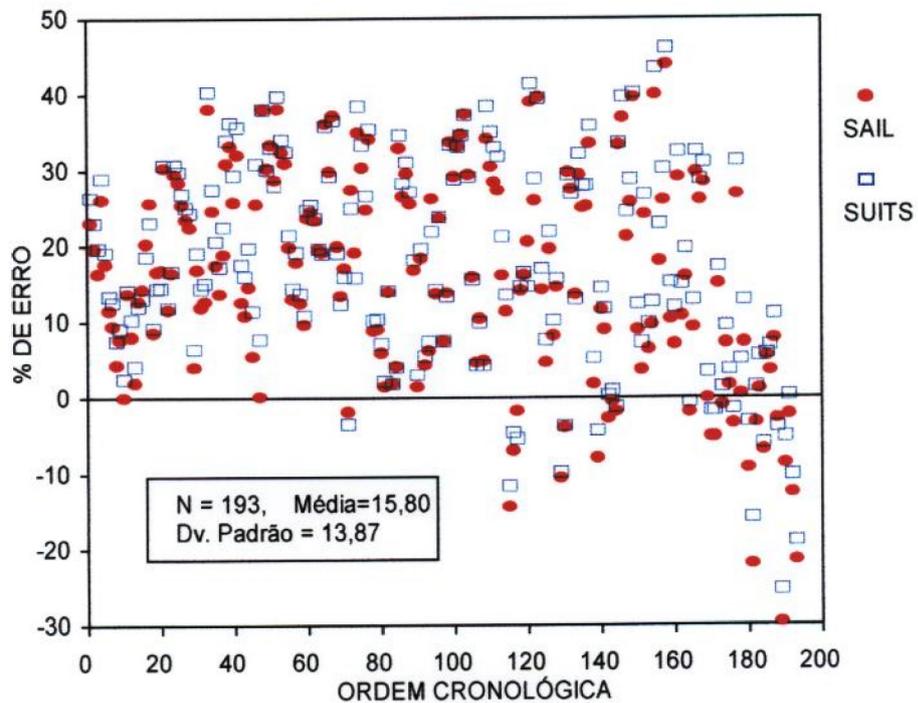


Fig. 4.7 - Percentagem de erro ao longo das 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 547,5 nm.

Analisando o exemplo da Figura 4.8, na qual se vê o gráfico do FRB calculado versus o medido em apenas uma campanha radiométrica, verifica-se que, para uma certa variação do FRB medido, não houve uma variação correspondente para o calculado. Cabe observar que o valor baixo de FRB calculado (3.89) mostrado nesta figura provavelmente seja um "outlier". Para esta data todas parcelas apresentaram uma DAF planófila, e um IAF que variou de 4,26 a 6,44, com média de 5,25. Para estes valores de IAF, o FRB calculado pelos modelos já tinha atingido o nível de saturação, fazendo com que não houvessem diferenças entre as parcelas.

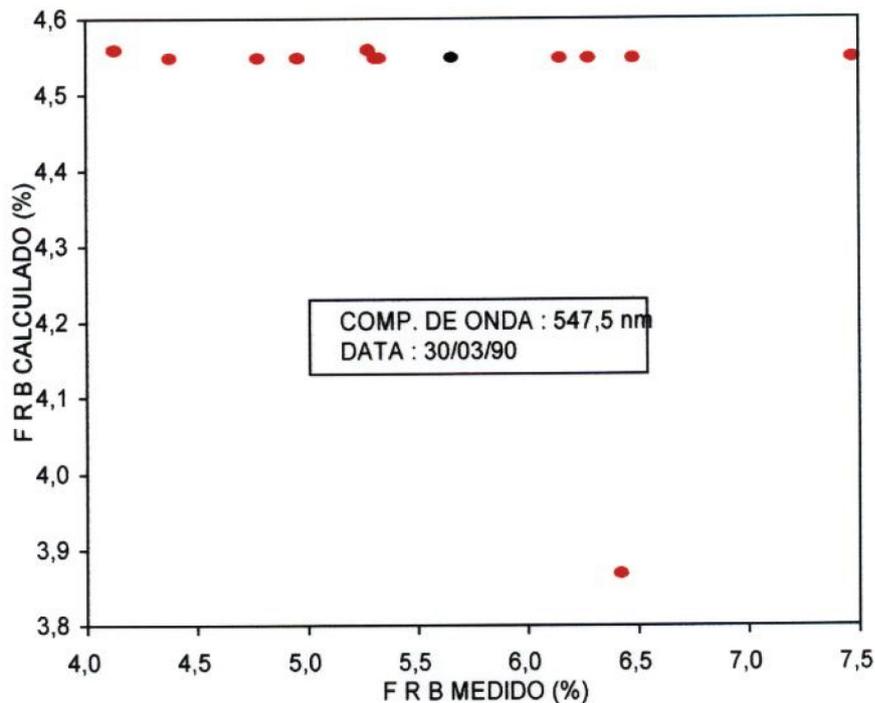


Fig. 4.8 - FRB calculado pelo SAIL versus FRB medido na campanha radiométrica de 30/03/90, para o comprimento de onda de 547,5 nm.

b) Comprimento de Onda de 652,5 nm

Em termos de resposta espectral, este comprimento de onda, que está localizado no centro da faixa do vermelho, caracteriza-se pela alta absorção da radiação eletromagnética pela vegetação, e pela maior reflectância do solo quando comparado com medidas radiométricas de folhas ou do dossel como um todo. Isto pode ser exemplificado na Figura 4.9.

Na Figura 4.10 está mostrado o diagrama de dispersão, para os resultados do FRB obtidos com o modelo SAIL versus o medido para todas 193 parcelas.

Os resultados correspondentes do modelo SUITS não são mostrados, mas foi verificado que teve comportamento semelhante.

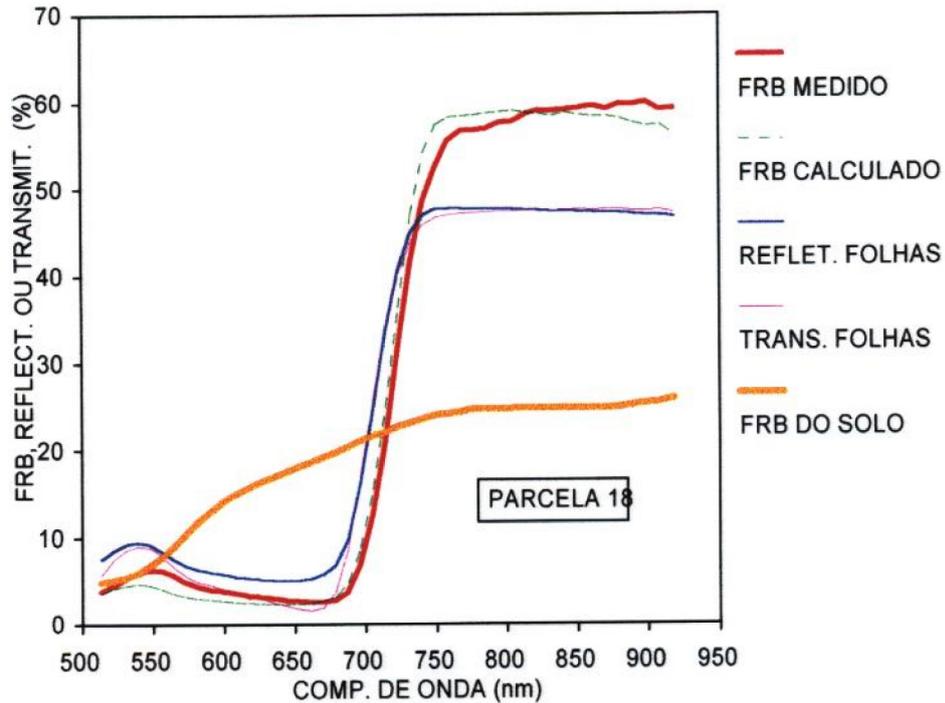


Fig. 4.9 - FRB calculado pelo modelo SAIL e medido no campo em 30/03/90 para a parcela 18; reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas de soja, medidas 56 dias após o plantio; e FRB médio do solo utilizado no experimento de campo.

Como pode ser observado na Figura 4.10, grande parte dos valores do FRB medido e calculado localizam-se na faixa de aproximadamente 2 e 3%. Os demais valores fora desta amplitude percentual equivalem àqueles da primeira campanha radiométrica, onde houve uma contribuição maior de solo exposto em relação às demais campanhas, fazendo com que tanto o FRB medido como o calculado tivessem maiores valores. Apesar de o aumento no FRB calculado não ser da mesma grandeza do que ocorreu no medido, este aumento concomitante possibilitou um coeficiente de determinação da reta de regressão alto (0,77). Entretanto, quando foram eliminados os valores de FRB medido e calculado para a primeira data, o r^2 diminuiu drasticamente, assumindo valor de 0,04.

Considerando o FRB medido e calculado de todas as datas, os coeficientes "a" e "b" da reta de regressão foram 1,19 e 0,46 respectivamente. Os valores destes coeficientes e do r^2 mostram que há uma boa concordância entre o FRB medido e o calculado, para este comprimento de onda.

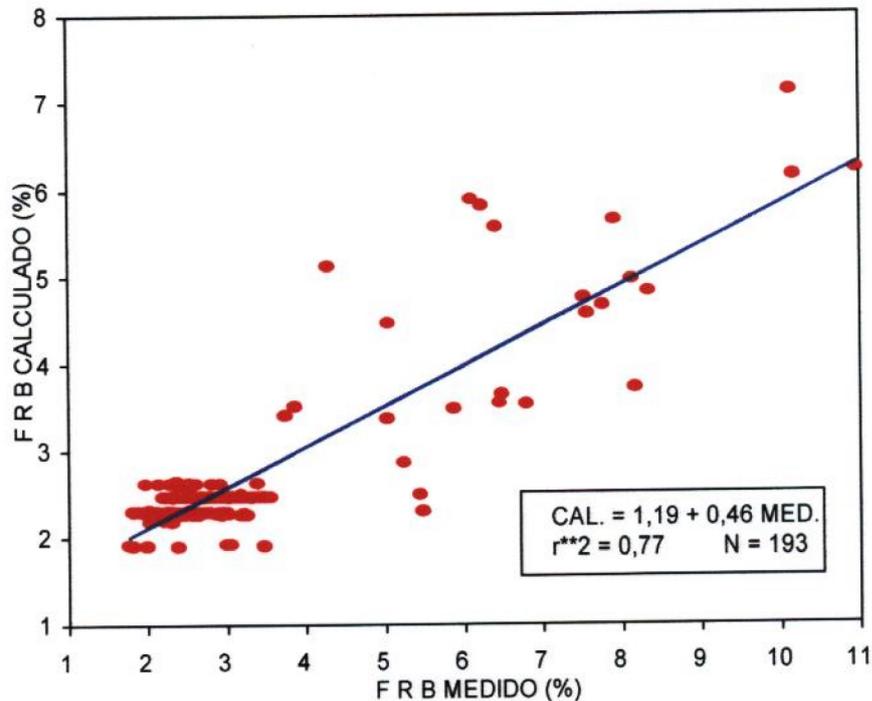


Fig. 4.10 - FRB calculado pelo SAIL versus o FRB medido em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 652,5 nm.

Analisando os erros verifica-se que a partir da segunda campanha radiométrica (a partir de 57 dias após o plantio), estes tendem a concentrar entre -1 e 1, com média de 0,25 e desvio padrão de 0,51.

Estes resultados são altamente significativos, do ponto de vista de simulação da quantidade de radiação absorvida pelo dossel. Mesmo com todas as aproximações assumidas neste trabalho, como verdade terrestre (DAF, REF e TRANS de folhas, e FRB do solo), observa-se que o modelo SAIL forneceu valores de FRB bem próximos daqueles medidos no dossel, com a exceção da primeira campanha, em que o FRB foi subestimado.

Os valores mais altos do FRB medido para a primeira campanha podem ser explicados de forma similar ao que ocorreu no comprimento de onda de 547,5 nm, devido à simplificação do modelo ao assumir a uniformidade do dossel. Assim, para a primeira campanha, o modelo tendeu a subestimar o FRB do dossel, sendo que esta tendência diminuiu até desaparecer nas campanhas subseqüentes.

Por outro lado, como pode ser visto na Figura 4.11 a percentagem de erro foi extremamente alta, variando de -30% a 60%. Isto se deve ao fato de os valores de

reflectância serem baixos nesta faixa do espectro, fazendo com que pequenos erros resultem em grandes valores de porcentagem de erro.

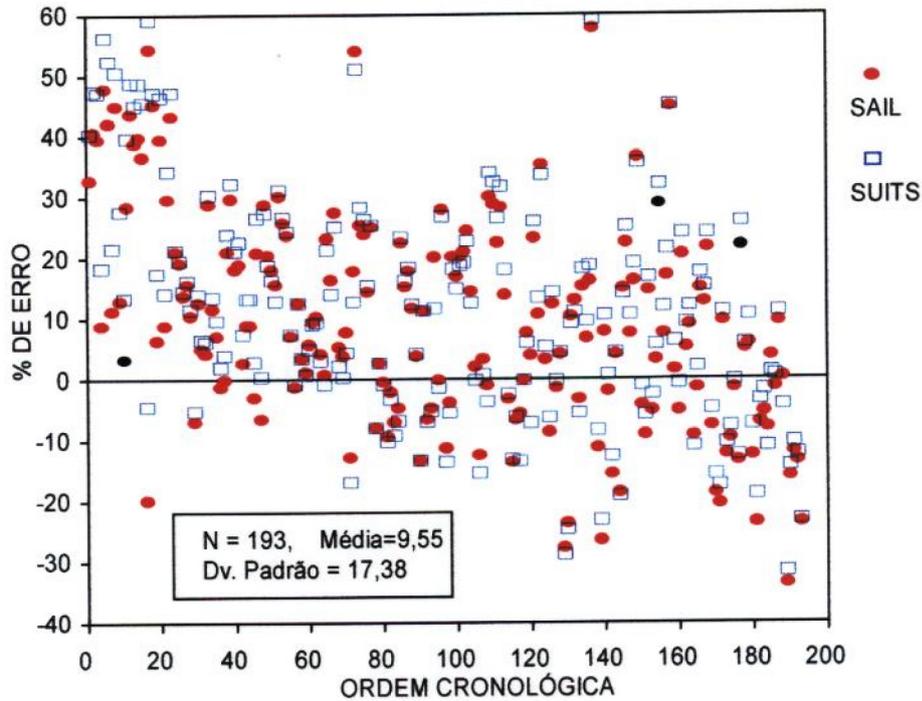


Fig. 4.11 - Porcentagem de erro ao longo das 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 652,5 nm.

Verifica-se também que, para este comprimento de onda, o modelo foi insensível dentro de uma mesma campanha. Tal fato é mostrado nos exemplos das Figuras 4.12 e 4.13.

Na Figura 4.12, verifica-se que enquanto o FRB medido tem uma variação de aproximadamente 4 a 7,5 entre as parcelas, o calculado permanece praticamente constante.

Entretanto, observando a Figura 4.13, verifica-se que as variações absolutas não são grandes. Os erros do modelo são pequenos e próximos de zero.

Apesar da pouca variação do FRB entre as parcelas, observa-se na Figura 4.13 que as diferenças entre medido e calculado (erros) são muito pequenas. Diante destas observações pode-se afirmar que o modelo SAIL teve um bom desempenho, para prever o FRB do dossel em todas as parcelas que foram medidas na data de 30/03/90. Este bom desempenho obtido é de importância para a estimativa da fração da radiação

fotossinteticamente ativa absorvida pelas plantas (APAR) através de simulações com este modelo.

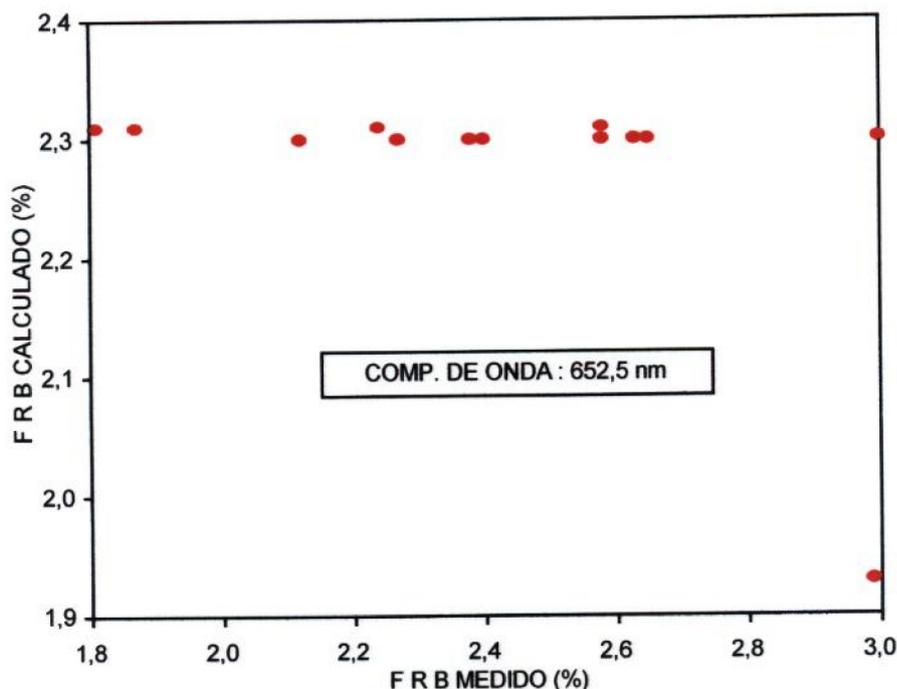


Fig. 4.12 - FRB calculado pelo SAIL versus FRB medido na campanha radiométrica de 30/03/90, para o comprimento de onda de 652,5 nm.

c) Comprimento de Onda de 705,5 nm

Este comprimento de onda se localiza na interface entre o vermelho e o IVP, em torno do ponto de inflexão da curva espectral.

A Figura 4.14 contém o diagrama de dispersão dos valores de FRB calculados pelo modelo SAIL versus o FRB medido. Conforme pode ser observado, não houve relação entre o FRB calculado e o medido. De modo geral, neste comprimento de onda o FRB do dossel foi superestimado pelo modelo. A comparação entre o FRB calculado pelo modelo SAIL revelou grandes valores da percentagem de erro, principalmente para as últimas campanhas radiométricas (Figura 4.15).

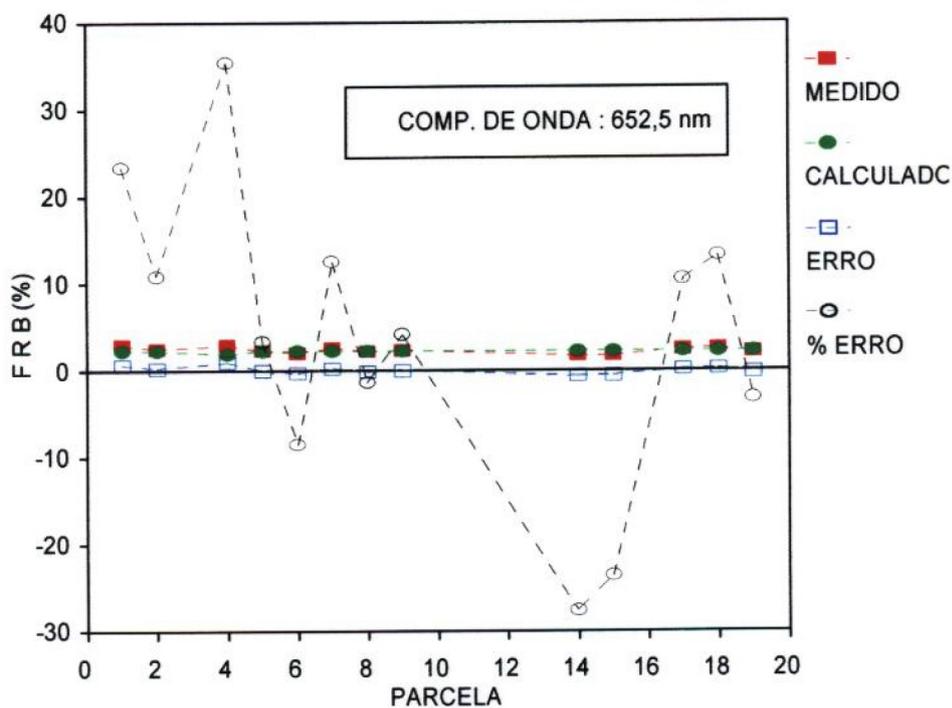


Fig. 4.13 - FRB calculado pelo SAIL, FRB medido no campo, erro e percentagem de erro para o comprimento de onda de 652,5 nm, por parcela. Dados referentes à campanha radiométrica de 30/03/90.

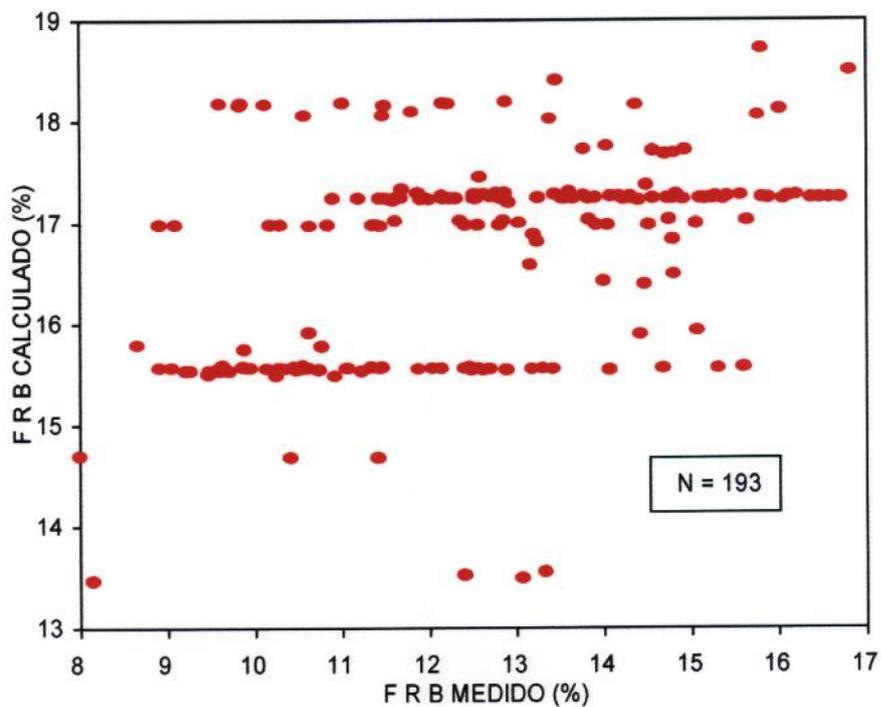


Fig. 4.14 - Diagrama de dispersão do FRB calculado versus FRB medido no campo em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 705,5 nm.

Nesta faixa do espectro o desempenho dos modelos não foi muito bom. Neste caso, as diferenças observadas provavelmente estejam relacionadas com diferenças de localização do ponto de inflexão, entre as curvas obtidas através de medidas no experimento de campo, e as folhas em que foram medidas as propriedades espectrais para as simulações (variedade Clark). Como os modelos superestimaram o FRB do dossel, pode-se afirmar que o ponto de inflexão para as folhas da variedade Clark estava deslocado em direção ao vermelho, em relação ao ponto de inflexão do FRB medido no campo. Fatores como teor de clorofila, estágio de desenvolvimento, condições de "stress" (Collins, 1978; Horler et al., 1983) e variações arquiteturais no dossel (Schutt et al., 1984) podem deslocar este ponto de inflexão.

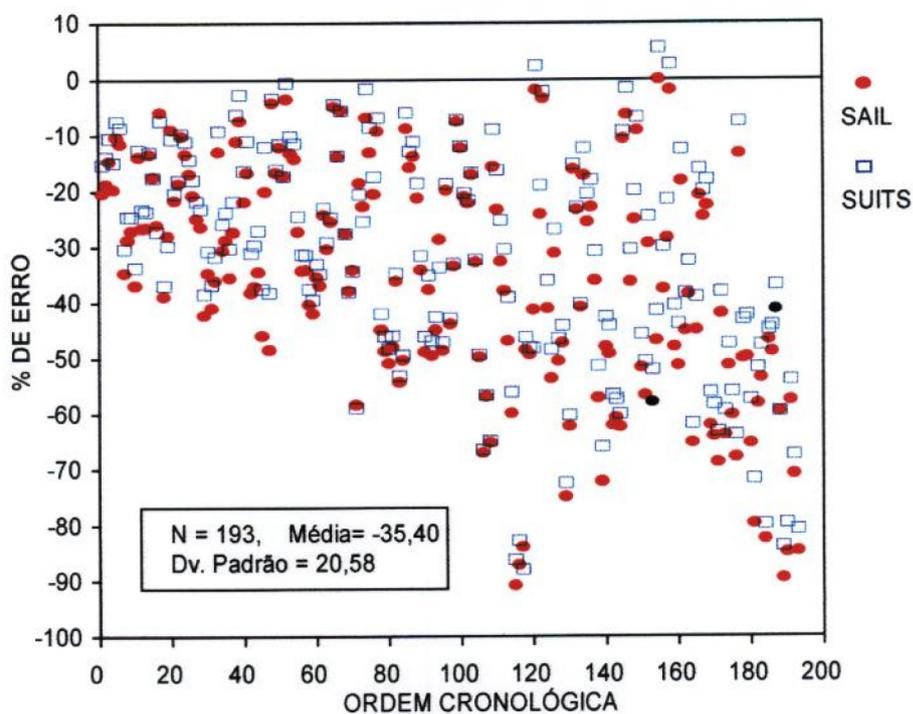


Fig. 4.15 - Percentagem de erro ao longo das 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 705,5 nm.

d) Comprimento de Onda de 804,3 nm

Este comprimento de onda está localizado em uma faixa do espectro de extrema importância do ponto de vista de Sensoriamento Remoto, devido à grande sensibilidade do FRB aos principais atributos do dossel, como IAF e DAF.

Observando o diagrama de dispersão da Figura 4.16, para os valores de FRB calculado pelo modelo SAIL versus o FRB medido no campo, verifica-se um r^2 de

0,74 com valores dos coeficientes da reta de regressão ("a" e "b") de 20,77 e 0,64 respectivamente. Isto demonstra que, apesar de serem altamente correlacionados, há uma certa distância entre estes resultados e a condição ideal, que seria valores de 0 (zero) para o coeficiente a, e 1 (um) para o coeficiente b.

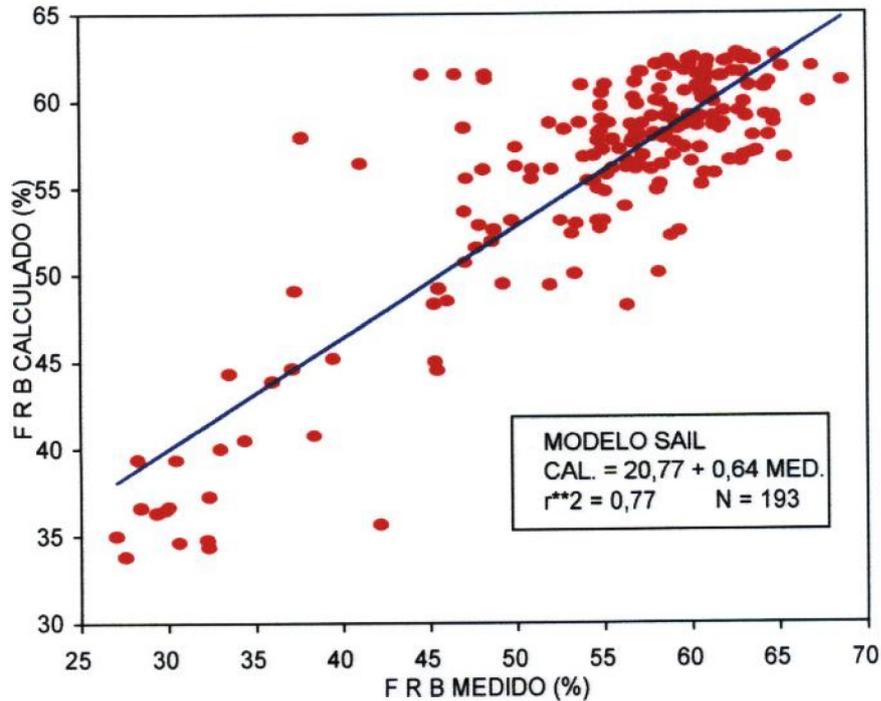


Fig. 4.16 - FRB calculado pelo SAIL versus FRB medido no campo em 12 campanhas radiométricas, para o comprimento de onda de 804,3 nm.

Resultados semelhantes foram verificados também para o modelo SUITS, com r^2 de 0,70 e coeficientes "a" e "b" com valores de 23,89 e 0,61.

A causa para a obtenção de altos valores para o coeficiente a, e valores abaixo da unidade para o coeficiente b, é principalmente o fato de os modelos terem superestimado o FRB do dossel, para baixos valores de IAF. Entretanto, para a faixa de 800 a 1100 nm Badhwar et al. (1985) obtiveram valores para a regressão entre o FRB medido e o calculado pelo modelo SAIL ($a=20,92$; $b=0,590$ e; $r^2=0,77$), próximos aos valores 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.

Considerando ainda este comprimento de onda, observa-se na Figura 4.17, que os resíduos da regressão versus o FRB medido não apresentam nenhum padrão

em relação ao estimado pela reta de regressão (onde o resíduo é zero). A grande quantidade de dados concentrados após o valor de 50% está relacionada com o aumento rápido do IAF, o que levou a valores altos para o FRB medido e calculado.

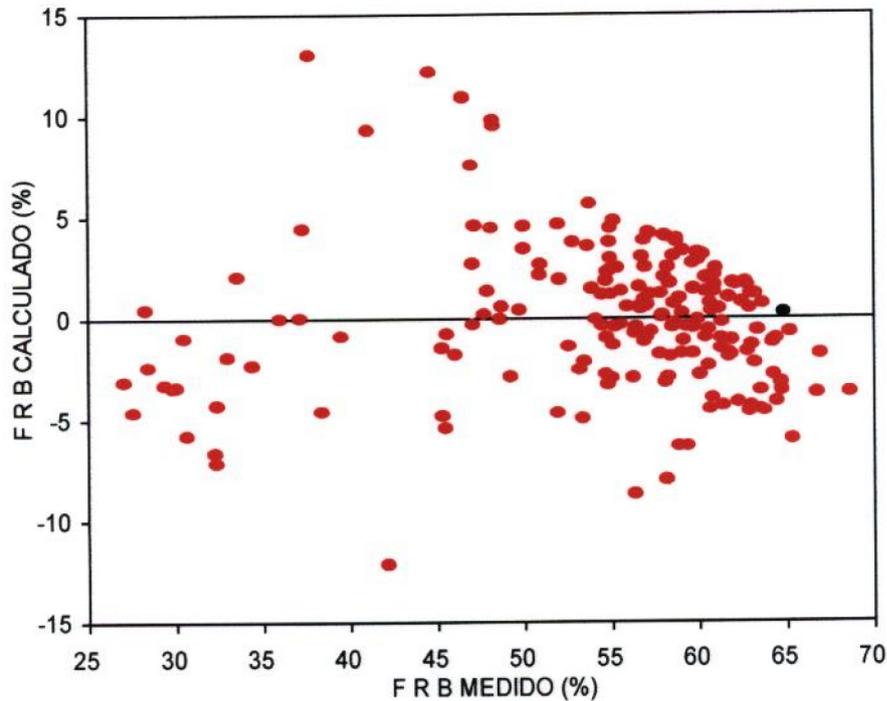


Fig. 4.17 - Resíduo da regressão linear simples entre FRB calculado e medido, para o comprimento de onda de 804,3 nm, versus o FRB medido no campo (variável independente).

Excluindo a primeira campanha radiométrica, o modelo SAIL apresentou erros, que não tiveram nenhuma tendência de subestimar ou superestimar o FRB do dossel ao longo de todas campanhas, ao contrário dos resultados obtidos por Chance e LeMaster (1985) com o modelo SUTS. Os autores obtiveram percentagem de erro sempre negativa para a faixa do IVP (800 nm a 1100 nm), para todos arranjos de ângulos de iluminação e visada. No presente trabalho, foram encontrados para este comprimento de onda valores de erro variando entre -10 e 5, com uma média próxima a zero (-0,57) e desvio padrão de 4,68. A percentagem de erro teve um comportamento semelhante, com média de -1,69, porém um desvio padrão maior, no caso de 9,42.

e) Análise ao longo de toda faixa espectral de 514,0 nm a 918,6 nm

Neste caso foi utilizado o %RMSE e a análise de regressão, observando-se o r^2 e os coeficientes "a" e "b". Nesta etapa levou-se em consideração os resultados obtidos pelos dois modelos, para permitir uma comparação entre eles.

Para esta análise, o cálculo de cada parâmetro foi realizado para cada comprimento de onda da faixa considerada, utilizando-se os dados das 193 parcelas.

Analisando a Figura 4.18, observa-se que os dois modelos tiveram uma curva de %RMSE semelhantes em termos de formato. Entretanto, observa-se que no geral, à exceção de uma pequena faixa em torno de 700 nm, a curva de %RMSE obtida através do modelo SAIL, teve menores valores ao longo da faixa considerada.

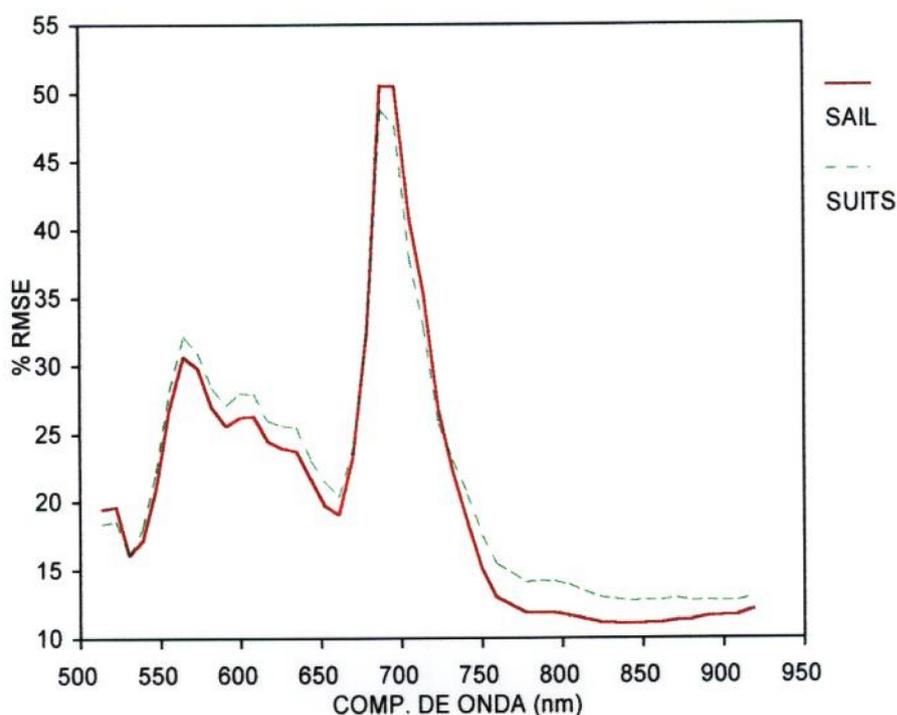


Fig. 4.18 - Raiz do erro percentual médio quadrático versus comprimento de onda. Para cada comprimento de onda, foram utilizados nos cálculos 193 pares de FRB calculado e medido.

As diferenças entre os modelos SUITS e SAIL, podem ser também observadas na análise de regressão. Nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 estão contidos respectivamente, os coeficientes "a" e "b", e o coeficiente de determinação da reta (r^2).

Conforme se observa na Figura 4.19, o coeficiente "a" 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.

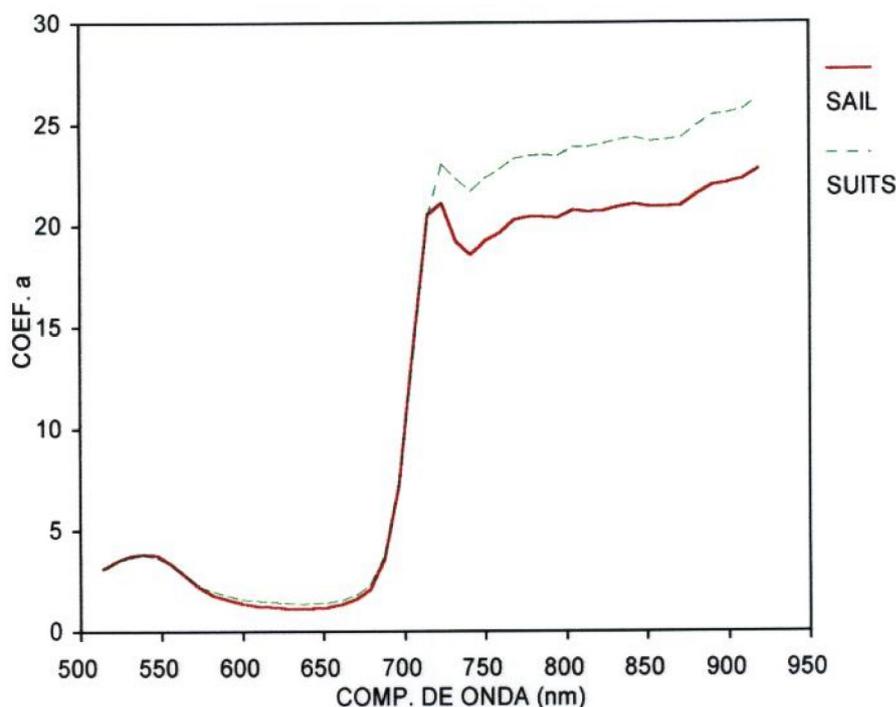


Fig. 4.19 - Intercepto do eixo das ordenadas (coeficiente a) versus comprimento de onda, obtido da regressão linear simples entre FRB calculado e medido no campo. Cada regressão foi realizada utilizando 193 pares de FRB calculado e medido.

Com relação ao coeficiente "b" (Figura 4.20), pode-se afirmar que o modelo SAIL foi também superior em relação ao SUITS, ou seja, obtendo valores de "b" mais próximos da unidade, em quase toda faixa do espectral analisada.

Ao se observar a Figura 4.21, constata-se que o modelo SAIL foi superior ao SUITS, em termos de coeficiente de determinação da reta (r^2), principalmente na faixa espectral do vermelho e do IVP.

Estes resultados de regressão condizem com aqueles encontrados por Badhwar et al. (1985). Para o modelo SAIL, os autores encontraram os seguintes valores para a regressão entre FRB medido e FRB calculado para as faixas de 600 a 700 nm e 800 a 1100 nm, respectivamente: r^2 de 0,506 e 0,773, intercepto da reta de 1,983 e 20,92, e a inclinação de 0,409 e 0,590.

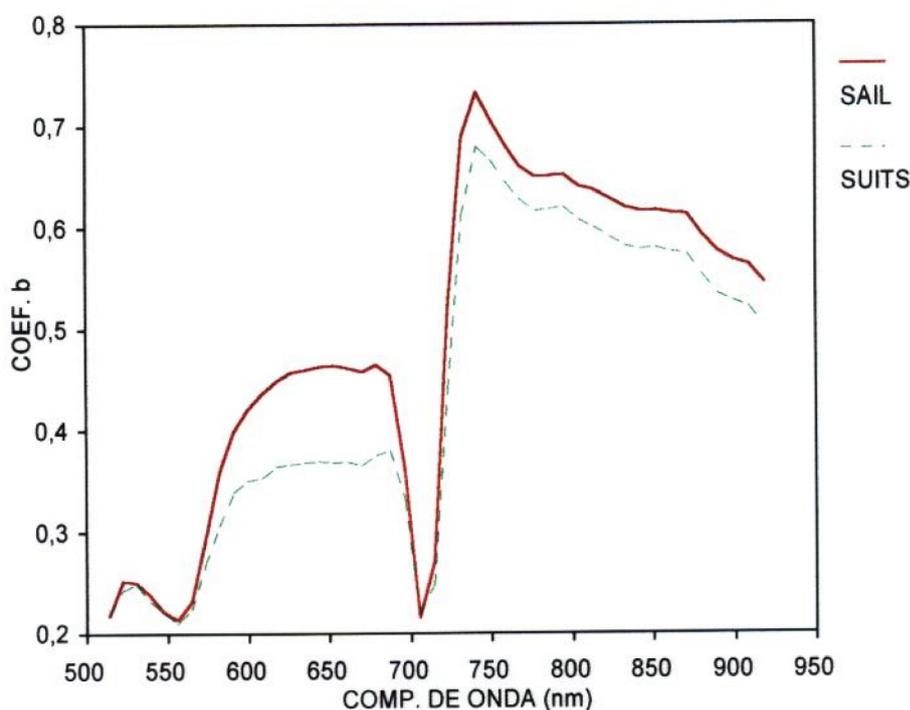


Fig. 4.20 - Inclinação da reta (coeficiente b) versus comprimento de onda, obtido da regressão linear simples entre FRB calculado e medido no campo. Cada regressão foi realizada utilizando 193 pares de FRB calculado e medido.

Pela tabela de valores críticos para o coeficiente de correlação (r), obtida pelo teste "t" e fornecida por Zar (1974), observa-se que os valores de r^2 , obtidos pela análise de regressão entre o FRB calculado pelos dois modelos e o medido no campo, foram significativos mesmo ao nível de confiança de 99%. Isto mostra que a correlação existe, e que não se deve ao acaso.

De acordo com a tabela fornecida por Zar (1974), para uma amostra com 193 observações (191 graus de liberdade), um coeficiente de correlação (r) superior a 0,185 (r^2 maior que 0,034) é significativo ao nível de 99% de probabilidade. Na Figura 4.21 observa-se que todos valores de r^2 foram superiores ao valor crítico.

Com relação à análise estatística realizada para a comparação entre os modelos SAIL e o SUITS, empregou-se o teste "t", realizado aos pares.

Na Tabela 4.2, estão contidos os valores de "t" calculados para os dados de %RMSE, coeficientes "a" e "b", coeficiente de determinação (r^2) e coeficiente de correlação r . Os cálculos de "t" foram realizados entre os valores do SAIL e do SUITS, das curvas mostradas nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

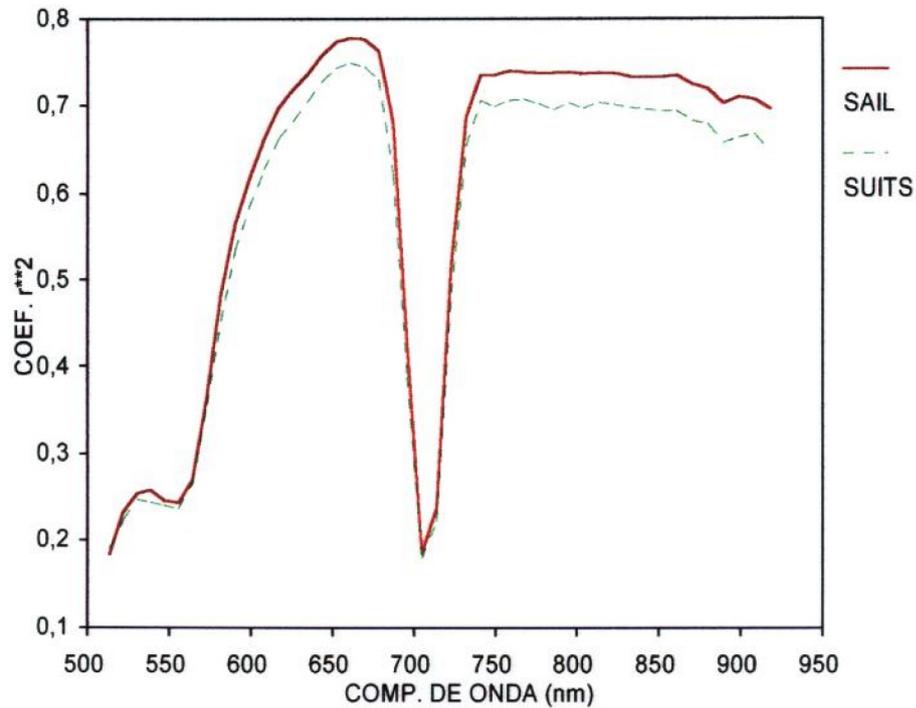


Fig. 4.21 - Coeficiente de determinação da reta (r^2) versus comprimento de onda, obtido da regressão linear simples entre FRB calculado e medido no campo. Cada regressão foi realizada utilizando 193 pares de FRB calculado e medido.

TABELA 4.2 - VALORES DE "t" CALCULADO PARA O %RMSE, COEFICIENTE "a", COEFICIENTE "b", r^2 E r, ENTRE PARES DE MEDIDAS DO SUITS E SAIL

PARÂMETRO	VALOR DE "t" CALCULADO
%RMSE	4,80
COEF. a	6,65
COEF. b	10,39
r^2	15,10
r	16,76
PARA 45 GRAUS DE LIBERDADE, A 99% DE PROBABILIDADE "t" TABELADO É IGUAL A 2,690. ASSIM, PARA TODOS PARÂMETROS ANALISADOS HOUE DIFERENÇA SIGNIFICATIVA A 99% DE PROBABILIDADE	

Conforme pode ser observado na Tabela 4.2, os valores de "t" calculado para 45 graus de liberdade, foram significativos ao nível de confiança de 99%, para todos parâmetros analisados. Assim, o %RMSE e o coeficiente "a" foram menores para

o SAIL, enquanto que para o coeficiente "b", o r^2 e o "r" o SAIL obteve maiores valores. Isto confirma a superioridade do modelo SAIL com base na análise das Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

4.3 - NÃO DEPENDÊNCIA DO FRB EM RELAÇÃO À DENSIDADE DO DOSSEL NA VERTICAL

Os modelos de TR derivados das equações de Kubelka-Munk são dependentes da quantidade de material com que a radiação interage e das propriedades espectrais deste, não tendo porém uma dependência relacionada com a espessura da camada.

Isto é verificado também para a transferência radiativa em atmosfera, conforme pode ser visto em Chandrasekhar (1960). Segundo o autor, um material que é caracterizado por um coeficiente de espalhamento relativo à massa K_n , na frequência ν , um feixe de radiação incidente em um elemento de massa de seção transversal dA e altura dx , a energia deste feixe é espalhada em todas direções na seguinte razão:

$$K_n P dx I_n \cos\theta d_n dA d\omega$$

onde:

P é a densidade do material;

θ é o ângulo de incidência na seção dA ;

e ω o ângulo sólido.

Porém, a massa deste elemento de volume é dada por:

$$dm = P \cos\theta dA dx.$$

Deste modo a energia espalhada passa a ser dada por:

$$K_n I_n d_n d\omega dm.$$

Isto mostra que o espalhamento é dependente da quantidade de material espalhador com que a radiação interage bem como das propriedades deste material. A suposta dependência em relação à distância ocorre porque, em condições naturais, um aumento na distância equivale a um aumento da massa na direção considerada.

Com relação aos modelos utilizados neste trabalho, isto pode ser verificado nos coeficientes das equações diferenciais, para os quais a unidade é m^{-1} . No

modelo SUITS isto ocorre porque σ_h é a área de folhas projetadas na horizontal por volume (m^2/m^3), resultando em uma unidade de m^{-1} , sendo que a mesma equivalência ocorre para as projeções verticais.

Para o SAIL, entra nos coeficientes o parâmetro IAF/m (ou L'), que tem o mesmo significado da área foliar projetada por volume no modelo SUITS.

Uma equação diferencial, com coeficientes de primeira ordem e primeiro grau, tem o significado físico de que a taxa de extinção no ponto x é proporcional à quantidade remanescente neste mesmo ponto. Isto pode ser demonstrado através da integração da equação de extinção do fluxo direto do sistema de equações diferenciais que definem os dois modelos, como segue:

$$dE_s/dx = -k E_s, \text{ fatorando temos } dE_s/E_s = -k dx$$

Integrando dos dois lados tem se:

$$\log E_s = -kx + C.$$

Porém quando $x=0$, ou seja, no topo do dossel, $E_s = 1$ e então $C = \log 1$.

Assim, $\log E_s = -kx + \log 1$. Fatorando temos:

$$\log(E_s/1) = -kx.$$

Colocando os dois lados da equação acima, como expoente de "e" (número de Neper) temos:

$$\text{EXP}(\log E_s) = \text{EXP}(-kx), \text{ resultando que } E_s = \text{EXP}(-kx).$$

Porém, como foi visto anteriormente, a unidade de k é m^{-1} , e x é a espessura da camada em metros, eliminando assim a dependência da extinção em relação à espessura da camada em consideração.

Finalmente, verifica-se que este coeficiente de extinção do fluxo direto depende do IAF, da distribuição angular das folhas e do ângulo solar, uma vez leva em consideração estes três parâmetros. As outras equações do sistema que definem os dois modelos em estudo têm soluções semelhantes, dando termos exponenciais em que a unidade do coeficiente é eliminada pela unidade da espessura da camada.

O FRB calculado pelos modelos não depende da densidade do dossel na vertical. Entretanto, alguns trabalhos encontrados na literatura mostram indícios de que em condições reais de campo o FRB medido depende da variável densidade do dossel na vertical.

Assim, Chance e LeMaster (1985), testaram o modelo SUITS para uma cultura de soja e, para a condição de visada no nadir observaram que a percentagem de erro tendeu a aumentar com o aumento do ângulo zenital solar, para as bandas MSS 1, 2 e 3 (500-600 nm, 600-700 nm, e 700-800 nm respectivamente). Entretanto, para a banda MSS 4 (800-1100 nm) não encontraram esta tendência, e argumentam que isto ocorre devido à baixa absorção das folhas nesta faixa do espectro, o que minimiza o efeito do sombreamento mútuo das mesmas.

Este efeito de sombreamento mútuo entre as folhas não é quantificado pelos modelos, e está relacionado com as interações da densidade do dossel, com o ângulo de iluminação e com a distribuição angular de folhas.

Os resultados apresentados por Chance e LeMaster (1985), também servem para reforçar a tese de que a densidade do dossel na vertical pode ser um fator que afeta o FRB deste. Assim, a não consideração da densidade do dossel na vertical pode ser um dos fatores que levam a erros nos modelos.

Conforme pode ser visto em Nichiporovich (1962), quando uma folha que está abaixo de outra folha a uma distância igual à sua largura, 53° de ângulo sólido do hemisfério é obstruído pela folha de cima, enquanto que 127° fica completamente livre. Quando se aumenta essa distância aumenta-se também a fração do hemisfério não obstruído. Para uma distância cinco vezes maior que o diâmetro da folha, apenas $11,5^\circ$ de ângulo sólido do hemisfério é obstruído.

Cabe observar que estes cálculos são realizados considerando-se apenas a obstrução de uma folha por outra acima. Relações mais complexas devem surgir à medida em que existam outras folhas ao lado. De qualquer forma, isto é um indício de que deve haver uma maior penetração da radiação à medida em que se diminui a relação IAF/m para um mesmo valor de IAF, ou seja, à medida em que se diminui a densidade do dossel na vertical.

Pela discussão acima, demonstra-se que o FRB gerado por simulação dos modelos não depende da densidade do dossel na vertical. Entretanto, ainda não se tem

um embasamento suficiente para afirmar se este fator interfere ou não, nas interações da radiação eletromagnética com um dossel de plantas em condições reais de campo.

4.4 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SAIL

Foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo SAIL, com o objetivo de se verificar o quanto se introduz de variação nas respostas deste, quando houver erros na determinação de algum dos parâmetros de entrada do modelo.

Assim, parâmetros aos quais o modelo é altamente sensível devem ser medidos com uma precisão alta, para evitar erros nas simulações.

Segundo McCuen (1973), sensibilidade é a taxa de variação de um parâmetro em relação à variação de outro fator. Conforme o mesmo autor, sensibilidade pode ser relativa ou absoluta. Sensibilidade relativa é aquela que não varia com a magnitude dos dados de entrada e saída, e a absoluta depende da magnitude desta variação. Neste trabalho foi considerada apenas a sensibilidade absoluta, uma vez que os parâmetros a serem analisados têm diferentes graus de precisão, quanto à coleta e processamento.

Foi analisada a sensibilidade do FRB em relação: ao IAF; à DAF; ao FRB do solo; à reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas (REF e TRANS); ao ângulo zenital do sol e à percentagem de fluxo incidente difuso. Em todas as simulações realizadas para esta análise de sensibilidade, foi considerado apenas o ângulo de visada do sensor no nadir, por ter sido esta a condição em que foram realizadas todas as medidas radiométricas de campo.

Quando não mencionado, a percentagem de fluxo difuso e o FRB do solo utilizadas nas simulações, são as médias das medições realizadas no campo. Para a REF e TRANS de folhas, utilizou-se as medidas feitas na variedade Clark, em 31/07/90 (56 dias após o plantio).

4.4.1 - ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

O motivo de se fazer a análise de sensibilidade do modelo SAIL em relação ao IAF, está relacionado com a metodologia empregada na obtenção deste parâmetro, que permite que haja apenas uma casa decimal de precisão.

A análise foi realizada para o ângulo zenital do sol de 5° , para 3 comprimentos de onda do espectro (547,5 nm, 652,5 nm, e 804,3 nm) e para duas arquiteturas de folhas (planófila e eretófila).

Para o comprimento de onda de 547,5 nm, observa-se que, no caso da planófila, o FRB aumentou até atingir um máximo no IAF de aproximadamente 2, e para a eretófila ocorreu o contrário, ou seja, houve uma diminuição do FRB até atingir um mínimo para o IAF de 4 (Figura 4.22).

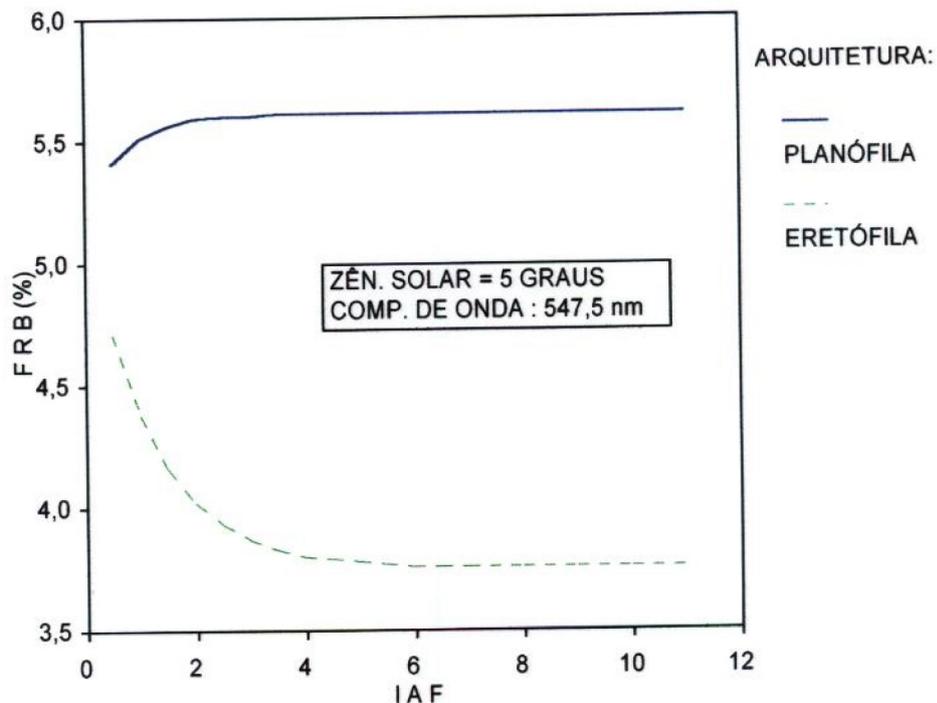


Fig. 4.22 - FRB calculado pelo modelo SAIL para um dossel de soja planófilo e outro eretófilo, em função do IAF. Comprimento de onda de 547,5 nm e ângulo zenital solar de 5 graus.

A causa desta variação pode ser explicada da seguinte forma. Com o aumento do IAF para as plantas planófilas, houve uma maior contribuição das folhas em relação ao solo, sendo que as folhas tiveram uma reflectância de aproximadamente o dobro do solo, para este comprimento de onda (Figura 4.9), conseqüentemente aumentando o FRB do dossel.

Por outro lado, para as plantas eretófilas ocorre também um aumento de contribuição das folhas. Mas neste caso a contribuição mais significativa é a diminuição do FRB do solo iluminado diretamente pelo sol e visado pelo sensor. Isto é comprovado

pela constatação de que, para o ângulo de 50° , a saturação do FRB em relação ao IAF ocorre primeiro do que para ângulos de iluminação menores. Verifica-se também pela figura que para baixos valores de IAF, o FRB das plantas eretófilas começa com valores próximos àqueles da reflectância do solo.

Conforme pode ser verificado na Figura 4.23, para o comprimento de onda de 652,5 nm o FRB do dossel planófilo decresceu rapidamente, até saturar para um IAF entre 2 e 3. Foi observado que para este comprimento de onda o FRB medido no campo também saturou para valores semelhantes de IAF. Resultados semelhantes foram encontrados por Colwell (1974) para o FRB simulado, e por Bauer et al. (1981) para o FRB medido em soja, milho e trigo na faixa do vermelho (600 nm a 700 nm). Este comportamento é característico desta faixa do espectro, que coincide com o centro da banda de absorção do vermelho, onde o solo tem uma reflectância bem superior à da folha.

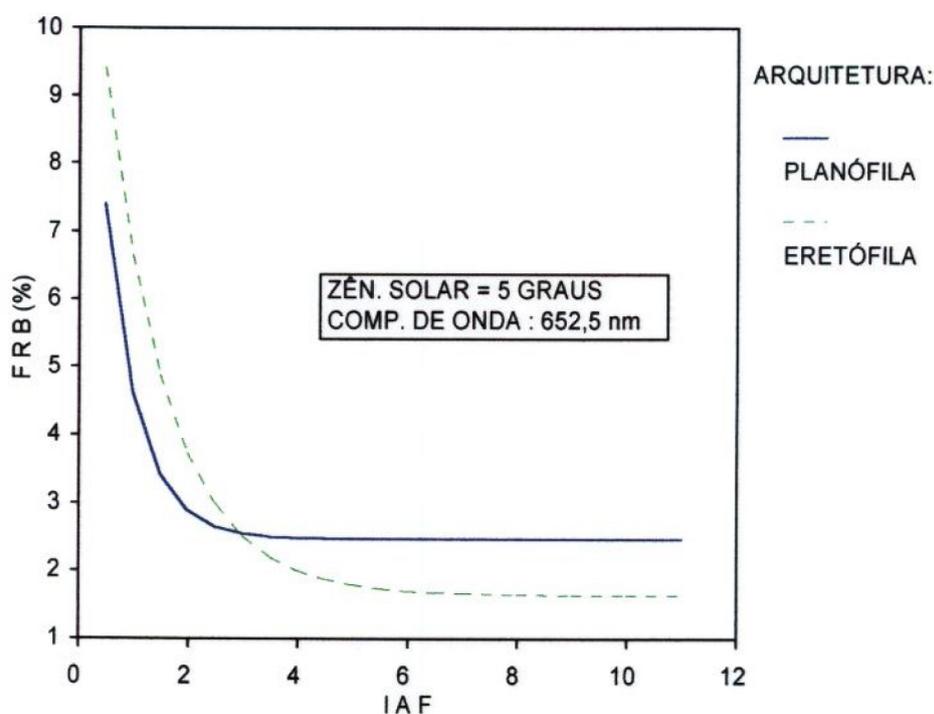


Fig. 4.23 - FRB calculado pelo modelo SAIL para um dossel de soja planófilo e outro eretófilo, em função do IAF. Comprimento de onda de 652,5 nm e ângulo zenital solar de 5 graus.

Para o dossel eretófilo o padrão de comportamento foi semelhante. A diferença foi com relação à saturação, que ocorreu para um IAF de aproximadamente 4.

No comprimento de onda de 804.3 nm, para ambas arquiteturas de plantas, o FRB cresceu com o aumento do IAF (Figura 4.24). Entretanto, observa-se ainda nesta figura, que, a partir do IAF entre 7 e 8, a inclinação da curva das planófilas se tornou pequena em relação à das eretófilas, mostrando que dosséis com folhas mais eretas tendem a ter maior sensibilidade do FRB em função do IAF. Verificou-se que o FRB medido no campo teve respostas para valores de IAF de até aproximadamente 6. Bauer et al. (1981) encontraram ponto de saturação para IAF em torno de 6, para dados de radiometria de campo realizada em cultura de soja na faixa do IVP (800 nm a 1100 nm).

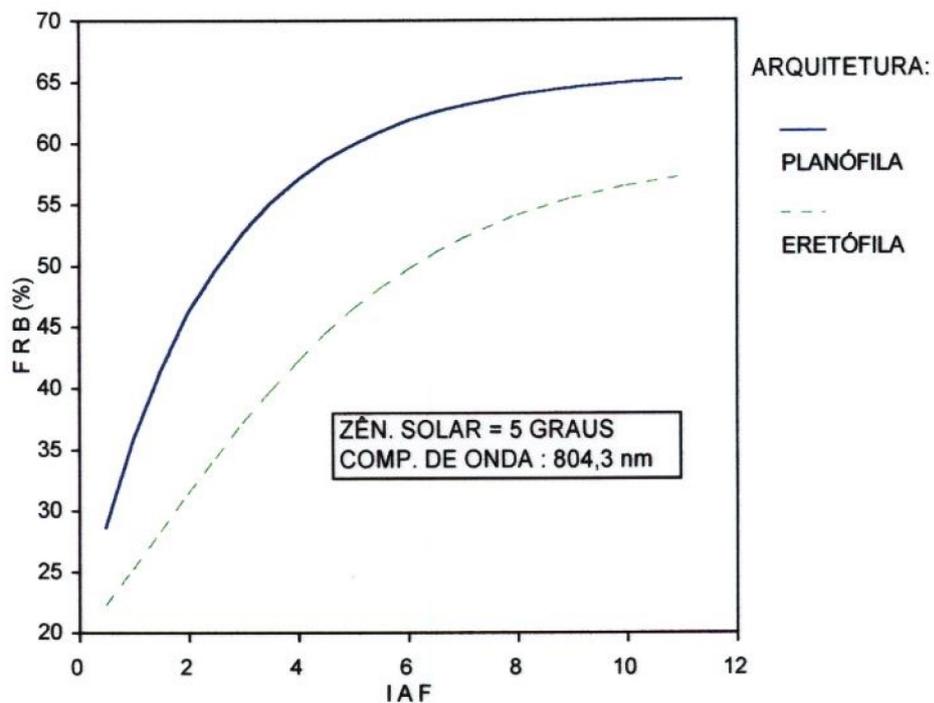


Fig. 4.24 - FRB calculado pelo modelo SAIL para um dossel de soja planófilo e outro eretófilo, em função do IAF. Comprimento de onda de 804,3 nm e ângulo zenital solar de 5 graus.

Nas Figuras 4.25 e 4.26, pode ser verificado que a precisão de uma casa decimal é suficiente para se trabalhar com o modelo em estudo. No caso de IAF entre 2 e 2,5 (Figura 4.25), o acréscimo ocorrido no FRB_n no IVP causado pelo aumento de IAF foi de aproximadamente 0,6% por um aumento de 0,1 no IAF. Já para um IAF entre 5 e 5,5 não é notada nenhuma diferença (Figura 4.26).

Esta constatação foi útil para fornecer subsídios em assegurar que os dados de IAF obtidos com uma casa decimal de precisão foram adequados para servirem de dados de entrada nos modelos.

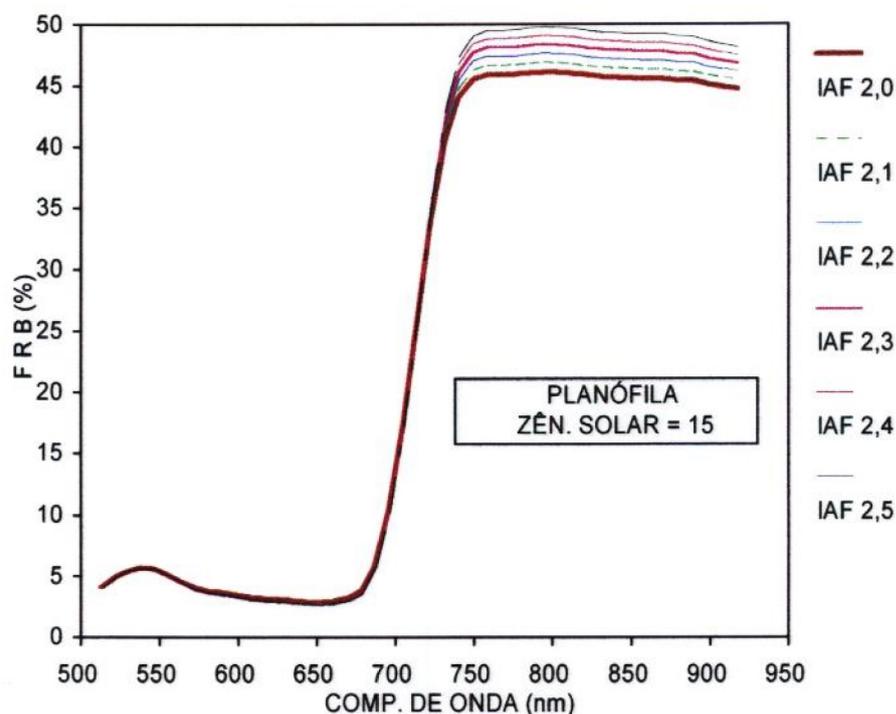


Fig. 4.25 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja planófilos com IAF entre 2,0 e 2,5. Ângulo zenital solar de 15 graus.

4.6.2 - DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DE FOLHAS (DAF)

A DAF foi estimada através do uso de fotografias verticais e ajuste de uma função correspondente ao tipo de distribuição que visualmente mais se adequou às condições de ângulos das folhas. Este tipo de metodologia pode não descrever realmente as condições de DAF no momento das medições radiométricas, daí a necessidade de verificar se isto pode levar a erros significativos nos modelos.

Na Figura 4.27 é mostrado o FRB_n obtido para seis tipos de arquitetura foliar (planófila, eretófila, plagiófila, extremófila, uniforme e esférica), com IAF igual a 1 e ângulo zenital do sol de 35° .

Conforme se observa na Figura 4.27, 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 valores para as eretófilas.

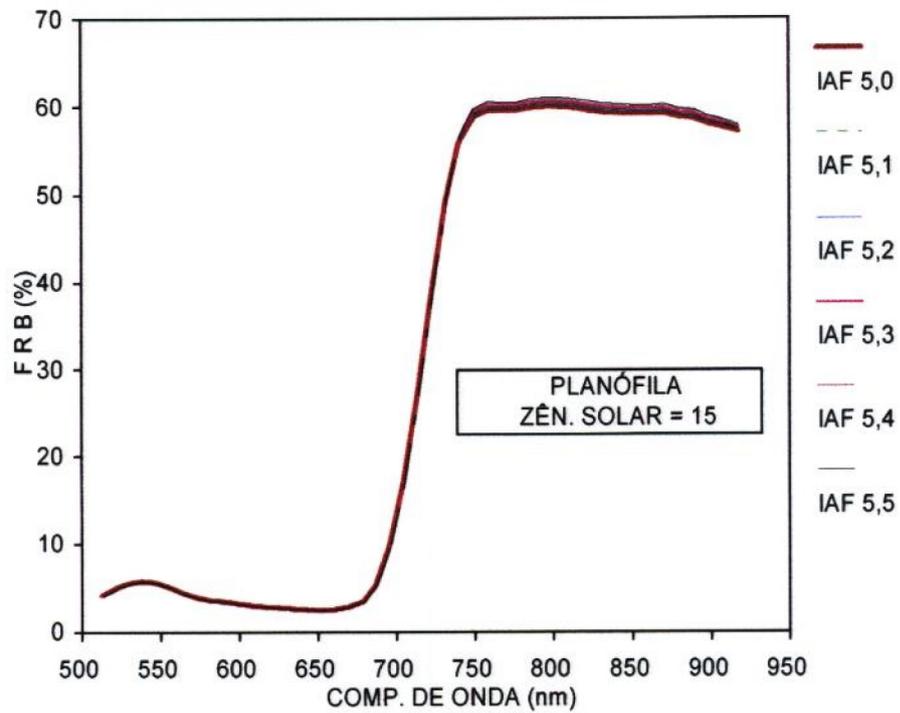


Fig. 4.26 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja planófilos com IAF entre 5,0 e 5,5. Ângulo zenital solar de 15 graus.

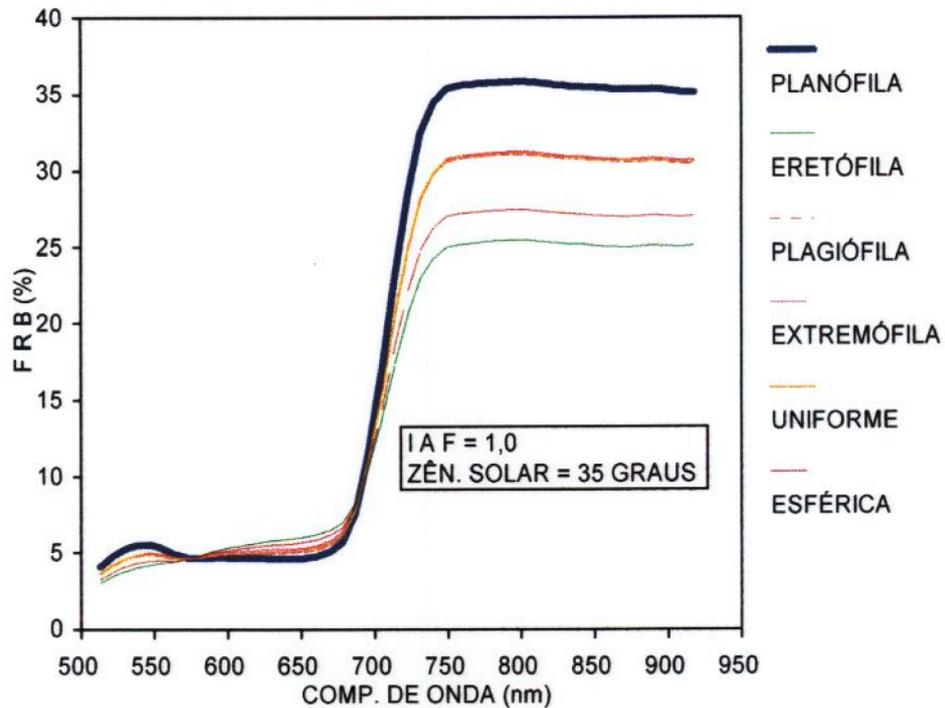


Fig. 4.27 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja com IAF 1 e diversas DAFs. Ângulo zenital solar de 35 graus.

No vermelho as diferenças foram pequenas, e ocorreram ao inverso do IVP ou seja, maiores valores de FRB_n para as eretófilas e menores valores para as planófilas. Observa-se também que para as plagiófilas, extremófilas e uniformes, o FRB_n foi praticamente igual em todos comprimentos de onda.

Estas três arquiteturas foliares, que tiveram resultados de FRB_n iguais, têm em comum apenas o ângulo médio foliar (45°). As diferenças entre estas arquiteturas está no grau de dispersão em torno do ângulo médio. Assim, a plagiófila têm folhas mais concentradas por volta de 45° (menor dispersão), a uniforme tem folhas nas mesmas proporções em todas faixas de ângulos, e na extremófila as folhas são orientadas apenas próximo à horizontal e próximo à vertical (maior dispersão).

Ross e Marshak (1989), mencionam que é importante a comparação do FDRB calculado para diferentes arquiteturas e que tenham mesmo ângulo médio foliar. Os autores encontraram que um aumento na dispersão ocasionou um aumento correspondente no FDRB, principalmente para ângulos de visada do sensor de frente para a fonte de iluminação.

Na Figura 4.28, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho foram semelhantes aos obtidos por Ross e Marshak (1989), apesar de o aumento do FRB com o aumento da dispersão ter sido muito pequeno.

Observando ainda a Figura 4.28, onde as curvas de FRB_n foram obtidas considerando um IAF igual a 8, nota-se que diferenças entre as arquiteturas consideradas ocorrem apenas na região do IVP, à exceção das 3 arquiteturas que têm ângulo médio igual (plagiófila, extremófila e uniforme), entre as quais não há grandes diferenças mesmo no IVP.

As diferenças que ocorreram são devido ao aumento de contribuição das folhas, e conseqüentemente diminuição da contribuição do solo na medida que a arquitetura das folhas tendeu a ser mais horizontal.

4.4.3 - REFLECTÂNCIA DO SOLO

Difícilmente as condições em que são tomadas as medidas radiométricas dos solos, são as mesmas que estão abaixo do dossel. Isto ocorre devido à possível presença de folhas que caíram sobre o solo, as condições de umidade diferentes e

outros fatores como rugosidade e tipo de fluxo incidente, que no caso é normalmente difuso abaixo das plantas.

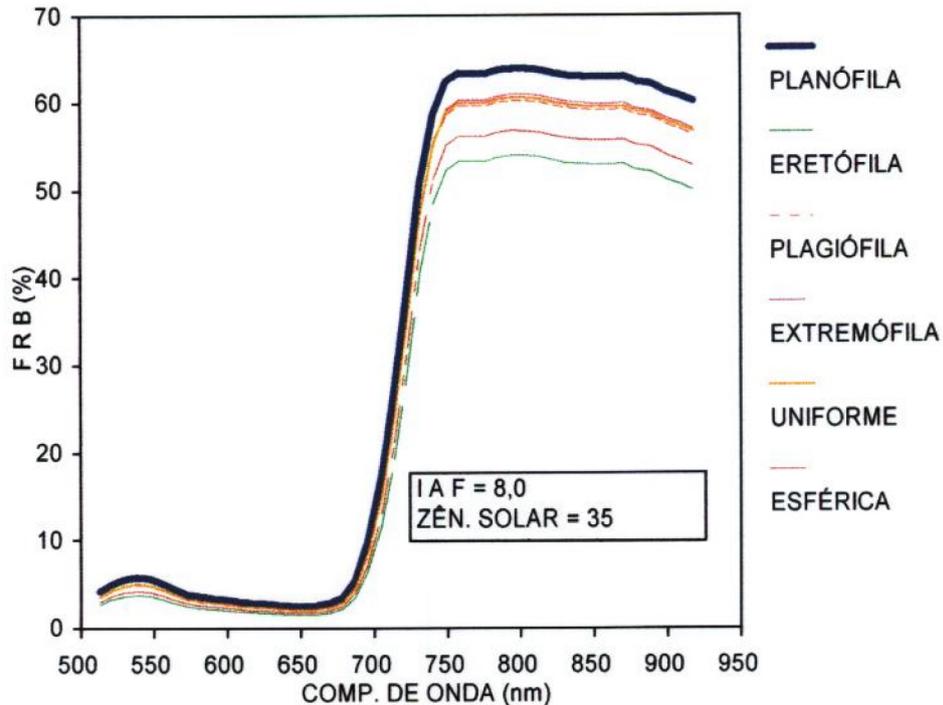


Fig. 4.28 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja com IAF 8 e diversas DAFs. Ângulo zenital solar de 35 graus..

Para testar a sensibilidade do modelo SAIL, com relação aos efeitos do FRB do solo, foram realizadas simulações, em que se utilizou os valores do FRB_n mínimo (solo1) e máximo (solo2) do solo, medidos no campo ao lado do experimento (Figura 4.29).

Neste estudo, foram utilizados dois ângulos de iluminação (15° e 45°), arquiteturas de folhas planófilas, plagiófilas e eretófilas, e valores de IAF iguais a 1, 4 e 8.

Observando a Figura 4.30, nota-se que para o dossel planófilo com IAF igual a 1, o solo teve uma grande influência no FRB_n calculado. Essa influência foi mais acentuada na região do IVP. Estes resultados condizem com aqueles encontrados por Huete (1987), onde o autor mostra, e comenta que maiores efeitos do solo ocorrem em faixas espectrais onde seu FRB é maior.

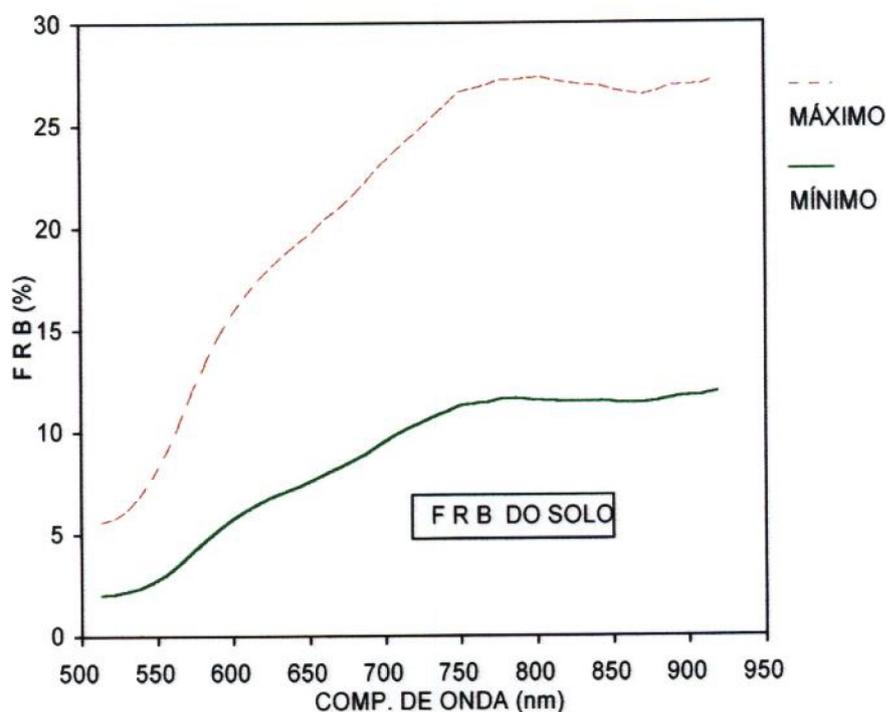


Fig. 4.29 - Valores mínimo e máximo do FRB do solo medidos no campo, por comprimento de onda.

Pela Figura 4.30, constata-se ainda que as diferenças observadas no IVP, praticamente desaparecem para o IAF igual a 8, quando o FRB já atingiu o ponto de saturação devido ao valor de IAF alto.

Com relação aos ângulos de iluminação, ficou demonstrado que estes tiveram uma influência muito pequena no FRB_n do dossel planófilo. Entretanto, à medida em que as folhas se tornaram mais eretas, houve um aumento das diferenças de FRB_n entre os dois ângulos de iluminação, com maiores diferenças para menores valores de IAF.

Observou-se também que arquiteturas com folhas mais eretas tiveram maiores diferenças de FRB_n calculado para os dois espectros de solo, e que estas diferenças também tenderam a desaparecer com o aumento do IAF.

Através destes resultados, foi possível identificar que é necessário cuidar para que se façam medições do FRB_n do solo, representativas das condições em que se encontram o solo subjacente à cultura, no momento em que são feitas as medições radiométricas no dossel. Este cuidado deve ser tomado principalmente para dosséis com folhas mais eretas e com IAF mais baixo.

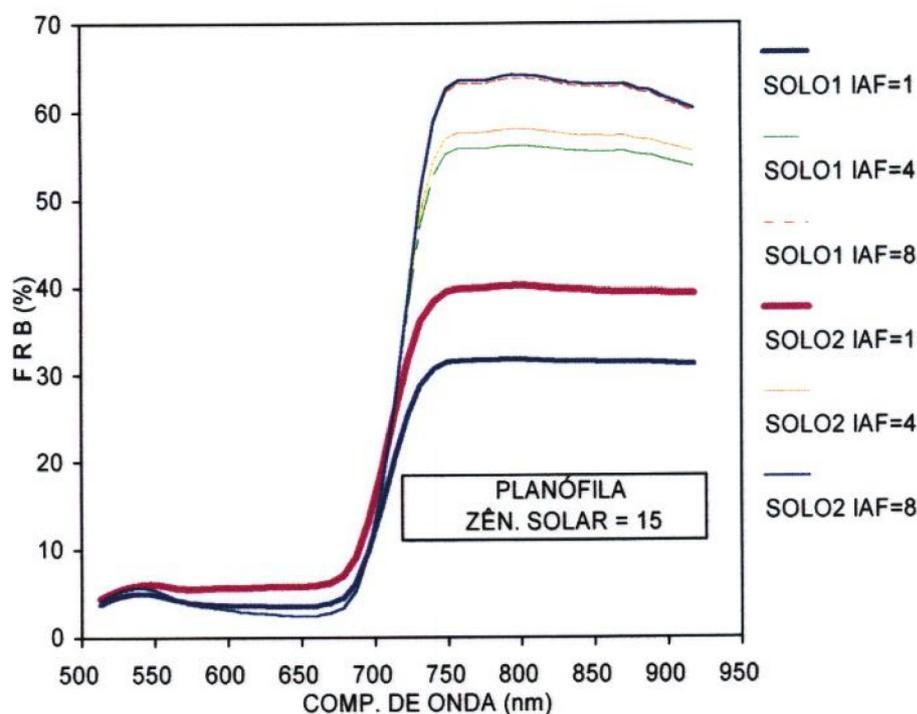


Fig. 4.30 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para dosséis de soja com DAF planófila e IAF variando de 1, 4 e 8, para duas condições de reflectância do solo. Ângulo zenital solar de 15 graus.

Neste trabalho, a partir da segunda campanha radiométrica os valores de IAF determinados em todas parcelas foram superiores a 3,5. Apenas na primeira campanha o IAF teve um valor baixo (entre 0,7 a 2,19).

Desta forma, acredita-se que somente para a primeira campanha radiométrica, é que pode ter havido efeito significativo das diferenças entre o FRB real do solo e aquele utilizado nas simulações, nos erros dos modelos.

4.4.4 - REFLECTÂNCIA E TRANSMITÂNCIA DIRECIONAL HEMISFÉRICA DE FOLHAS

Infelizmente não foi possível tomar medidas de REF TRANS de folhas no experimento que foi montado no campo. Disso resultou que para rodar os modelos foram utilizados dados obtidos da literatura.

Devido a esta condição, procurou-se verificar se pequenas variações nas propriedades espectrais das folhas, poderiam causar erros significativos nos resultados dos modelos, e conseqüentemente erros nas conclusões.

Nas simulações para este propósito, foram feitas variações na REF e TRANS das folhas, enquanto que a absortância (ABSOR) foi mantida sempre constante, à exceção de um tratamento em que se aumentou 5,0% neste parâmetro, para se verificar a influência deste parâmetro.

Pela Figura 4.31 verifica-se que, para um dossel planófilo, a REF e TRANS de folhas são parâmetros que podem afetar o FRB_n deste. Conforme esperado, quando se aumentou a transmitância da folha (com conseqüente diminuição da reflectância), resultou em uma diminuição no FRB_n do dossel em relação à testemunha (sem alteração na REF e TRANS e ABSOR). Por outro lado, o aumento na reflectância da folha causou um aumento no FRB_n .

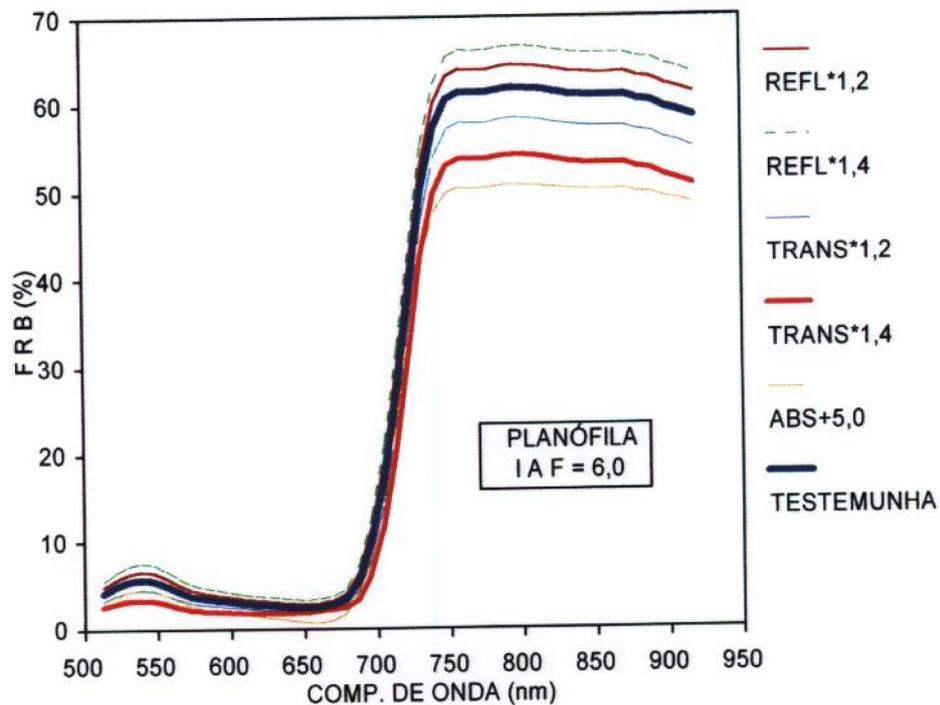


Fig. 4.31 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para um dossel de soja planófilo e com IAF 6, para diferentes propriedades espectrais de folhas.

Foi verificado também, que o modelo foi mais sensível às variações nas propriedades ópticas das folhas em um dossel planófilo, do que no caso de dossel eretófilo, principalmente para baixos valores de IAF.

Estes resultados demonstram que as propriedades ópticas das folhas são importantes na determinação do FRB_n , e que desvios entre os valores encontrados no campo e aqueles usados nos modelos podem levar a erros nas análises. Tal fato, em parte

pode ser atribuído as discrepâncias que ocorreram entre valores de FRB calculados pelo modelo e medidos em campo, apresentadas nesta pesquisa. Entretanto, conforme concluiu Major et al. (1992) para a simulação do FRB do dossel de milho, os dados espectrais de folhas medidos em apenas uma data são suficientes para as simulações durante o ciclo da cultura. Pelos resultados obtidos neste trabalho, observa-se que para que se possa utilizar os dados espectrais de uma única data em todo ciclo, é necessário que os dados tenham uma boa precisão.

4.4.5 - ÂNGULO ZENITAL DO SOL

As medidas de campo foram realizadas quase sempre em horários que variaram de 9 horas às 12 horas, em função da disponibilidade de céu limpo. Assim, as medidas radiométricas foram feitas sob ângulos zenitais do sol que variaram de $9,23^\circ$ a $52,31^\circ$, com média de $36,71^\circ$.

Esta análise de sensibilidade ao ângulo zenital do sol, visou verificar como o modelo se comporta em relação a este parâmetro, e assim tirar conclusões sobre as comparações entre os dados medidos no campo e os de simulação dos modelos.

A variação do FRB no comprimento de onda de 547,5 nm para dosséis planófilos, plagiófilos e eretófilos, pode ser vista nas Figuras 4.32 e 4.33 (IAF 1 e 8 respectivamente). Observa-se nas duas figuras, que para a arquitetura planófila um pequeno aumento do FRB ocorreu somente a partir de 50° , enquanto que na plagiófila, este aumento ocorreu a partir de aproximadamente 45° . As planófilas tiveram um FRB maior devido à maior contribuição das folhas, que têm reflectância maior que o solo neste comprimento de onda.

Para o comprimento de onda de 652,5 nm, onde o solo tem FRB maior que as folhas, observa-se que a sensibilidade ao ângulo zenital do sol depende fortemente da arquitetura e do IAF (Figuras 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37).

Neste caso observa-se que, para o dossel planófilo, as variações do FRB são pequenas, e que geralmente ocorrem para ângulos zenitais acima de 50° . No plagiófilo, as variações do FRB começam a ocorrer para o ângulo de aproximadamente 40° , e para o eretófilo verifica-se que houve variações em quase todos ângulos zenitais de iluminação considerados.

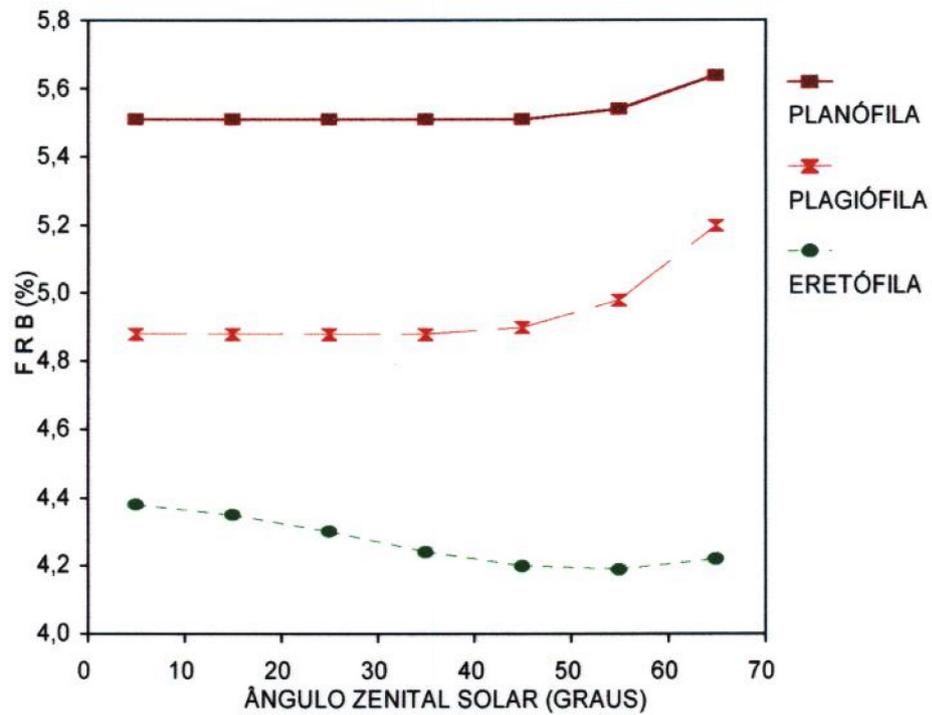


Fig. 4.32 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 1 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 547,5 nm.

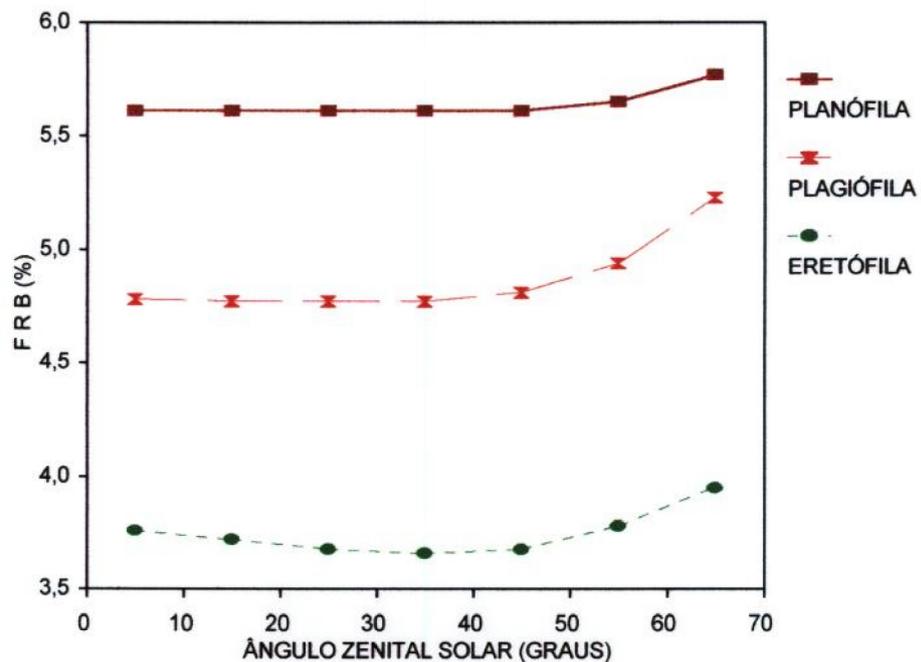


Fig. 4.33 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 8 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 547,5 nm.

Cabe observar ainda que para o dossel eretófilo, a tendência foi sempre de diminuir o FRB com o aumento do ângulo zenital do sol. Entretanto, as variações foram menores à medida em que o IAF aumentou.

Ao se analisar as Figuras 4.34 e 4.35, onde os valores de IAF são baixos, verifica-se que o aumento do ângulo zenital do sol levou a uma maior contribuição das folhas, as quais têm alta absorção neste comprimento de onda, e diminuição da contribuição do solo, conseqüentemente causando uma diminuição do FRB do dossel.

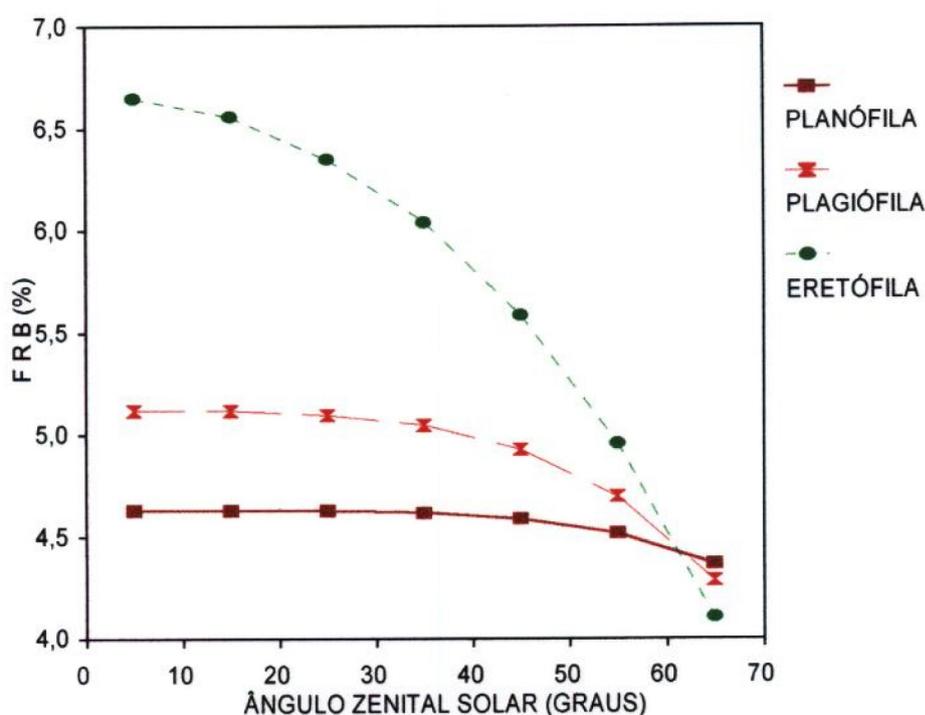


Fig. 4.34 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 1 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm.

Para IAF acima de 4 (Figuras 4.36 e 4.37), situação em que já ocorreu a saturação da absorção, grandes ângulos zenitais do sol aumentam a probabilidade do feixe de radiação direta não encontrar obstáculo (probabilidade de "gap"), causando assim uma maior iluminação do solo, e conseqüentemente aumentando ligeiramente a reflectância para ângulos de iluminação acima de um valor crítico. Este ângulo crítico pode ser observado na Figura 2.2 da página 35, onde substituiu-se neste caso o ângulo de visada pelo ângulo zenital do sol.

Na região do IVP, para o comprimento de onda de 852,0 nm, verifica-se que o aumento do FRB com o aumento do ângulo zenital do sol foi geral, tendo como exceção do dossel eretófilo com IAF igual a 8 (Figura 4.40). Mais uma vez, observa-se que o aumento do FRB das planófilas e plagiófilas ocorreu após 50° e 45° respectivamente (Figuras 4.38, 4.39 e 4.40).

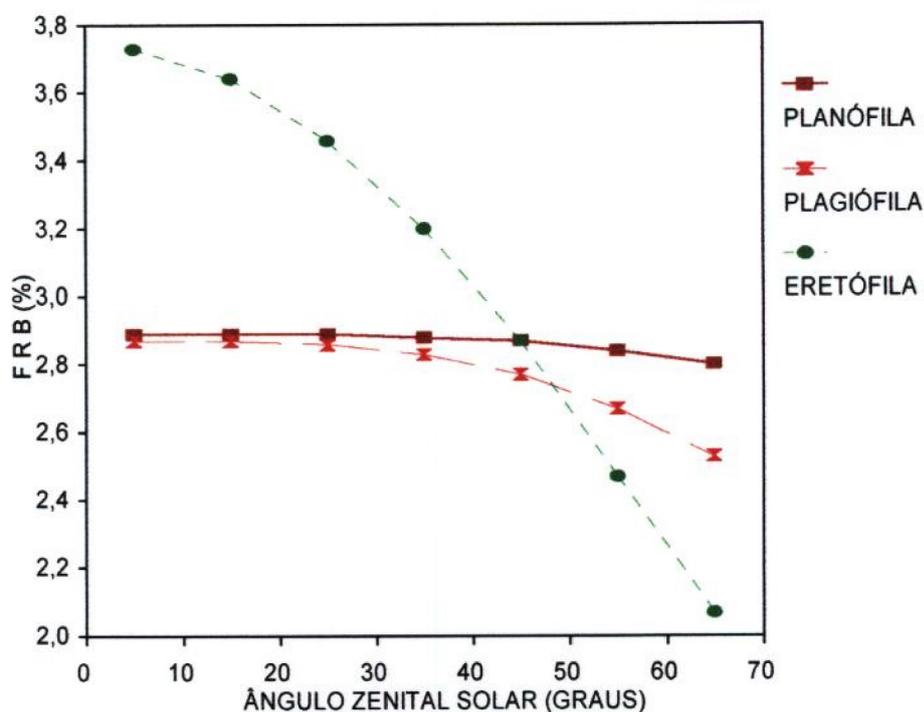


Fig. 4.35 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 2 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm.

Pelos resultados obtidos nesta análise, pode-se concluir que para o dossel planófilo, não houve grande sensibilidade ao ângulo zenital do sol na faixa de ângulos em que as medidas de campo foram realizadas.

Como não foram realizadas medidas em uma parcela ao longo do dia, de modo a verificar a resposta espectral da cultura com a variação do ângulo zenital do sol, não foi possível verificar se existe esta tendência de variação no campo. Entretanto, Ranson et al. (1985) verificaram que em uma cultura de soja com 99% de cobertura do solo e IAF igual a 2,9, o FRB tomado com visada do sensor no nadir não variou com o aumento do ângulo solar projetado, para as bandas do vermelho e IVP.

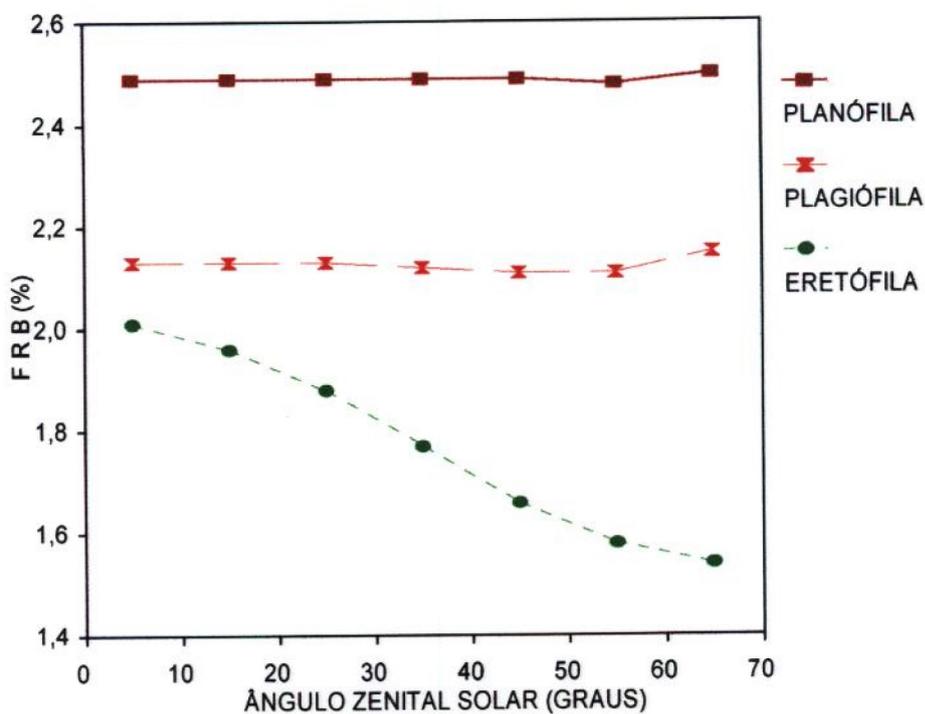


Fig. 4.36 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 4 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm.

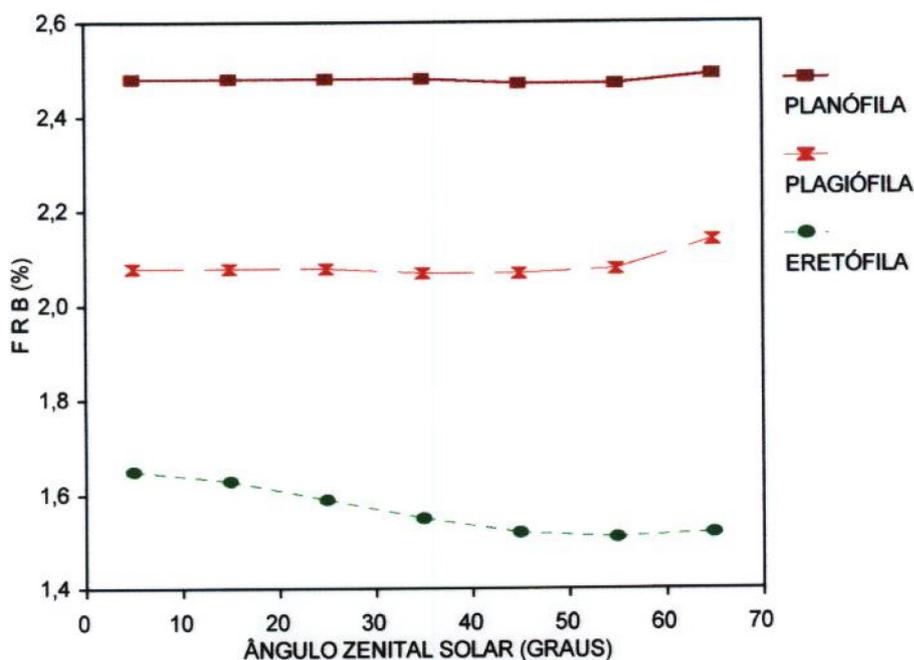


Fig. 4.37 - FRB calculado pelo modelo SAIL para dosséis de soja com IAF 8 e três tipos diferentes de DAF, como função do ângulo zenital solar. Comprimento de onda de 652,5 nm.

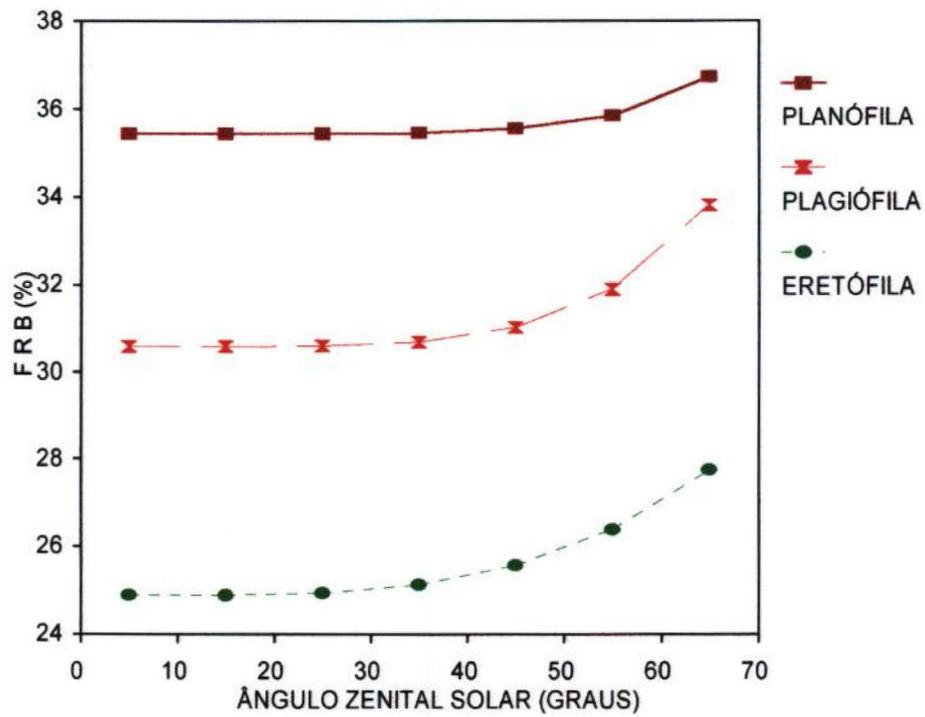


Fig. 4.38 - FRB para o comprimento de onda de 852,0 nm para três tipos diferentes de DAF com IAF 1, como função do ângulo zenital solar.

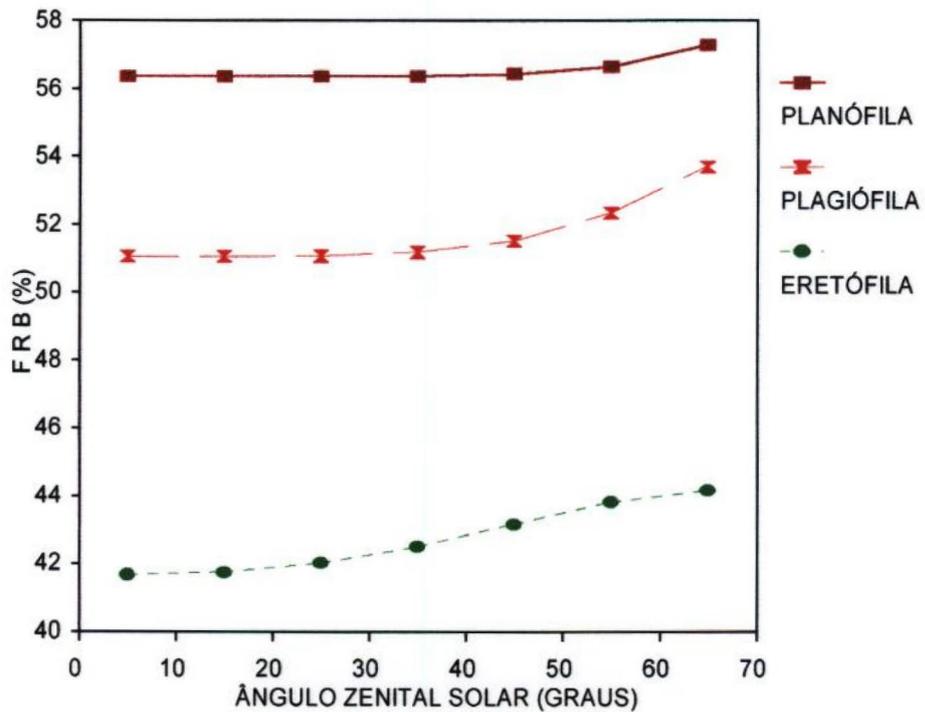


Fig. 4.39 - FRB para o comprimento de onda de 852,0 nm para três tipos diferentes de DAF com IAF 4, como função do ângulo zenital solar.

As campanhas radiométricas de campo eram demoradas (até 2 horas para as 30 parcelas) devido ao grande número de medidas. Entretanto, neste trabalho não foi encontrado nenhuma tendência de aumento ou diminuição dos erros do início ao fim de cada campanha, ou seja, não foi verificada nenhuma tendência de dependência dos erro em relação ao ângulo solar.

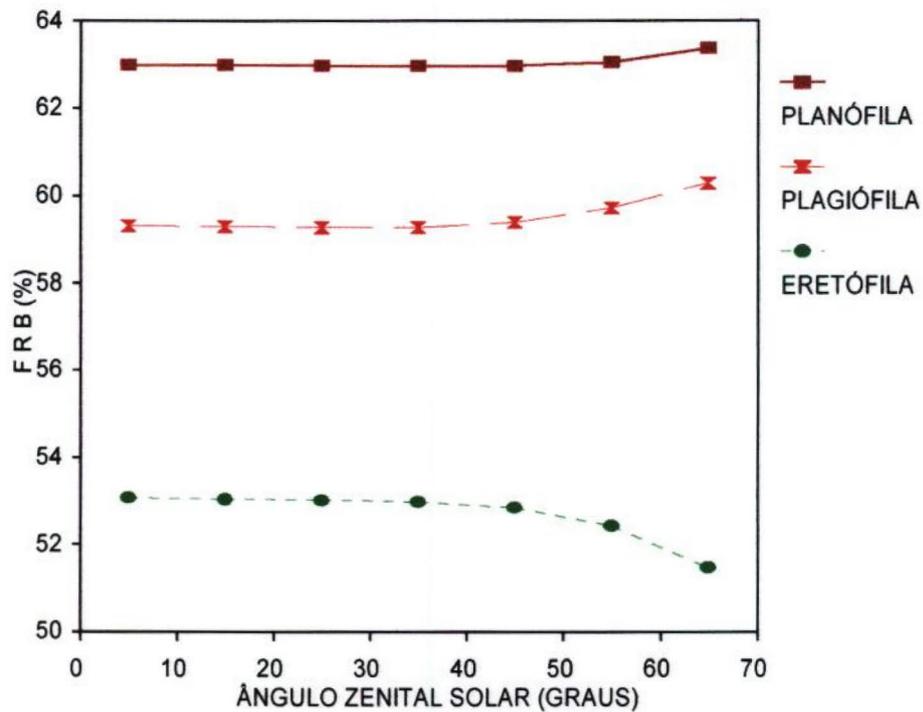


Fig. 4.40 - FRB para o comprimento de onda de 852,0 nm para três tipos diferentes de DAF com IAF 8, como função do ângulo zenital solar.

Assim, pelo fato de se ter analisado conjuntos de dados com medidas realizadas sob diferentes ângulos zenitais do sol, não dificulta as análises comparativas dos resultados.

4.4.6 - FLUXO DIFUSO

Durante cada campanha radiométrica foi impraticável realizar medidas do fluxo difuso para cada parcela. Estas medidas foram tomadas no início e no final de cada campanha. Entretanto, o fluxo difuso pode sofrer variações ao longo do tempo, devido a mudanças nas condições atmosféricas e ângulo solar.

Assim, para as simulações foi utilizada a percentagem de fluxo difuso (PDIF) média, obtida de todas as medidas feitas no campo com o sombreamento da placa

de sulfato de bário. Na Figura 3.4 da página 49 pode-se ver as curvas de mínima, média e máxima da PDIF medidas no campo.

Esta análise de sensibilidade foi para verificar se o uso da média tem potencial para gerar erros nas simulações, e conseqüentemente levar a erros nas análises dos resultados. Para as simulações foi utilizado o valor de 30° para ângulo solar depara o fluxo direto.

Foi verificado que o modelo não teve grande sensibilidade à PDIF para os valores de IAF 1, 2, 4 e 8, para as DAF planófila, plagiófila e eretófila. A Figura 4.41 contém as curvas do FRB_n para a PDIF máxima, PDIF mínima, e para a máxima multiplicado por 1,5, para uma cultura de soja com IAF igual a 4.

Observa-se na Figura 4.41, que não houve influência da PDIF no FRB_n da cultura na faixa de 514,0 nm a 918,6 nm. Esta não influência da PDIF no FRB_n pode ser melhor visualizada na Figura 4.42, onde se percebe que para uma cultura planófila, a diferença de FRB_n para o fluxo 100% difuso e para 100% direto foi muito pequena. Esta diferença foi menor ainda para o IAF igual a 8.

Nota-se também na Figura 4.42, que as diferenças ocorreram apenas na região do IVP, onde a absorção das folhas de soja é quase inexistente. Cabe observar que nesta figura as curvas para o fluxo 100% difuso não aparecem porque coincidem com aquelas do fluxo difuso médio.

Com relação ao dossel eretófilo e plagiófilo, observou-se que o FRB_n tendeu a aumentar em relação à planófila com o efeito do fluxo difuso. Já no caso de dossel eretófilo com IAF igual a 1, ocorreram pequenas diferenças, até mesmo na faixa visível do espectro.

Verifica-se, portanto, que o modelo SAIL tem uma baixa sensibilidade à quantidade do fluxo difuso, para as condições deste experimento.

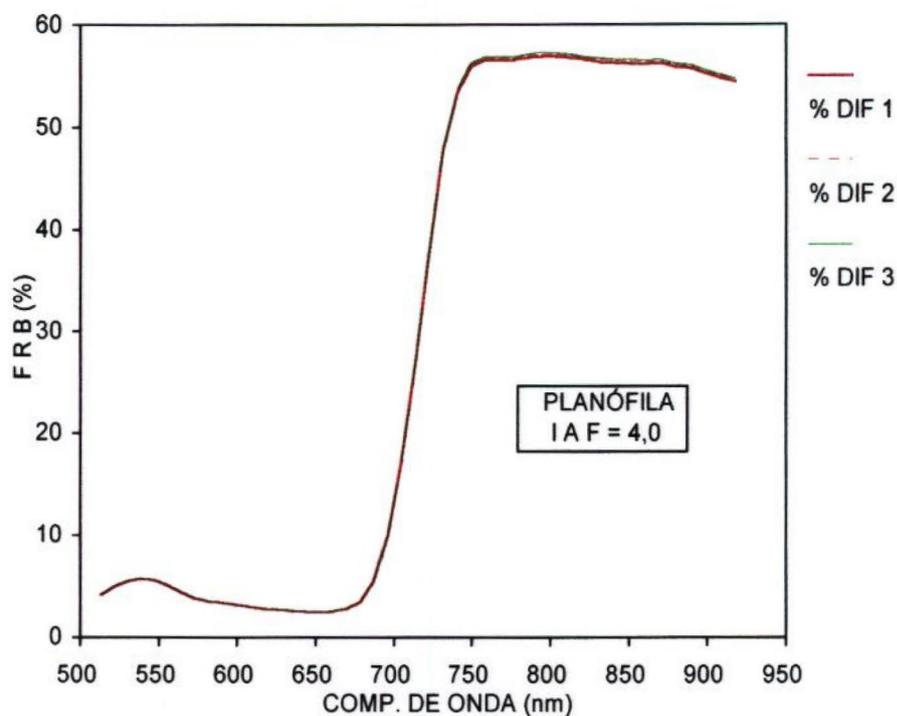


Fig. 4.41 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para um dossel de soja planófilo com IAF 4 e três condições de percentagem de fluxo difuso. PDIF 1 é a mínima medida no campo, PDIF 2 é a máxima medida no campo e PDIF 3 é a máxima medida no campo multiplicada por 1,5.

Estes resultados condizem com aqueles encontrados por Badhwar et al. (1985). Os autores encontraram uma baixa sensibilidade do modelo SAIL à percentagem de fluxo difuso. Segundo os autores, mudanças na razão entre fluxo difuso/fluxo direto por um fator de 2, produziram mudanças menores que 0,5% nos cálculos do modelo.

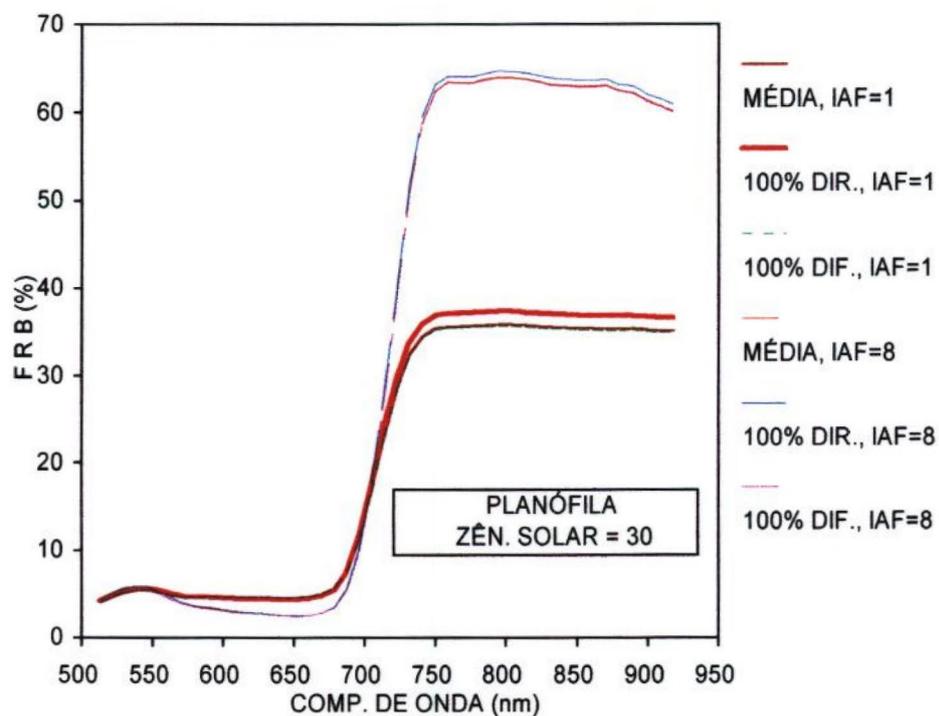


Fig. 4.42 - FRB calculado pelo modelo SAIL versus comprimento de onda, para um dossel de soja planófilo e três condições de fluxo difuso incidente (PDIF igual à média das medidas de campo, incidência 100% direta e incidência 100% difusa). O IAF utilizado foi de 1 e 8, e ângulo zenital solar de 30 graus para o fluxo direto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Das análises dos resultados discutidos no capítulo anterior, as seguintes conclusões podem ser tiradas deste trabalho:

- os modelos SUITS e SAIL tiveram um desempenho satisfatório para a simulação do FRB da cultura de soja;
- a regressão linear simples entre o FRB medido e calculado pelo modelo SAIL forneceu valores de r^2 de 0,77 para comprimentos de onda no centro da faixa do vermelho, e de 0,74 para os comprimentos de onda na faixa de 740 nm a 861 nm;
- os dois modelos são válidos para a simulação do FRB da soja, nas condições do experimento de campo utilizado e descrito neste trabalho;
- os dois modelos estudados tiveram um comportamento similar, em termos de tendência de resposta. Entretanto, o modelo SAIL foi ligeiramente superior ao SUITS, sendo esta conclusão de acordo com os resultados encontrados por Verhoef e Bunnik (1981), Verhoef (1984) e Badhwar et al. 1985);
- devido ao melhor desempenho, o modelo SAIL é mais apropriado para aplicações em estudos que envolvem a simulação das propriedades espectrais de alvos;
- os dois modelos em estudo subestimaram o FRB do dossel na faixa do vermelho, até quando a percentagem de cobertura estava em torno de 50% a 60%. Com o aumento da percentagem de cobertura esta tendência desapareceu;
- para o comprimento de onda de 705,5 nm, que fica na transição entre o vermelho e o IVP, os dois modelos em estudo superestimaram o FRB do dossel em todas campanhas radiométricas, enquanto que para o comprimento de onda de 804,3 nm não foi verificada nenhuma tendência;
- para os comprimentos de onda de 547,5 nm e 705,5 nm foi observado que os erros são quase totalmente de mesmo sinal para as condições em que este trabalho foi realizado, indicando que é possível aplicar um fator ao FRB calculado com a finalidade de se corrigir os erros;

- o modelo SAIL tem potencial para aplicações em estudos teóricos das relações entre o fator de reflectância bidirecional e as variáveis como: IAF, DAF, reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas e FRB do solo;
- os resultados das simulações do FRB através dos dois modelos não dependem da densidade do dossel na vertical. Ou seja, se as propriedades biofísicas do dossel são mantidas constantes, não importa se os componentes estão adensados em uma fina camada ou espalhados em uma grossa camada. Entretanto ainda permanece a dúvida se este parâmetro influencia o FRB real do dossel;
- a análise de sensibilidade do modelo SAIL permitiu concluir, que erros na determinação de alguns parâmetros de entrada podem levar a variações nos resultados dos modelos. Em ordem decrescente de importância, estes parâmetros são:
 - a) distribuição angular de folhas;
 - b) reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas;
 - c) reflectância do solo, neste caso somente para baixos valores de IAF;
- o estudo de sensibilidade do modelo SAIL mostrou que, para as condições do experimento de campo descrito neste trabalho, variações na percentagem de fluxo difuso e no ângulo solar não afetaram as simulações do FRB, nas condições em que as campanhas foram realizadas. Assim, provavelmente não afetaram os resultados obtidos. Conclui-se que não há necessidade de se ter uma grande precisão na estimativa do fluxo difuso, para entrada no modelo;
- para a faixa do vermelho, o ponto de saturação do FRB medido e calculado foi para valores de IAF entre 2 e 4. Para o IVP a saturação não foi verificada porque o IAF medido no campo foi abaixo de 6,5 (à exceção de 2 parcelas). Portanto, para a faixa do IVP, espera-se que a saturação ocorra para IAF acima de 6,5, conforme pôde ser verificado na análise de sensibilidade.

Com base nas conclusões deste trabalho, nos problemas enfrentados e na experiência adquirida, as seguintes sugestões são apresentadas para trabalhos futuros:

- para entrada nos modelos, utilizar valores de reflectância e transmitância direcional hemisférica de folhas medidas nas mesmas plantas em que foram realizadas as medidas de FRB;
- realizar estudos para o desenvolvimento das técnicas de obtenção da distribuição angular de folhas e estudos visando determinar qual o tipo de função é mais adequada para descrever este parâmetro;
- utilizar medidas do FRB do solo feitas no mesmo local onde a cultura for implantada e, para dosséis com cobertura total do solo, utilizar FRB medido em condições de iluminação totalmente difusa;
- verificar, para um maior número de arranjos de condições de iluminação, visada e propriedades ópticas e arquiteturas do dossel, a possibilidade de se aplicar uma correção para o FRB calculado, melhorando assim os resultados sem a necessidade de se fazer um refinamento nos modelos (Travelho, 1992);
- verificar se um refinamento do modelo SAIL traz ganhos significativos no sentido de diminuir os erros nas simulações. As seguintes modificações são sugeridas: adaptar os programas para uma segunda, ou mesmo terceira iteração nos cálculos dos fluxos dentro do dossel; inclusão do efeito da reflexão especular; inclusão das diferenças de propriedades ópticas entre as duas faces das folhas aumentando o número de coeficientes das equações; adaptar os modelos para distribuição azimutal de folhas não isotrópica, de preferência distribuição tridimensional (Kimes e Kirchner, 1983), ao invés de separadamente o azimute e a inclinação;
- devido à pouca sensibilidade do modelo do SAIL à percentagem de fluxo difuso, recomenda-se o desenvolvimento de modelos simples e aproximados que possam ser utilizados no cálculo deste parâmetro. Isto pode minimizar o tempo de coleta de dados, sem prejuízo para os resultados dos modelos de reflectância de dossel;
- realizar estudos para determinar a sensibilidade do FRB medido no campo em relação à densidade do dossel na vertical, para verificar se é necessário incluir este parâmetro nos modelos de transferência radiativa;
- como consequência e evolução natural dos trabalhos envolvendo modelos de transferência radiativa, dar início à utilização destes para estudos de absorção de radiação pelas plantas, utilização para determinação da fração de radiação

fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel, e em estudos de modelagem do crescimento e produtividade das culturas;

- utilização dos modelos e de dados radiométricos de soja adquiridos no campo para a realização de estudos do comportamento espectral de diferentes variedades, para aplicação na identificação da cultura, separação de variedades e determinação de fitomassa e de IAF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, W.A.; Gausman, H.W.; Richardson, A.J. Willstätter-Stoll theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing. **Applied Optics**, **12**(10):2448-2453, Oct. 1973.
- Allen, W.A.; Gayle, T.V.; Richardson, A.J. Plant-canopy irradiance specified by Duntley equations. **Journal of the Optical Society of America**, **60**(8):372-676, Aug. 1970.
- Allen, W.A.; Richardson, A.J. Interaction of light with a plant canopy. **Journal of the Optical Society of America**, **58**(8):1023-1028, Aug. 1968.
- Antyufeev, V.S.; Marshak, A.L. Monte Carlo method and transport equation in plant canopies. **Remote Sensing of Environment**, **31**(3):183-191, Mar. 1990.
- Badhwar, G.D.; Verhoef, W.; Bunnik, N.J.J. Comparative study of Suits and SAIL canopy reflectance models. **Remote Sensing of Environment**, **17**(2):179-195, Apr. 1985.
- Bauer, M.E.; Daughtry, C.S.T.; Vanderbilt, V.C. Spectral-agronomic relationships of maize, soybean and wheat canopies. In: **Colloque International Signatures Spectrales d'Objets in Télédétection**, Avignon, France, 8-11 Sept. 1981. Montjivet, INRA, 1981, p. 261-272.
- Baungardner, M.F.; Silva, L.R.; Biehl, L.L.; Stoner, E.R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, **38**(1):1-43, 1985.
- Beeth, D.R. **Bidirectional plant canopy reflection models derived from the radiative transfer equation**. Washington, DC, NASA, 1975. 104 p. (NASA TN D-8106).
- Berkhout, J.A.A. The potential of numerical agronomic simulation models in remote sensing. In: **International Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management**, 7., Enschede, 25-29 Aug. 1986. **Proceedings**. Enschede, ITC, 1986, v. 2, p. 907-911.
- Blad, B.L.; Baker, D.G. Orientation and distribution of leaves within soybean canopies. **Agronomy Journal**, **64**(1):26-29, Jan./Fev. 1972.
- Breece III, H.T.; Holmes, R.A. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn "in vivo". **Applied Optics**, **10**(1):119-127, Jan. 1971.
- 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, Wageningen, 1978. 175 p.
- Chance, J.E.; LeMaster, E.W. Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests. **Applied Optics**, **16**(2):407-412, Feb. 1977.
- Chance, J.E.; LeMaster, E.W. A test of the Suits vegetative-canopy reflectance model with LARS soybean-canopy reflectance data. **International Journal Remote Sensing**, **6**(5):665-672, May 1985.
- Chandrasekhar, S. **Radiative transfer**. New York, Dover Publications, 1960. 393 p.

- Chen, J. The reciprocity relation for reflection and transmission of radiation by crops and other plane-parallel scattering media. **Remote Sensing of Environment**, 13(6):475-486, 1983.
- Cohen, K.J.; Cyert, R.M. Computer models in dynamic economics. **Quarterly Journal of Economics**, 75(1):112-127, Feb. 1961.
- Collins, W. Remote sensing of crop type and maturity. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 44(1):43-55, Jan. 1978.
- Colwell, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 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. **Agronomy Journal**, 74(4):744-751, July/Aug. 1982.
- Draper, N.R.; Smith, H. **Applied Regression Analysis**. New York, John Wiley & Sons, 1967. 407 p.
- Duggin, M.J. The measurement of reflectance factors. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46(5):643-647, May 1980.
- Duntley, S.Q. The optical properties of diffusing materials. **Journal of the Optical Society of America**, 32(2):61-71, 1942.
- Epiphonio, J.C.N.; Vitorello, I. Inter-relations between view angles (azimuth) and surface moisture and roughness conditions in field measured radiometer reflectances of an oxisol. In: **Colloque International Signatures Spectrales d'Objets in Télédétection**, 4., Bordeaux, France, 12-16 Sept. 1983. Montjivet, INRA, 1984, p. 185-192.
- Gates, D.M.; Keegan, H.J.; Schleter, J.C.; Weidner, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, 4(1):11-20, Jan. 1965.
- Gausman, H.W. **Plant leaf optical properties in visible and near-infrared**. Lubbock, TX, Graduate Studies Texas Tech University, Texas Tech Press, 1985. 78 p. (Graduate Studies N. 29).
- Gausman, H.W. Reflectance of leaf components. **Remote Sensing of Environment**, 6(1):1-9, 1977.
- Gausman, H.W.; Allen, W.A.; Escobar, D.E. Refractive index of plant cell walls. **Applied Optics**, 13(1):109-111, Jan. 1974.
- Gerstl, S.A.W.; Zardecki, A. Coupled atmosphere/canopy model for remote sensing of plant reflectance features. **Applied Optics**, 24(1):94-103, Jan. 1985.
- Goel, N.S. **A review of crop canopy reflectance models**. Binghamton, N.Y., NASA, 1982. (NASA CR-167716).

- Goel, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, 4(1):1-212, 1988.
- 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. **Remote Sensing of Environment**, 13(6):487-507, 1983.
- Goel, N.S.; Strebel, D.E. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. **Agronomy Journal**, 76(5):800-802, Sept./Oct. 1984.
- Goel, N.S.; Thompson, R.L. Inversion of canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. Estimation of leaf area index and average leaf angle using measured canopy reflectances. **Remote Sensing of Environment**, 16(1):69-85, 1984.
- Goel, N.S.; Grier, T. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data: I. Two-dimensional row canopy. **International Journal Remote Sensing**, 7(5):665-681, May 1986.
- Goel, N.S.; Grier, T. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data: III. TRIM: A model for radiative transfer in heterogeneous three-dimensional canopies. **Remote Sensing of Environment**, 25(3):255-293, Aug. 1988.
- Gupta, R.K.; Woolley, J.T. Spectral properties of soybean leaves. **Agronomy Journal**, 63(1):123-126, Jan./Feb. 1971.
- Gutschick, V.P.; Wiegell, F.W. Radiation transfer in vegetative canopies and other layered media: Rapidly solvable exact integral equation not requiring fourier resolution. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, 31(1):71-82, 1984.
- Guyot, G.; Baret, F. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR measurements. **Remote Sensing of Environment**, 35(2-3):161-173, Feb./Mar. 1991.
- Hatfield, J.L. Remote Sensing estimators of potential and actual crop yield. **Remote Sensing of Environment**, 13(4):301-311, Sept. 1983.
- Horler, D.N.H.; Dockray, m.; Barber, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal Remote Sensing**, 4(2):273-288, Feb. 1983.
- Huete, A.R. Soil and sun angle interaction on partial canopy spectra. **International Journal Remote Sensing** 8(9):1307-1317, Sept. 1987.
- Idso, S.B.; De Wit, C.T. Light relations in plant canopies. **Applied Optics**, 9(1):177-184, Jan. 1970.
- Izumiyama, I. Coleta de parâmetros agronômicos em experimento de campo com soja e implicações com a fisiologia da planta. Planaltina, DF, jan./fev./mar. 1990. Comunicação pessoal.

- Jackson, R.D.; Reginato, R.J.; Pinter, P.J.; Idso, S.B. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops. **Applied Optics**, 18(22):3775-3782, Nov. 1979.
- Judd D.B. Terms, definitions, and symbols in reflectometry. **Journal of the Optical Society of America**, 57(4):445-452, Apr. 1967.
- Kauth, R.J.; Thomas, G.S. The tasseled cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Symposium on Machine Processing of Remotely sensed Data, 10., West Lafayette, IN, 1976. **Proceedings**. Purdue University, 1976, p. 41-51.
- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A. Diurnal variations of vegetation canopy structure. **International Journal Remote Sensing**, 4(2):257-271, Apr./June 1983.
- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. **Applied Optics**, 21(22):4119-4129, Nov. 1982.
- Knipling, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation for vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 1(3):155-159, 1970.
- Kollenkark, J.C.; Daughtry, C.S.T.; Bauer, M.E.; Housley, T.L. Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. **Agronomy Journal**, 74(4):751-758, July/Aug. 1982a.
- Kollenkark, J.C.; Vanderbilt, V.C.; Daughtry, C.S.T.; Bauer, M. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. **Applied Optics**, 21(7):1179-1184, Apr. 1982b.
- Kumar, R.; Silva, L. Light ray tracing through a leaf cross Section. **Applied Optics**, 12(12):1950-2954, Dec. 1973.
- LeMaster, E.W.; Chance, J.E.; Wiegand, C.L. A seasonal verification of the Suits spectral reflectance model for wheat. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46(1):107-114, May 1980.
- Maas, S.J.; Dunlap, J.R. Reflectance, transmittance, and absorptance of light by normal, etiolated, and albino corn leaves. **Agronomy Journal**, 81(1):105-110, Jan./Feb. 1989.
- Major, D.J.; Schaalje, G.B.; Wiegand, C.; Blad, B.L. Accuracy and sensitivity analysis of SAIL model-predicted reflectance of maize. **Remote Sensing of Environment**, 41(1):61-70, July 1992.
- McCuen, R.H. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. **Journal of Hidrology**, 18(1):37:53, 1973.
- Milton, E. Principles of field spectroscopy. **International Journal Remote Sensing**, 8(12):1807-1827, Dec. 1987.
- Myers, V.I.; Allen, W.A. Electro-optical remote sensing methods as nondestructive testing and measuring techniques in agriculture. **Applied Optics**, 7(9):1819-1838, Sept. 1968.

- Myers, V.I.; Wiegand, C.L.; Heilman, M.D.; Thomas, J.R. Remote sensing in soil water conservation research. In: *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 4., Ann Arbor, 12-14 Apr. 1966. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1966 p. 801-813.
- Myneni, R.B.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T. Light scattering in plant canopies: The method of successive orders of scattering approximations (SOSA). **Agricultural Forest Meteorology**, 39(1):1-12, Jan. 1987a.
- Myneni, R.B.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T. Reflectance of a soybean canopy using the method of successive Orders of Scattering Approximations (SOSA). **Agricultural Forest Meteorology**, 40(1):71-87, June 1987b.
- Myneni, R.B.; Ross, J.; Asrar, G. A review on the theory of photon transport in leaf canopies, **Agricultural Forest Meteorology**, 45(1-2):1-153, Feb. 1989.
- Naylor, T.H.; Finger, J.M. Verification of computer simulation models. **Management Science**, 14(2):B92-B101, Oct. 1967.
- Nichiporovich, A.A. Properties of plant crops as an optical system. **Soviet Plant Physiology**, 8(5):428-435, 1962
- Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; HSIA, J.J.; Ginsberg, I.W.; Limpers, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington, DC, U. S. Dep. of Commerce, 1977. 52 p. (NBS Monograph 160).
- Norman, J.M.; Welles, J.M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, 75(3):481-488, May/June 1983.
- Norman, J.M.; Welles, J.M. ; Walter, E.A. Contrasts among bidirectional reflectance of leaves, canopies and soils. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-23(5):659-667, Sept. 1985.
- Park, J.K.; Deering, D.W. Simple radiative transfer model for relationships between canopy biomass and reflectance. **Applied Optics**, 21(2):303-309, 1982.
- Pearson, R.L.; Miller, L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 8., Ann Arbor, 2-6 Oct. 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1972. v. 2, p. 1355-1379.
- Pinter, P.J.; Jackson. R.D.; Idso, S.B.; Reginato, R.J. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in water stressed wheat and barley. **International Journal Remote Sensing**, 2(1):43-48, Jan./Mar. 1981.
- Ranson, K.J.; Biehl, L.L.; Bauer, M.E. Variation in spectral response of soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry. **International Journal Remote Sensing**, 6(12):1827-1842, Dec. 1985.
- Ranson, K.J.; Biehl, L.L.; Daughtry, C.S.T. **Soybean canopy reflectance modeling data sets**. West Lafayette, NASA, 1984. (NASA TR-071584).

- Reyna, E.; Badhwar, G.D. Inclusion of specular reflectance in vegetative canopy models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-23(5):731-736, Sep. 1985.
- Richardson, A.J.; Wiegand, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(11):1541-1552, Nov. 1977.
- Richardson, A.J.; Wiegand, C.L.; Gausman, H.W.; Cuellar, J.A.; Gerbermann, A.H. Plant, soil, and shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 41(11):1401-1407, Nov. 1975.
- Robinson, B.F.; Biehl, L.L. Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing research. In: *Measurements of Optical Radiations*. Bellingham, WA, SPIE, 1979. p. 16-26. (SPIE V.196). Proc. Soc. Photo Optical Instrumentation Eng., Orlando, FL, 1979.
- Ross, J. **The radiation regime and architecture of plant stands**. Hague, Dr. W. Junk, 1981. 391 p.
- Ross, J.; Marshak, A.L. Calculation of canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method. **Remote Sensing of Environment**, 24(2):213-225, Mar. 1988.
- Ross, J.; Marshak, A.L. The influence of leaf orientation and the specular component of leaf reflectance on the canopy bidirectional reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 27(3):251-260, Mar. 1989.
- 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**. Beltsville, MD, Oct. 1990. Comunicação pessoal.
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. **Relatório da fase II do Projeto ESTIMA - dados Landsat-TM e agrometeorológicos na estimativa de da produtividade da cultura do trigo ao nível de propriedades rurais**. São José dos Campos, INPE, maio 1989. (INPE-4782-RPE/582).
- Rudorff, B.F.T.; Batista, G.T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. **Remote Sensing of Environment**, 31(1):53-63, Jan. 1990.
- Schutt, J.B. Understanding bidirectional reflectance and transmission for space applications. **Journal of Research of the Nat. Bureau of Standards--A. Chemistry and Physics**, 80A(4):597-603, July/Aug. 1976.
- Schutt, J.B.; Rowland, R.R.; Heartly, W.H. A laboratory investigation of a physical mechanism for the extended infrared absorption ('red shift') in wheat. **International Journal Remote Sensing**, 5(1):95-102, Jan. 1984.
- Shannon, R.E. **Systems simulation: the art and science**. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1975. 387 p.

- Shultis, J.K.; Myneni, R.B. Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering. **Journal Quantum Spectroscopy Radiative Transfer**, **39**(2):115-129, 1988.
- Sinclair, T.R. Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves. **Agronomy Journal**, **65**(2):276-283, Mar./Apr. 1973.
- Slater, P.N. **Remote sensing, optics and optical systems**. Massachusetts, Addison Wesley, 1980. 575 p.
- Smith, J.A.; Oliver, R.E. Plant canopy models for simulating composite scene spectrorradiance in the 0.4 to 1.05 micrometer region. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 8. Ann Arbor, 2-6 Oct. 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1972, v. 2, p. 1333-1353.
- Smith, J.A.; Oliver, R.E. Effects of changing canopy directional reflectance on feature selection. **Applied Optics**, **13**(7):1599-1604, July 1974.
- Strahler, A.H.; Li, X. An invertible coniferous forest canopy reflectance model. International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15., Ann Arbor, 11-15 May 1981. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1981. v. 3, p. 1237-1244.
- Strahler, A.H.; Woodcock, C.E.; Smith, J.A. On the nature of models in Remote Sensing. **Remote Sensing of Environment**, **20**(2):121-139, Oct. 1986.
- Suits, G.H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. **Remote Sensing of Environment**, **2**(2):117-125, Feb. 1972a.
- Suits, G.H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance of vegetative canopies. **Remote Sensing of Environment**, **2**(3):175-182, Oct. 1972b.
- Suits, G.H. Extension of a uniform canopy reflectance model to include row effects. **Remote Sensing of Environment**, **13**(2):113-129, 1983.
- Thomas, J.R.; Gausman, H.W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. **Agronomy Journal**, **69**(5):799-802, Sept./Oct. 1977.
- Travelho, J.S. **Aplicação de fator de correção aos resultados dos modelos SUITS e SAIL**. São José dos Campos, SP, out. 1992. Comunicação pessoal.
- Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, **8**(2):127-150, May 1979.
- Tucker, C.J.; Holben, B.N.; Elgin, J.H.; McMurtrey, J. Relationship of spectral data to grain yield variation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **46**(5):657-666, May 1980.
- Turner, R.E.; Mallila, W.A.; Nalepka, R.F. Importance of atmospheric scattering in remote sensing. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7., Ann Arbor, 17-21 May 1971. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1971, v. 3, p. 1651-1697.

- Verhoef, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, 16(2):125-141, Oct. 1984.
- Verhoef, W.; Bunnik, N.J.J. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. In: **Colloque International Signatures Spectrales d'Objets in Télédétection**, Avignon, France, 8-11 Sept. 1981. Montjavet, INRA, 1981, p. 273-289.
- Walter-Shea, E.A.; Norman, J.M.; Blad, B.L. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean. **Remote Sensing of Environment**, 29(2):161-174, Aug. 1989.
- Wanjura, D.F.; Bilbro, J.D. Ground cover and weathering effects on reflectances of three crop residues. **Agronomy Journal**, 78(4):694-698, July/Aug. 1986.
- Weinman, J.A.; Guetter, P.J. Penetration of solar irradiances thorough the atmosphere and plant canopies. **Journal of Applied Meteorology**, 11(2):136-140, Feb. 1972.
- Woolley, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, 47:656-662, 1971.
- Zar, J.H. **Biostatistical analysis**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1974. 620 p.

APÊNDICE A

CÓDIGOS FORTRAN PARA OS MODELOS SUITS E SAILA.1 - MODELO SUITS

PROGRAM SUITS

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C   *** UNIFORM CANOPY REFLECTANCE MODEL - UNICAN ***
C       G. SUITS - APR89 TRUNCATED VERSION
C
C THE REFLECTANCE FOR A UNIFORM CANOPY IS CALCULATED FOR
C DIRECT SUNLIGHT AND SKYLIGHT SEPARATELY. THE HOT-SPOT
C EFFECT IS CALCULATED AUTOMATICALLY NEAR ONE DEGREE OF THE
C ANTI-SOLAR DIRECTION USING A GAUSSIAN FOR LINE OF SIGHT
C DEPENDENCE.
C
C   *** EXTENDIDO POR M. A. HOMEM ANTUNES - SEP91 ***
C
C ESTA EXTENSAO REQUER QUE NO ARQUIVO DE ENTRADA SEJA
C FORNECIDA A FRACAO DE FLUXO DIFUSO, APOS OS DADOS DE
C REFLECTANCIA DO SOLO. NO ARQUIVO DE SAIDA SERAO GRAVADOS
C TAMBEM A FRACAO DO FLUXO DIFUSO E A REFLECTANCIA ATUAL DA
C CULTURA (REFLECTANCIA DEVIDO AO FLUXO DIRETO VEZES A % DE
C FLUXO DIRETO MAIS REFLEC DEVIDO AO FLUXO DIFUSO VEZES A %
C DE FLUXO DIFUSO), EM PERCENTAGEM.
C
C INPUT DATA: *** NOME DO ARQUIVO VIA TECLADO ***
C   -----
C
C NUMBER OF CANOPY LAYERS =
C
C NUMBER OF SPECTRAL CLASSES OF CANOPY COMPONENTS =
C
C THICKNESSES OF LAYERS WITH NUMBER ONE LAYER AT THE TOP =
C
C LAMBDA INICIAL E FINAL, E NUMERO DE BANDAS OU
C COMPRIMENTOS DE ONDA = C
C
C SPECTRAL CLASS IN ORDER =
C
C SPECTRAL CLASS NAME (STRING VARIABLE) =
C

```

```

C DECIMAL REFLECTANCE TABLE FOR THAT CLASS =
C
C DECIMAL TRANSMITTANCE TABLE FOR THAT CLASS =
C
C SOIL NAME (STRING VARIABLE) =
C
C DECIMAL REFLECTANCE TABLE FOR SOIL =
C
C TABLE OF PROJECTED EXTINCTION COEFFICIENTS OF COMPONENTS
C IN CLASS ORDER - H CLASS 1, V CLASS 1, H CLASS 2, V CLASS
C 2, ETC. FOR LAYER 1 FOLLOWED BY CORRESPONDING DATA FOR
C LAYER 2 =
C
C OUTPUT: *** NOME DO ARQUIVO VIA TECLADO ***
C      -----
C
C   PARA TERMINAR O PROGRAMA, COLOCAR A PALAVRA FIM NA
C   POSICAO DA PARCELA E DATA ( VARIAVEL CN ) APOS
C   AULTIMA PARCELA A SER CALCULADA
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C
C   REAL H1(0:1), AK(0:1,0:3), F0(0:2), F1(0:2), CC(0:2),
1   DD(0:2), U(0:2), V(0:2), WP(0:2), XG(0:2),
2   AKX(0:1,0:2), RC(0:2,260), S(0:1,0:2,0:3),
3   AKH(0:2), AKV(0:2), AM(0:5,0:6), AA(0:2),
4   B(0:24), G(0:2), TN(0:1), T(0:3,260),
5   R(0:3,260), RS(2606), FDIF(260), FDIR(260),
6   RE(0:2,260), REFL(260), WI, WF
C
C   INTEGER N1, NC, NV, NW, LY, IC1, IHV, I, J, L, ISK,
1   IGI, ICI, IRI, ICPI, IN1
C
C   CHARACTER ENTRADA*12, SAIDA*12, CN*30, SOIL*30,
1   CLASS(0:3)*30, NFDIF*30
C
C   WRITE (*,*) ' ARQUIVO DE ENTRADA :'
C
C   READ (*,98) ENTRADA
98 FORMAT (12A)
C
C   WRITE (*,*) ' ARQUIVO DE SAIDA :'
C
C   READ (*,98) SAIDA

```

```

C
  OPEN (6,FILE=ENTRADA,STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
C
  OPEN (5,FILE=SAIDA,STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')
C
C DEGREE TO RADIAN CONVERSION FACTOR = Q
C
  PI = 3.141592654
  Q = PI/180.
C
C
  WRITE (5,200)
200 FORMAT (15X,'UNIFORM CANOPY REFLECTANCE MODEL -
1    UNICAN')

C   ***  LE O NUMERO DA PARCELA E DATA
C
1789 READ (6,130) CN
C
C   ***  VERIFICA SE ESTA NO FINAL DO ARQUIVO   ***
C
  IF (CN.EQ.'FIM') GO TO 2050
C
C N1 = NUMBER OF LAYERS
C NC = NUMBER OF CLASSES
C NV = NUMBER OF VARIABLES IN BOUNDARY MATRIX
C
  READ (6,100) N1, NC
100 FORMAT(2I5)
C
  NV = 2*N1
  N1 = N1-1
  NC = NC-1
C
  READ (6,110) (H1(I),I=0,N1)
110 FORMAT(2F5.2)
C
C WI = WAVELENGTH INITIAL
C WF = WAVELENGTH FINAL
C NW = NUMBER OF WAVELENGTHS
C
  READ (6,120) WI, WF, NW
120 FORMAT(2F8.2,I5)
C
C

```

```

C READ SPECTRAL REFLECTANCE AND SPECTRAL TRANSMITTANCE FOR
C THE CLASSES
C
  DO 1 IC1=0,NC
    READ (6,130) CLASS(IC1)
130  FORMAT(A30)
C
    READ (6,140) (R(IC1,L),L=1,NW)
140  FORMAT(10F6.3)
C
    READ (6,140) (T(IC1,L),L=1,NW)
C
  1 CONTINUE
C
C READ SPECTRAL REFLECTANCE OF SOIL
C
  READ (6,130) SOIL
C
  READ (6,140) (RS(L),L=1,NW)
C
C LE A FRACAO DE FLUXO DIFUSO
C
  READ (6,130) NFDIF
C
  READ (6,140) (FDIF(L),L=1,NW)
C
C READ EXTINCTION COEFFICIENTS FOR LAYER, LY FOR CLASS,
C NC1
C   IHV = 0 HORIZONTAL; IHV = 1 VERTICAL
C
  DO 2 LY=0,N1
    DO 3 IC1=0,NC
      READ (6,150) (S(IHV,LY,IC1),IHV=0,1)
150  FORMAT(2F7.4)
    3 CONTINUE
  2 CONTINUE
C
C
C PRINT THE INPUT DATA
C
  WRITE (5,310) CN
310  FORMAT (' DADOS DE ENTRADA --- ',A30,/)
C
  WRITE (5,320) N1+1, NC+1
320  FORMAT (' NUMERO DE CAMADAS =',I4,5X,NUMERO DE

```

```

1   CLASSES =,I4)
C
  WRITE (5,330) (H1(I),I=0,1)
330 FORMAT (' ESPESSURA EM METROS =',F5.2,' - ',F5.2)
C
  WRITE (5,340) WI, WF
340 FORMAT (' LAMBDA INICIAL = ',F8.2,5X,'LAMBDA FINAL =
1   ',F8.2,5X)
C
  WRITE (5,341) NW
341 FORMAT (' NUMERO DE BANDAS OU COMPRIMENTOS DE ONDA =
1   ',I5)
C
  DO 26 I=0,NC
    WRITE (5,350) CLASS(I)
350  FORMAT (/,A30)
    WRITE (5,365)
365  FORMAT (' REFLECTANCIA')
    WRITE (5,360) (R(I,L),L=1,NW)
360  FORMAT (10F7.4)
    WRITE (5,375)
375  FORMAT (' TRANSMITANCIA')
    WRITE (5,370) (T(I,L),L=1,NW)
370  FORMAT (10F7.4)
26  CONTINUE
C
  WRITE (5,350) SOIL
  WRITE (5,360) (RS(L),L=1,NW)
C
  WRITE (5,350) NFDIF
C
  WRITE (5,360) (FDIF(L),L=1,NW)
C
  WRITE (5,210) CN
210 FORMAT (//,18X,'RESULTADOS --- ',A30,/)
C
C GET TOTAL CANOPY HEIGHT, H
C
  H = 0.
  DO 4 LY=0,NI
4   H = H+H1(LY)
C
C OBTEM A FRACAO DE FLUXO DIRETO
C
  DO 28 L=1,NW

```

```

        FDIR(L)=1.- FDIF(L)
28 CONTINUE
C
C
C READ POLAR SUN ANGLE ( SP ) -- MUST BE LESS THAN 90
  DEGREE
C   ( IF SP > 89.99 THEN SUN ANGLE BELOW HORIZON )
C
C READ SOLAR AZIMUTH ANGLE ( SA )
C
C READ POLAR VIEW ANGLE ( VP ) -- MUST BE LESS THAN 90 DEGREE
C
C READ VIEW AZIMUTH ( VA )
C
152 READ (6,160) IN1, SP, SA, VP, VA
160 FORMAT (I1,4F7.2)
C
C VERIFICA SE OS CALCULOS JA FORAM REALIZADOS, PARA O
C ULTIMO ARRANJO DE ANGULOS DO SOL E DE VISADA, PASSANDO
C PARA A LEITURA DOS DADOS DA PROXIMA PARCELA
C
C *** PARA ISSO, A VARIÁVEL NULA ( IN1 ) DEVE SER 1 ***
C
  IF (IN1.EQ.1) GO TO 1789
C
C
C CALCULATING ANGLE DEPENDENT FACTORS
C
C POLAR FACTORS 0 = SUN, 1 = VIEW
C
C CALCULATE AZIMUTHAL FACTORS RF, TF
C
  TN(0) = 2.*TAN(SP*Q)/PI
  TN(1) = 2.*TAN(VP*Q)/PI
  B = ABS(SA-VA)*Q
C
  IF (B.GT.PI) THEN
    B = 2.*PI-B
  ENDIF
C
  A = SIN(B)
  RF = A
  TF = A
  A = COS(B)
  RF = RF+(PI-B)*A

```

```

      TF = TF-B*A
C
C CALCULATE LINE OF SIGHT PROBABILITIES FOR SUN AND VIEW
C ANGLES
C
C TOTAL FOR HORIZONTAL COMPONENTS, AKH(LY)
C TOTAL FOR VERTICAL COMPONENTS, AKV(LY)
C
      DO 5 LY=0,N1
        AKH(LY) = 0.
        AKV(LY) = 0.
        DO 6 IC1=0,NC
          AKH(LY) = AKH(LY)+S(0,LY,IC1)
          AKV(LY) = AKV(LY)+S(1,LY,IC1)
        6 CONTINUE
      C
      C EXPONENTIAL TERMS
      C
      DO 7 J=0,1
        AK(J,LY) = AKH(LY)+AKV(LY)*TN(J)
        AKX(J,LY) = EXP(-AK(J,LY)*H1(LY))
      7 CONTINUE
      5 CONTINUE
      C
      C HOT SPOT TERM IF VIEW AND SUN ARE CLOSE
      C
      B = (SP-VP)**2 + (SA-VA)**2
      C
      C IF B IS TOO LARGE THEN IGNORE HOT SPOT
      C
      IF (B.GT.10.) THEN
        B = 1.
        GO TO 1310
      ENDIF
      B = 1.-EXP(-B)
      C
      C CALCULATE THE EXPONENTIAL TERMS
      C
      1310 DO 8 LY=0,N1
        AK(2,LY) = AK(1,LY)*B
        AKX(2,LY) = EXP(-AK(2,LY)*H1(LY))
      8 CONTINUE
      C
      C CALCULATE REFLECTANCE SPECTRUM
      C

```

```

DO 9 L=1,NW
  AKXX = 1.
  DO 10 LY=0,N1
    XH = 0.
    XV = 0.
    YH = 0.
    YV = 0.
    DO 11 IC1=0,NC
      XH = XH+R(IC1,L)*S(0,LY,IC1)
      XV = XV+R(IC1,L)*S(1,LY,IC1)
      YH = YH+T(IC1,L)*S(0,LY,IC1)
      YV = YV+T(IC1,L)*S(1,LY,IC1)
11  CONTINUE
C
C  VARIABLES HERE CORRESPOND TO PUBLICATION
C  VARIABLES AS FOLLOWS: A=a, B=b, C=c, Cp=c',
C  G(I), G0=g, R0=f, Aa=A, Bb=B, Cc=C, Dd=D,
C  Wp=w', U=u, V=v
C
  A = AKH(LY)-YH+AKV(LY)-(XV+YV)/2.
  B = XH+(XV+YV)/2.
  C = XH+(XV+YV)*TN(0)/2.
  CP = YH+(XV+YV)*TN(0)/2.
  G0 = SQRT(A*A-B*B)
  R0 = SQRT((A-B)/(A+B))
  F0(LY) = 1.-R0
  F1(LY) = 1.+R0
  U(LY) = YH+(XV+YV)*TN(1)/2.
  V(LY) = XH+(XV+YV)*TN(1)/2.
  XG(LY) = EXP(-G0*H1(LY))
  G(LY) = G0
  WP(LY) = XH+(XV*RF+YV*TF)*TN(0)*TN(1)*PI/8.
  CC(LY) = -(B*CP+A*C-C*AK(0,LY))/(AK(0,LY)
1    *AK(0,LY)-G0*G0)*AKXX
  DD(LY) = -(B*C+A*CP+CP*AK(0,LY))/(AK(0,LY)
1    *AK(0,LY)-G0*G0)*AKXX
  AKXX = AKXX*AKX(0,LY)
10 CONTINUE
C
C  SK = 0 FOR DIRECT SUN; SK = 1 FOR SKY
C  APPLY BOUNDARY CONDITIONS BETWEEN LAYERS
C
DO 12 ISK=0,1
  DO 13 I=0,NV
    DO 14 J=0,NV+1

```

```

      AM(I,J) = 0.
14    CONTINUE
13    CONTINUE
      AKXX = 1.
      AM(1,1) = F1(0)
      AM(1,2) = F0(0)
      AM(1,NV+1) = -DD(0)*(1.-FLOAT(ISK))+FLOAT(ISK)
C
C N1 < 1 MEANS ONLY ONE LAYER
C
      IF (N1.LT.1) GO TO 1930
      DO 15 I=2,N1+1
        LY = I-2
        AKXX = AKXX*AKX(0,LY)
        AM(I,2*LY+1) = -F1(LY)*XG(LY)*XG(LY)
        AM(I,2*LY+2) = -F0(LY)
        AM(I,2*LY+3) = F1(LY+1)*XG(LY)
        AM(I,2*LY+4) = F0(LY+1)*XG(LY)
        AM(I,NV+1) = (DD(LY)*AKX(0,LY)-DD(LY+1))
1          *XG(LY)* (1.-FLOAT(ISK))
15    CONTINUE
C
C SOIL LEVEL
C
1930  AM(N1+2,NV-1) = (F0(N1)-RS(L)*F1(N1))*XG(N1)
1      *XG(N1)
      AM(N1+2,NV) = F1(N1)-RS(L)*F0(N1)
      AM(N1+2,NV+1) = (RS(L)*(DD(N1)+AKXX)-CC(N1))*
1      AKX(0,N1)*XG(N1)*(1.-FLOAT(ISK))
      IF (N1.LT.1) GO TO 2090
      DO 16 I=N1+3,NV
        LY = I-(N1+3)
        AM(I,2*LY+1) = -F0(LY)*XG(LY)*XG(LY)
        AM(I,2*LY+2) = -F1(LY)
        AM(I,2*LY+3) = F0(LY+1)*XG(LY)
        AM(I,2*LY+4) = F1(LY+1)*XG(LY)
        AM(I,NV+1) = (CC(LY)*AKX(0,LY)-CC(LY+1))
1          *XG(LY)* (1.-FLOAT(ISK))
16    CONTINUE
C
C
C ***** SIMQ *****
C
C SOLVE SIMULTANEOUS EQUATIONS FOR COEFFICIENTS TO THE
C EXPONENTIAL EXPRESSION FOR DIFFUSE FLOW. DIAGONALIZE

```

```

C   AND BACK SUBSTITUTION METHOD USED HERE.
C
C
2090  I = 0
      DO 17 ICI=1,NV-1
        A = 0.
        DO 18 IRI=ICI,NV
          IF (ABS(AM(IRI,ICI)).GT.A) THEN
            A = ABS(AM(IRI,ICI))
            I = IRI
          ENDIF
18      CONTINUE
        DO 19 J=ICI,NV+1
          AM(0,J) = AM(I,J)
          AM(I,J) = AM(ICI,J)
          AM(ICI,J) = AM(0,J)
19      CONTINUE
        DO 20 IRI=ICI+1,NV
          B = AM(IRI,ICI)/AM(ICI,ICI)
          DO 21 J=ICI,NV+1
            AM(IRI,J) = AM(IRI,J)-B*AM(ICI,J)
21      CONTINUE
20      CONTINUE
17      CONTINUE
C
      ICPI = NV+1
      AM(0,NV) = AM(NV,ICPI)/AM(NV,NV)
      DO 22 IGI=1,NV-1
        AM(0,NV-IGI) = AM(NV-IGI,ICPI)
        DO 23 J=0,IGI-1
          AM(0,NV-IGI) = AM(0,NV-IGI)-AM(NV-IGI,NV-
1          J)* AM(0,NV-J)
23      CONTINUE
        AM(0,NV-IGI) = AM(0,NV-IGI)/AM(NV-IGI,
1          NV-IGI)
22      CONTINUE
C
C   ASSIGN SOLUTIONS BY LAYER
C
      DO 24 LY=0,N1
        I = 2*LY+1
        J = 2*LY+2
        AA(LY) = AM(0,I)
        BB(LY) = AM(0,J)
24      CONTINUE

```

```

C
C
C ***** INTEGRATION OF LAYER RADIANCES *****
C
C
      VX = 1.
      AKXX = 1.
      R0 = 0.
      XV = 1.
C
C
      DO 25 LY=0,N1
        A = AA(LY)*(F0(LY)*U(LY)+F1(LY)*V(LY))*VX
1       *(1.-AKX(1,LY)*XG(LY))
        B = BB(LY)*(F1(LY)*U(LY)+F0(LY)*V(LY))*VX
1       *(1.-AKX(1,LY)/XG(LY))
        C = (DD(LY)*V(LY)+CC(LY)*U(LY))*VX
        CP = WP(LY)*AKXX*XV
        C = C*(1.-FLOAT(ISK))*(1.-AKX(1,LY)
1       *AKX(0,LY))/(AK(1,LY)+AK(0,LY))
        CP = CP*(1.-FLOAT(ISK))*(1.-AKX(2,LY)
1       *AKX(0,LY))/
1       (AK(2,LY)+AK(0,LY))
        A = A/(AK(1,LY)+G(LY))
        B = B/(AK(1,LY)-G(LY))
        AKXX = AKXX*AKX(0,LY)
        VX = VX*AKX(1,LY)
        XV = XV*AKX(2,LY)
        R0 = R0+A+B+C+CP
25     CONTINUE
C
      A = AA(N1)*F1(N1)*XG(N1) + BB(N1)*F0(N1)/XG(N1)
      A = A + (1.-FLOAT(ISK))*DD(N1)*AKX(0,N1)
C
C FINAL SPECTRAL REFLECTANCE OF CANOPY, RC
C
      RC(ISK,L) = R0+RS(L)*A*VX+RS(L)*(1.-FLOAT(ISK))
1       *AKXX*XV
C
C CALCULA A REFLECTANCIA ATUAL PARA FLUXO 100% DIRETO E
C 100% DIFUSO
C
      IF (ISK.EQ.0) THEN
        RE(ISK,L) = RC(ISK,L)*FDIR(L)
      ELSEIF (ISK.EQ.1) THEN

```

```

      RE(ISK,L) = RC(ISK,L)*FDIF(L)
    ENDIF
  C
  12 CONTINUE
  9 CONTINUE
  C
  C   CALCULA A REFLECTANCIA TOTAL EM PERCENTAGEM
  C
      DO 27 L=1,NW
        REFL(L)=(RE(0,L)+RE(1,L))*100.
  27 CONTINUE
  C
  C
      WRITE (5,250) SP, SA, VP, VA
  250 FORMAT(/,' ANGULOS SOLARES =',2(2X,F6.2),5X,'VISADA
  1   =',2(2X,F6.2))
  C
      WRITE (5,251) WI, WF
  251 FORMAT (' FAIXA = DE ',F8.2,' A ',F8.2)
  C
      WRITE (5,341) NW
  C
      WRITE (5,220)
  220 FORMAT (/,' REFLECTANCIA')
  C
      WRITE (5,240) (RC(0,L),L=1,NW)
  C
      WRITE (5,260) VP, VA
  260 FORMAT (/,' REFLECTANCIA DIFUSA',4X,'VISADA
  C   =',2(2X,F6.2))
  C
      WRITE (5,240) (RC(1,L),L=1,NW)
  240 FORMAT (10F7.3)
  C
      WRITE (5,261)
  261 FORMAT (/,' REFLECTANCIA ATUAL DO FLUXO 100% DIRETO')
  C
      WRITE (5,240) (RE(0,L),L=1,NW)
  C
      WRITE (5,262)
  262 FORMAT (/,' REFLECTANCIA ATUAL DO FLUXO 100% DIFUSO')
  C
      WRITE (5,240) (RE(1,L),L=1,NW)
  C

```

```

WRITE (5,264)
264 FORMAT (/, ' REFLECTANCIA TOTAL EM PERCENTAGEM')
C
WRITE (5,263) (REFL(L),L=1,NW)
263 FORMAT (10F7.2)
C
C ** LE A PROXIMA LINHA COM ANGULOS SOLARES E DE VISADA **
C
GO TO 152
C
2050 STOP
END

```

A.2 - MODELO SAIL

```

PROGRAM SAIL
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C
C THE SAIL MODEL, FOR A UNIFORM HOMOGENEOUS CANOPY,
C PROVIDED BY N. BUNNIK AND W. VERHOEF.
C
C FOR DETAILS OF THE MODEL, SEE W. VERHOEF., REMOTE
C SENSING OF ENVIRONMENT, VOL. 16, PP. 125-141, 1984.
C
C
C *** EXTENDIDO POR M. A. HOMEM ANTUNES EM 10/91 ***
C
C INPUT DATA: *** FILE: ENTRAR VIA TECLADO ***
C
C -----
C NB = NUMERO DE BANDAS
C
C PD = NOME OU NUMERO DA PARCELA, E DATA SE
C NECESSARIO
C (F5.2) XL = LEAF AREA INDEX (LAI)
C
C (9F7.4) F = FRACTION OF LEAVES AT DIFFERENT
C INCLINATION ANGLES, I.E., LEAF ANGLE
C DISTRIBUTION (LAD) FOR 9 ANGLES
C 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, AND 85
C DEGREES
C
C (4F6.2) RL = % LEAF REFLECTANCE ( EM NB BANDAS )
C

```

```

C (4F6.2) TL = % LEAF TRANSMITTANCE ( EM NB BANDAS )
C
C (4F6.2) RG = % SOIL REFLECTANCE ( EM NB BANDAS )
C
C (4F6.2) SK = % DIFFUSE SKYLIGHT ( EM NB BANDAS )
C
C
C (11,4F6.0)
C     SUN ZENITH, SUN AZIMUTH, VIEW ZENITH, VIEW
C     AZIMUTH ( IN DEGREES ) ( AS MANY AS DESIRED )
C
C
C     ! IP = DUMMY VARIABLE SET = 0 FOR ALL SOLAR/VIEW
C     DIRECTIONS
C     !   AND IS SET = 1 FOR THE LAST DUMMY
C     SOLAR/VIEW DIRECTION TO TERMINATE THE
C     PROGRAM
C     ! T8 = SUN ZENITH ANGLE ( IN DEGREES )
C
C     ! P8 = SUN AZIMUTH ANGLE ( IN DEGREES )
C
C     ! T9 = VIEW ZENITH ANGLE ( IN DEGREES )
C
C     ! P9 = VIEW AZIMUTH ANGLE ( IN DEGREES )
C
C
C OUTPUT: *** FILE: ENTRAR VIA TECLADO ***
C     -----
C     ECHO OF INPUT DATA
C
C     AV = AVERAGE LEAF ANGLE
C
C     FOR EACH SET OF SOLAR/VIEW DIRECTIONS:
C
C         CR = % CANOPY REFLECTANCE
C
C         NB = NUMERO DE BANDAS (FAIXAS DE
C             COMPRIMENTO DE ONDA)
C
C
C SUBROUTINE: SCR     **** COMPUTE CR ****
C
C
C     F1 = CONVERT FROM DEGREES TO RADIANS
C

```

```

C      F2 = FUNCTION XR = (1 - EXP(-X))/X
C
C      F3 = ARCCOSINE FUNCTION
C
C      PARA TERMINAR O PROGRAMA, COLOQUE A PALAVRA FIM NA
C      POSICAO DA PARCELA E DATA ( PD ), APOS OS DADOS DE
C      TODAS PARCELAS ( PD )
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C      REAL RL(260), TL(260), RG(260), SK(260), R(2,13),
C      1  F(13), CR(260)
C      INTEGER LI(13), NB
C      CHARACTER ENTRADA*12, SAIDA*12, PD*30
C
C      ***  INITIALIZATION  ***
C
C      **  LI = LEAF ANGLES IN DEGREES  **
C
C      WRITE (*,*) ' ARQUIVO DE ENTRADA : '
C
C      READ (*,97) ENTRADA
C      97 FORMAT (12A)
C
C      WRITE (*,*) ' ARQUIVO DE SAIDA : '
C
C      READ (*,99) SAIDA
C      99 FORMAT (12A)
C
C      OPEN (6,FILE=ENTRADA,STATUS='OLD',FORM='FORMATTED')
C
C      OPEN (5,FILE=SAIDA,STATUS='NEW',FORM='FORMATTED')
C
C
C      1090 DO 1 I=1,8
C      1  LI(I) = 10*I-5
C
C      DO 2 I=9,13
C      2  LI(I) = 81+2*(I-9)
C      DO 3 I=1,4
C      3  SK(I) = 0.
C      DO 4 I=1,13
C      4  F(I) = 0.

```

```

C
C   *** READ AND ECHO INPUT DATA ***
C
C
C   LE A PARCELA E A DATA
C
C   READ (6,80) PD
C   80 FORMAT (A30)
C
C   VERIFICA SE ESTA NO FINAL DO ARQUIVO DE ENTRADA
C
C   IF (PD.EQ.'FIM') GO TO 1000
C
C   LE O NUMERO DE BANDAS
C
C   READ (6,81) NB
C   81 FORMAT (I3)
C
C
C   READ (6,100) XL
C   100 FORMAT(F5.2)
C
C
C   WRITE (5,90) PD
C   90 FORMAT (A30,/)
C
C   WRITE(5,200) XL
C   200 FORMAT('MODELO SAIL',//,'DADOS DE ENTRADA',/,TAF =
C   1      ',F5.2,/)
C
C   READ (6,110) (F(I),I=1,9)
C   110 FORMAT(9F7.4)
C
C   DO 5 I=10,13
C   5   F(I) = F(9)/5.
C
C   F(9) = F(9)/5.
C
C   WRITE (5,210) (F(I),I=1,13)
C   210 FORMAT('FUNCAO DE DISTRIBUICAO DE ANGULOS
C   FOLIARES',/,
C   1'ANGULO : 5  15  25  35  45  55  65  75  81',
C   2' 83  85  87  89',/, 'FRACAO :',13F6.4)
C   READ (6,120) (RL(I),I=1,NB)
C

```

```

      READ (6,120) (TL(I),I=1,NB)
C
      READ (6,120) (RG(I),I=1,NB)
C
      READ (6,120) (SK(I),I=1,NB)
120 FORMAT(10F6.2)
C
C   ***  AV IS AVERAGE LEAF ANGLE  ***
C
      AV = 0.
      DO 6 I=1,13
6     AV = AV+F(I)*FLOAT(LI(I))
C
      WRITE (5,220) AV
220 FORMAT (/, 'ANGULO MEDIO = ',F7.4)
C
      WRITE (5,230)
230 FORMAT (/, 'REFLECTANCIA DAS FOLHAS')
      WRITE (5,265) (RL(I), I=1,NB)
C
      WRITE (5,240)
240 FORMAT (/, 'TRANSMITANCIA DAS FOLHAS')
      WRITE (5,265) (TL(I),I=1,NB)
C
      WRITE (5,250)
250 FORMAT (/, 'REFLECTANCIA DO SOLO')
      WRITE (5,265) (RG(I),I=1,NB)
C
      WRITE (5,260)
260 FORMAT (/, 'PERCENTAGEM DE FLUXO DIFUSO')
      WRITE (5,265) (SK(I),I=1,NB)
265 FORMAT (10F7.2,)
C
      WRITE (5,266)
266 FORMAT (//, 'RESULTADOS DO MODELO PARA ESTA PARCELA')
C
C   T8 = SUN ZENITH ANGLE    ( IN DEGREES )
C   P8 = SUN AZIMUTH ANGLE   "
C   T9 = VIEW ZENITH ANGLE   "
C   P9 = VIEW AZIMUTH ANGLE  "
C   PH = RELATIVE AZIMUTH BETWEEN SUN AND VIEWER
C       ( PH < OR = 180 DEG. )
C
1100 READ (6,130) IP, T8, P8, T9, P9
130 FORMAT(I1,4F7.2)

```

```

C
C     CASO TENHA TERMINADO OS CALCULOS PARA TODOS
C     ANGULOS SOLARES E DE VISADA ("DUMMY VARIABLE" =
C     1 ), VAI PARA A PROXIMA PARCELA
C
C     IF (IP.EQ.1) GO TO 1090
C
C     WRITE (5,270) T8,P8,T9,P9
270 FORMAT (//,'ZEN E AZ DO SOL =',F7.2,2X,F7.2,3X,
1     'ZEN E AZ DE VISADA =',F7.2,2X,F7.2)
C
C
C     PH = ABS(P8-P9)
C     IF (PH.GT.180.) THEN
C         PH = 360.-PH
C     ENDIF
C
C     ***   FOR EACH OF NB WAVELENGTHS, COMPUTE CR   ***
C
C     EM = FRACTION OF DIFFUSE SKYLIGHT
C     ES = 1 - FRACTION OF DIFFUSE SKYLIGHT
C     RO = FRACTION OF LEAF REFLECTANCE
C     TA = FRACTION OF LEAF TRANSMITTANCE
C     RS = FRACTION OF SOIL REFLECTANCE
C
C     DO 7 I=1,NB
C         EM = SK(I)/100.
C         ES = 1.-EM
C         RO = RL(I)/100.
C         TA = TL(I)/100.
C         RS = RG(I)/100.
C         CALL SCR(XL,LI,F,T8,T9,RO,TA,EM,ES,RS,PH,R)
C         CR(I) = R(1,1)
C     7 CONTINUE
C
C
C
C     WRITE (5,271)
271 FORMAT ('FATOR DE REFLECTANCIA EM PERCENTAGEM')
C     WRITE (5,280) (CR(I),I=1,NB)
280 FORMAT (10F7.2,)
C
C
C
C     ***   GET ANOTHER SOLAR/VIEW DIRECTION

```

```

C
  GO TO 1100
C
1000 STOP
  END
C
C
  SUBROUTINE SCR (XL,LI,F,T8,T9,RO,TA,EM,ES,RS,PH,R)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C      *****   COMPUTE CR   *****
C
C
C  F1 = CONVERTS FROM DEGREES TO RADIANS
C
C  F2 = EVALUATES A FUNCTION
C
C  F3 = COMPUTES ARCCOSINE
C
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      REAL R(2,13),F(13)
      INTEGER LI(13)
C
      N = 1
      X = 180.
C
      AD = X*ATAN(1.)/45.
      PI = AD
C
      X = PH
C
      AD = X*ATAN(1.)/45.
      PR = AD
      C3 = COS(PR)
      X = T8
C
      AD = X*ATAN(1.)/45.
      A8 = TAN(AD)
      X = T9
C
      AD = X*ATAN(1.)/45.
      A9 = TAN(AD)
      RT = (RO+TA)/2.

```

```

EI = EM+ES
IE = 13
IF (N.EQ.2) THEN
  IE = 2
ENDIF
W = 0.
X8 = 0.
X9 = 0.
G = 0.
C
C
C  CALCULATIONS OF NINE EXTINCTION AND SCATTERING
C  COEFFICIENTS WHICH APPEAR IN THE DIFFERENTIAL
C  EQUATIONS FOR UPWARD AND DOWNWARD DIFFUSE AND
C  SPECULAR FLUXES
C
C  TT = a, EXTINCTION COEFFICIENT FOR DIFFUSE FLUXES
C  SG = sigma, BACKSCATTERING COEFFICIENT FOR DIFFUSE
C  FLUXES
C  SF(SB) = s,(s') FORWARD (BACK) SCATTERING COEFFICIENT
C  FOR SPECULAR FLUX
C  UF,UB,W = u,v,w, RESPECTIVELY, (PHASE FUNCTION
C  PARAMETERS)
C  X8(X9) = k(K), EXTINCTION COEFFICIENT FOR SPECULAR
C  FLUX GROWING
C  DOWN THE CANOPY (TOWARDS THE VIEWING DIRECTION)
C
DO 10 IL=1,IE
  ALT = LI(IL)
  X = ALT
C
  AD = X*ATAN(1.)/45.
  ALR = AD
  S1 = SIN(ALR)
  C1 = COS(ALR)
  S2 = S1**2
  C2 = C1**2
  B8 = PI
  B9 = PI
  IF (ALT.LT.90.) GO TO 2000
  B8 = PI/2.
  B9 = PI/2.
  GO TO 2100
2000 IF ((ALT+T8).LE.90.) GO TO 2500
  YC = -C1/(S1*A8)

```

```

C
  YS = SQRT(1.-YC**2)
  IF (YC.EQ.0.) THEN
    AC = PI/2.
  ENDIF
  IF (YC.GT.0.) THEN
    AC = ATAN(YS/YC)
  ELSE
    AC = ATAN(YS/YC)+PI
  ENDIF
  B8 = AC

C
2500 IF ((ALT+T9).LE.90.) GO TO 2100
     YC = -C1/(S1*A9)

C
  YS = SQRT(1.-YC**2)
  IF (YC.EQ.0.) THEN
    AC = PI/2.
  ENDIF
  IF (YC.GT.0.) THEN
    AC = ATAN(YS/YC)
  ELSE
    AC = ATAN(YS/YC)+PI
  ENDIF
  B9 = AC

C
2100 B1 = ABS(B8-B9)
     B2 = 2.*PI-B8-B9
     IF (PR.GE.B1) GO TO 2200
     Z1 = PR
     Z2 = B1
     Z3 = B2
     GO TO 2300
2200 Z1 = B1
     IF (PR.GE.B2) GO TO 2400
     Z2 = PR
     Z3 = B2
     GO TO 2300
2400 Z2 = B2
     Z3 = PR
2300 T1 = PI*RO-Z2*RT*2
     T2 = 2.*RT*SIN(Z2)
     S = S2*A8*A9
     Y = COS(B8)*COS(B9)
     WH = 2.*T1*C2

```

```

W2 = 2.*T2*S
C
IF (ALT.NE.90.) THEN
  W2 = 2.*T2*C2/Y
ENDIF
W1 = (T1*C3+T2*COS(Z1)*COS(Z3))*S
WV = W1+W2
W = W + (WH+WV)*XL*F(IL)/(2.*PI)
X5 = (2./PI)*((B8-PI/2.)*C1+SIN(B8)*A8*S1)
X6 = (2./PI)*((B9-PI/2.)*C1+SIN(B9)*A9*S1)
X8 = X8+X5*XL*F(IL)
X9 = X9+X6*XL*F(IL)
G = G+F(IL)*C2
10 CONTINUE
C
BF = (RO-TA)/2.*XL*G
TT = (1.-RT)*XL+BF
SG = RT*XL+BF
SB = X8*RT+BF
SF = X8*RT-BF
UB = X9*RT+BF
UF = X9*RT-BF
XM = SQRT(TT**2 - SG**2)
H1 = (TT+XM)/SG
H2 = 1./H1
C = (SF*SG-SB*(X8-TT))/(XM**2-X8**2)
D = (SB*SG+SF*(X8+TT))/(XM**2-X8**2)
E9 = EM-D*ES
E8 = (RS*(D+1.)-C)*ES*EXP(-X8)
Y1 = H1
Y2 = H2
Y3 = (1.-RS*H1)*EXP(-XM)
Y4 = (1.-RS*H2)*EXP(XM)
DE = Y1*Y4-Y2*Y3
A = (Y4*E9-Y2*E8)/DE
B = (-Y3*E9+Y1*E8)/DE
Q = X9+X8
IF ((PH.EQ.0.).AND.(T9.EQ.T8)) THEN
  Q = X9
ENDIF
X = X9+XM
C
XR = (1.-EXP(-X))/X
EP = XR
X = X9-XM

```

C
 $XR = (1.-EXP(-X))/X$
 $EM = XR$
 $X = X9+X8$

C
 $XR = (1.-EXP(-X))/X$
 $EK = XR$
 $X = Q$

C
 $XR = (1.-EXP(-X))/X$
 $EQ = XR$
 $X = Q+XM$

C
 $XR = (1.-EXP(-X))/X$
 $PE = XR$
 $X = Q -XM$

C
 $XR = (1.-EXP(-X))/X$
 $AME = XR$
 $X = Q+X8$

C
 $XR = (1.-EXP(-X))/X$
 $AKE = XR$
 $FP = A*PE+B*AME+C*AKE*ES$
 $FM = H1*A*PE+H2*B*AME+D*AKE*ES$
 $GP = A*EP+B*EM+C*EK*ES$
 $GM = H1*A*EP+H2*B*EM+D*EK*ES$
 $AMS = H1*A*EXP(-XM)+H2*B*EXP(XM)+D*ES*EXP(-X8)$
 $R(N,2) = (UF*GP+UB*GM+W*EQ*ES)/EI*100.$

C
 $R(N,3) = (UF*FP+UB*FM+W*EQ*ES)/EI*100.$

C
 $R(N,4) = R(N,2)-R(N,3)$

C
 $R(N,5) = RS*(AMS*EXP(-X9)+ES*EXP(-Q))/EI*100.$

C
 $R(N,6) = RS*(AMS+ES)*EXP(-Q)/EI*100.$

C
 $R(N,7) = R(N,5)-R(N,6)$

C
 $R(N,8) = (1.-EXP(-X9))*100.$

C
 $R(N,9) = X9*EQ*100.$

C
 $R(N,10) = R(N,8)-R(N,9)$

C
 $R(N,11) = EXP(-X9)*100.$

C
 $R(N,12) = EXP(-Q)*100.$

C
 $R(N,13) = R(N,11)-R(N,12)$

C
 $R(N,1) = R(N,2) + R(N,5)$

RETURN
END