



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5632-TDI/556

**INFLUÊNCIA DO SOLO DE FUNDO E DA GEOMETRIA DA
RADIAÇÃO NA RESPOSTA ESPECTRAL
DA CULTURA DO FEIJÃO**

José Marinaldo Gleriani

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Antonio Roberto Formaggio e José Carlos Neves Epiphânio, aprovada em dezembro de 1994.

528.711.7:63

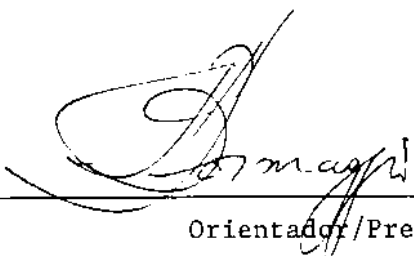
GLERIANI, J. M.

Influência do solo de fundo e da geometria da radiação na resposta espectral da cultura do feijão. / J. M. Gleriani. -- São José dos Campos: INPE, 1994. 87p. -- (INPE-5632-TDI/556)

1. Radiometria. 2. Índice de vegetação.
3. Agricultura. 4. Feijão. I. Título

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

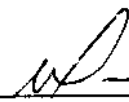
Dr. Antonio Roberto Formaggio


Orientador/Presidente

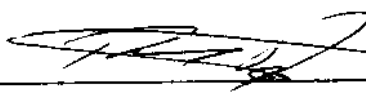
Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff


Membro da Banca

Dr. Mario Valerio Filho


Membro da Banca

Dr. Rubens Angulo Filho


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: José Marinaldo Gleriani

São José dos Campos, 14 de dezembro de 1994

"Se teus projetos são para um ano-
semeia o grão
Se são para dez anos-
planta uma árvore
Se são para cem anos-
instrua o povo
Semeando uma vez o grão-
colherás uma vez
Plantando uma árvore-
colherás dez vezes;
Instruindo o povo
colherás cem vezes.
Se deres um peixe a um homem
ele comerá uma vez
Se, porém, o ensinares a pescar
ele comerá a vida inteira".

Kuan-Tzu, Sábio Chinês,
Séc. VII A.C.

À minha irmã Maria Eliza Gleriani,
Dedico com gratidão e carinho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, porque a vontade de concluir este trabalho foi sempre maior do que os problemas.

Ao Dr. Formaggio, da orientação à ajuda nos trabalhos de campo, do empréstimo da indispensável sala ao empréstimo do automóvel.

Ao Dr. Epitânio pela orientação e os sempre bemvindos conselhos.

À minha família: Joanna, Celina, Cidinha, Antonio, Eliza, Fátima e Benedicto, pelo apoio em todo tipo de dificuldade.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em especial ao Omar, ao Rogério e ao Moraes, pela paciência, prestatividade e braço forte.

Aos componentes da banca examinadora: Dr. Mário Valério Filho, Dr. Rubens Angulo Filho e em especial ao Dr. Bernardo Frederick Teodor Rudorff, pelos conselhos e sugestões e ajuda na análise dos dados.

Aos amigos: Bete, Máximo, Eduardo, Adriano, Prof. Junor, Paulo, "Sergião", Fábio, Zé Luis, Graziela, Rita, Francisco, Orlando, Reinaldo, Nani, Camilo, Silvia, Gerardo, Jorge Gavina, Thelma, Flávio Ponzoni e Márcio Valeriano, pelos empréstimos indispensáveis, pela ajuda amiga, as dicas e o apoio em todo tipo de dificuldade.

À Fundação Banco do Brasil, pelo apoio financeiro.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos.

Ao INPE, pela oportunidade de fazer esse curso.

RESUMO

Na presente pesquisa buscou-se entender o comportamento do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), índice perpendicular de vegetação (PVI) e índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI), quanto a geometria de visada, geometria de observação e solos de fundo. Para observar estas influências instalou-se um experimento no município de Pindamonhangaba (SP) com a cultura do feijão no alinhamento norte-sul. Este experimento constituiu-se da interação de três fatores e três repetições. Estes fatores foram: três solos espectralmente distintos (Latossolo Roxo, Areia, Latossolo Pinda), quatro horários de medição radiométrica (10,11,12 e 13 horas) e dois ângulos zenitais de visada (0 e 30°); a interação desses fatores resultou num experimento fatorial de 24 tratamentos e três repetições. Onze campanhas radiométricas foram realizadas ao longo do ciclo da cultura com o espectroradiômetro Spectron SE-590. Do fator de reflectância calculado simularam-se as bandas TM3(630 a 690nm) e TM4(760 a 900nm) e a partir desses valores foram gerados os índices de vegetação. Realizou-se a análise de variância fatorial utilizando quatro fases do ciclo da cultura. Observou-se que os solos foram sempre um fator significativo no valor dos três índices; a variação do ângulo zenital de visada não trouxe variação significativa e o horário de medição (variação do ângulo solar) só deixou de ser significativa quando o dossel apresentou uma porcentagem de cobertura vegetal de 100%. Quanto as relações dos parâmetros agronômicos com os índices de vegetação, o NDVI foi o índice que apresentou o melhor coeficiente de determinação ($R^2=0.99$) com os parâmetros índice de área foliar e fitomassa, embora apresente uma tendência de saturação elevada para os valores de IAF maior do que dois; o parâmetro agronômico porcentagem de cobertura vegetal foi o pior parâmetro em retratar o desenvolvimento do dossel.

SOIL BACKGROUND AND RADIATION GEOMETRY INFLUENCE ON ESPECTRAL RESPONSE IN BEAN CROP.

ABSTRACT

The objective of this study is to understand the relationships among the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), the PVI (Perpendicular Vegetation Index) the SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) and the illumination geometry, the view angle geometry and the soil background. In order to observe the influence of these parameters, we setup a field experiment in the municipality of Pindamonhangaba (São Paulo State), using beans planted in N-S direction. The experiment consisted of the interaction of three factors times three repetitions. The factors considered were: three soil types spectrally different (Latossolo Roxo, Sand, and Latossolo Série Pinda), four radiometric acquisition times (at 10:00, 11:00, 12:00 and 13:00 o'clock) two zenithal viewing angles (0 and 30°). The result of the factorial interaction of these factors was: 24 factorial treatment and three repetitions. During the growth cycle of this culture, eleven radiometric campaigns were made with the Specton SE-590 spectroradiometer. Based on the calculated reflectance factor, TM-bands 3 (630 to 690nm) and 4 (760 to 900 nm) were simulated, and afterwards also the vegetation indices. The analysis of the factorial variance was performed using four characteristic growth stages of this culture. We observed that the soil types were a significant factor at these three indices. The variation of the viewing geometry did not show any significant change and the illumination geometry (variation of the solar angle) until the canopy, had a coverage of 100% of the soil. As for the relationship among the agronomic parameters and the vegetation indices, the NDVI was the index that presented the best determination coefficient ($R^2 = 0,99$) with the parameters Leaf Area Index and Phytomass. Nevertheless, NDVI showed a tendency to saturation of those IAF values greater than two. The parameter Percentage of Vegetation Coverage was the worst to demonstrate the development of the canopy.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XVI
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE SIGLAS	XXI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 - Radiometria	3
2.2 - Comportamento espectral de alvos agrícolas	5
2.2.1 - Fatores que influenciam na resposta espectral de dosséis agrícolas	6
2.2.1.1 - Porcentagem de cobertura do solo, ângulo de iluminação e orientação de fileiras	6
2.2.1.2 - Índice de área foliar e da fitomassa	10
2.2.1.3 - Influência do substrato	12
2.2.1.4 - Arquitetura de dossel	15
2.3 - Índices de vegetação	19
2.4 - Visadas direcionais	25
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 - Área de estudo, delineamento experimental e tratos culturais	29
3.2 - Medidas Radiométricas	32
3.1 - Parâmetros Agronômicos	37
3.2 - Tratamento dos dados obtidos	38
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 - Geometria da radiação no alvo.....	4
2.2 - Representação de uma cultura em linha.....	7
2.3 - Efeitos dos ângulos de iluminação e visada no FRB de dosséis completos.....	9
2.4 - Fator de reflectância de folhas de milho sobrepostas	11
2.5 - Efeito de sombreamento em solo nu	13
2.6 - Relações entre COV e reflectância no vermelho e infra vermelho próximo	14
2.7 - Modelo de transferência radiativa entre dossel vegetal e o solo	15
2.8 - Comparação entre o fator de reflectância de dosséis planófilo e erectófilo e folhas individuais	16
2.9 - Frequência de distribuição cumulativa de seis arquitetura de dosséis	18
2.10 - Diagrama de quadrante e esquematização e geometria da folha	19
2.11 - Isolinhas de PVI e NDVI (ou RS), e o ponto hipotético de encontro entre a linha do solo e da vegetação	23
2.12 - Isolinhas de vegetação observadas para dosséis de algodão e grama, com diferentes solos de fundo	24
2.13 - Sistema de coordenadas definindo ângulos solar e do sensor, e esquema polar ilustrando os pontos do fator de reflectância direcional	26
3.1 - Disposição geral do experimento no campo	29
3.2 - Diferentes fases do desenvolvimento do feijão	29
3.3 - Equipamento de campo utilizado	32
3.4 - Esquema de amostragem e pontos de estacionamento do mastro para visadas a zero e trinta graus	33
4.1 - Fator de reflectância dos três substratos utilizados	42
4.2 - "Linhas de solo" para os três substratos	43
4.3 - Valores de NDVI para os três fatores estudados.....	43
4.4 - Variação dos valores do NDVI, com NIR fixo em função do R	45
4.5 - Representação esquemática da variação de sombreamento de uma cultura em linha.....	46
4.6 - Valores de PVI para os três valores analisados.....	47
4.7 - Valores de SAVI para os três fatores analisados.....	48
4.8 - Análise de regressão dos Índices NDVI, PVI e SAVI com o parâmetro agronômico IAF	53
4.9 - Análise de regressão dos Índices NDVI, PVI e SAVI com o parâmetro agronômico FST	54
4.10 - Análise de regressão dos Índices NDVI, PVI e SAVI com o parâmetro agronômico COV	55
4.11 - Frequência cumulativa dos ângulos de inclinação das folhas de feijão em três datas diferentes.....	57

LISTA DE TABELAS

	Pág.
3.1 - Tratamentos usados nesse trabalho	32
4.1 - Umidade média (%) dos três substratos e os respectivos estádios fenológi- cos	41
4.2 - Coeficiente de inclinação e intercepto para as linhas de solos individuais	43
4.3- Ângulos zenitais e azimutais solares (em graus) e horas médias em quatro datas de medições	44
4.4- Desdobramento da interação solo x ângulo para os índices NDVI, PVI, SAVI a 22% de COV	49
4.5 - Desdobramento da interação ângulo x solo para os índices NDVI, PVI, SAVI a 22% de COV	49
4.6 - Desdobramento da interação ângulo x horário para os índices PVI e SAVI a 22% de COV	50
4.7 - Desdobramento da interação horário x ângulo para os índices PVI e SAVI a 51% de COV	51
4.8 - Desdobramento da interação ângulo x horário para os índices NDVI e SAVI a 51% de COV	51
4.9 - Desdobramento da interação horário x ângulo para os índices NDVI e SAVI a 51% de COV	52

LISTA DE SIGLAS

COV =	Porcentagem de Cobertura Vegetal
FOV =	"Field of View" (Campo de Visada)
FR =	Fator de Reflectância
FRB =	Fator de Reflectância Bidirecional
FDRB=	Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional.
FST =	Fitomassa Seca Total
IAF =	Índice de Área Foliar
LP =	Latossolo Série Pinda
LR=	Latossolo Roxo
NDVI =	Índice de Vegetação Diferença Normalizada
NIR =	Faixa do infra-vermelho próximo.
PVI =	Índice Perpendicular de Vegetação
R =	Faixa do Vermelho
RS =	Índice de Vegetação Razão Simples
SAVI =	Índice de Vegetação Ajustado para o Solo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde o lançamento do primeiro satélite de sensoriamento remoto de recursos terrestres (LANDSAT-1) em 1972, até os dias de hoje, é crescente o número de pesquisadores das mais diversas áreas que lançam mão do sensoriamento remoto para estudo e monitoramento da superfície terrestre.

Com o aumento da população mundial e a utilização de recursos naturais em escala exponencial, o sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta indispensável nos dias atuais. Em agricultura, os dados de sensores orbitais tem sido bastante utilizados no mapeamento e identificação de culturas agrícolas. Outra importante linha de pesquisa é estimar espectralmente as variáveis agronômicas das culturas, sendo esses dados bons indicadores das condições gerais e da produtividade das culturas.

Para estudo e monitoramento dos alvos agrícolas é desejável uma alta taxa de dados, uma vez que se trata de um alvo extremamente dinâmico, sendo então necessário uma alta resolução temporal. O aumento da resolução temporal dá-se, principalmente, com o uso de sensores com amplos ângulos de varredura, como os sensores HRV/SPOT ($\pm 27^\circ$ perpendicular à trajetória) e o sensor AVHRR/NOAA ($\pm 56^\circ$ perpendicular à trajetória).

Visadas direcionais estão previstas para vários sensores do programa "Earth Observation System" (EOS), entre os quais o "Moderate Resolution Imaging Spectrometer" (Tilt) (MODIS-T) (Salomonson et al., 1989), com visadas $\pm 45^\circ$ transversal à órbita e $\pm 50^\circ$ ao longo da órbita; "High Resolution Imaging Spectrometer" (HIRIS), com visadas $+60/-30^\circ$ ao longo da trajetória e $\pm 24^\circ$ perpendicular à trajetória (Goetz e Herrin, 1989); "Multiangle Imaging SpectroRadiometer" (MISR), utilizando oito câmeras separas ($25,8^\circ$, $45,6^\circ$, 60° , $72,5^\circ$), em relação aos dois lados do nadir (Diner et al. 1989).

Os satélites do programa Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS) também terão sensores com alta resolução temporal, como os sensor "high resolution CCD camera" ($\pm 32^\circ$ perpendicular à trajetória) e o sensor "Wide Field

Imager" (WFI), com uma visada de 885Km no solo que garante uma cobertura completa da Terra em menos de cinco dias (Ghizoni e Yiyuan, 1990).

Muita atenção tem sido direcionada no entendimento das relações entre as características agronômicas do dossel e a resposta espectral do mesmo. Essa resposta espectral transformada, a partir de duas bandas altamente correlacionadas com a vegetação, são comumente chamados "índices de vegetação", e têm sido muito utilizados, principalmente com o objetivo diminuir a influência do sinal do solo, que muito interfere na caracterização do dossel vegetal.

Além do objetivo de entender a relação entre características do dossel e índices de vegetação, faz-se necessário conhecer a estabilidade desses índices quanto às condições de iluminação e detecção do alvo. Todos os alvos são vistos sob condições particulares de iluminação e detecção, e a reflectância ou radiância medida, principalmente de um alvo agrícola, mostra-se altamente dependente das posições da fonte e do sensor. Esses sensores, principalmente quando não visam à nadir, produzem dados espectrais adquiridos numa geometria muito particular.

Dentro deste contexto, a radiometria de campo, que permite maior controle das condições do alvo, é a técnica precisa para estudo das relações dos parâmetros espectrais e as informações sobre o alvo, para o perfeito entendimento da radiação de cena. Assim, os principais objetivos dessa pesquisa são:

- Avaliar a estabilidade da resposta espectral da cultura do feijão expressa pelos índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação Diferença Normalizada), PVI (Índice Perpendicular de Vegetação) e SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo), sobre três tipos de solos, dois ângulos de visada e quatro ângulos de elevação solar ao longo do ciclo da cultura do feijão de inverno.

- Avaliar as relações entre os parâmetros agronômicos e índices de vegetação NDVI, PVI e SAVI para a cultura do feijão, sob diferentes substratos, geometria de iluminação e aquisição.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - RADIOMETRIA

A radiometria de campo é uma técnica de fundamental importância para o sensoriamento remoto, tanto ao nível de pesquisa básica como para aplicações operacionais (Milton, 1987).

Segundo o mesmo autor, a radiometria atua no mínimo em três áreas do sensoriamento remoto: primeiro, agindo como ligação entre as medidas de laboratório e condição de campo, dessa forma, útil na calibração de sensores orbitais e aerotransportados; segundo, é útil na predição de bandas espectrais ótimas, configuração de visada e horário para realizar uma tarefa particular de sensoriamento remoto; e terceiro, fornecer uma ferramenta para o desenvolvimento, refinamento e teste de modelos, relacionando atributos biofísicos para os dados remotamente sensoriados.

A reflectância de uma superfície é definida como a razão do fluxo refletido pelo fluxo incidente nesta superfície (Nicodemus et al., 1977). Segundo Milton (1987), ignorando a radiação difusa e supondo que os ângulos sólidos de incidência e reflexão sejam suficientemente pequenos, a reflectância de um alvo é:

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$$

onde: dL é a radiância refletida por unidade de ângulo sólido,

dE é a irradiância por unidade de ângulo sólido,

θ é o ângulo zenital,

ϕ é o ângulo azimutal; os subscritos i e r denotam raios incidentes e refletidos, respectivamente.

Radiância e irradiância variam em zênite e azimute; portanto, para especificar completamente o campo de reflectância para um alvo, a reflectância precisa

ser medida em todas possíveis posições fonte/sensor, resultando na função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) (Milton, 1987), Figura 2.1.

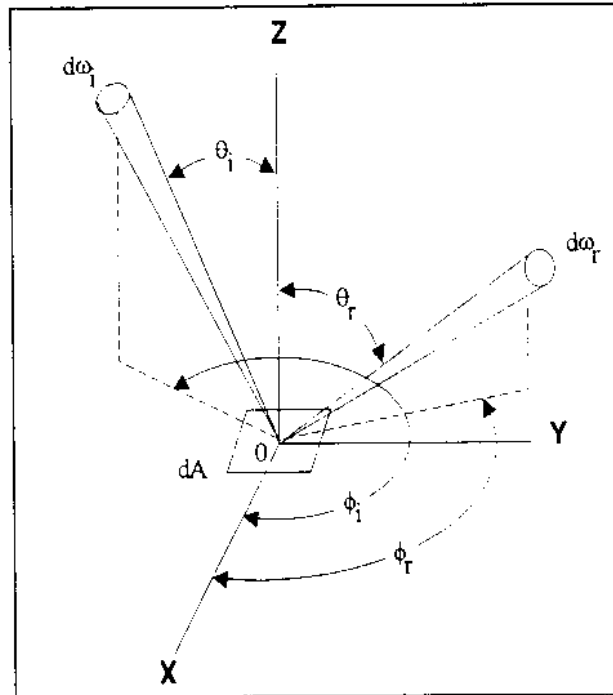


Fig.2 1 - Geometria da Radiação no Alvo

FONTE: Nicodemus et al. (1977), p. 6.

Segundo Nicodemus et al (1982), a FDRB é uma fundamental e intrínseca propriedade física que governa o comportamento da reflectância de um elemento de cena. É uma propriedade útil para alvos que têm radiação anisotrópica, a qual descreve a única propriedade de uma superfície independente da anisotropia da distribuição da radiação incidente (Kimes e Kirchner, 1982).

A FDRB é um conceito básico útil, mas nunca pode ser medido diretamente, porque a medida do dE , na superfície do alvo, em ambiente de campo não é possível, e uma solução tem que ser encontrada (Milton, 1987); assim, a FDRB é substituída pela sua aproximação mais viável possível que é o fator de reflectância bidirecional (FRB) (Kimes e Kirchner, 1982).

Considerando uma superfície perfeitamente difusora, ou seja, aquela na qual a radiação é constante qualquer que seja o ângulo de reflexão, define-se, segundo Nicodemus et al.(1977), fator de reflectância bidirecional (FRB) como sendo a

razão do fluxo radiante refletido por uma amostra e o fluxo refletido por uma superfície perfeitamente difusa (lambertiana), nas mesmas condições de iluminação e observação. Então a razão é:

$$FRB = \frac{dA \int_{\Omega_r} \int_{\Omega_i} fr(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) Li(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}{(dA / \pi) \int_{\Omega_r} \int_{\Omega_i} Li(\theta_i, \phi_i) d\Omega_i d\Omega_r}$$

Segundo Robinson e Biehl (1979), para que se use o FRB ao invés da FDRB para representar a reflectância de uma superfície de um alvo natural, várias suposições são envolvidas, dentre as quais incluem-se as seguintes: (1) o campo de visada do sensor (FOV) tem que ser menor do que 20°; (2) não deve ocorrer mudança na soma ou na distribuição da radiação entre as medidas da radiância do alvo e da placa de referência; (3) o fluxo de radiação solar direto deve dominar o campo de radiação (ignora-se a radiação difusa do céu); (4) o sensor deve responder numa forma linear com as mudanças de fluxo radiante; (5) as propriedades de reflectância do painel de referência serem conhecidas e invariantes durante o curso das medidas.

2.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS AGRÍCOLAS

Dados adquiridos por sensores orbitais e aerotransportados são, usualmente, dependentes do ângulo de visada, como resultado da combinação de efeitos atmosféricos e da não-Lambertianidade da reflectância bidirecional do alvo (Staenz et al 1981).

Dosséis agrícolas são alvos complexos para o sensoriamento remoto, embora muito importantes. Eles são importantes porque muitos benefícios surgem com a identificação de culturas, levantamento da área cultivada, avaliação imediata das condições da cultura e a possibilidade de se programar a irrigação (Jackson et al, 1979a). A complexidade é devida ao fator de reflectância bidirecional ser uma função de muitas variáveis como a orientação de fileiras, ângulo zenital e azimutal do sol, características dos solos (umidade e rugosidade), estágio de crescimento e espécie de plantas, ângulos foliares e vigor vegetativo (Kimes et al, 1984; Jackson et al 1979b; Huete, 1985).

2.1.- FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESPOSTA ESPECTRAL DE DOSSÉIS AGRÍCOLAS.

Como dito anteriormente, a reflectância de um dossel agrícola é uma função de um grande número de fatores; nos itens subseqüentes discute-se a influência de alguns dos principais fatores na resposta espectral.

2.2.1.1.- PORCENTAGEM DE COBERTURA DO SOLO, ÂNGULO DE ILUMINAÇÃO E ORIENTAÇÃO DE FILEIRAS

De uma maneira geral, ao longo do ciclo, as culturas agrícolas apresentam duas geometrias distintas: a primeira é quando a porcentagem de cobertura vegetal é inferior a 100% e a geometria de fileiras é bem nítida (dosséis incompletos); a segunda é quando a cultura atinge 100% de cobertura vegetal e apresenta uma geometria plana (dosséis completos). Desse modo o FRB apresenta um dinamismo diferente em cada fase.

Dosséis incompletos

Muitas das complexidades do sensoriamento remoto de alvos agrícolas surgem por que as culturas são plantadas em linhas, causando no campo de visada do sensor quatro componentes com diferentes propriedades de reflectância, esses componentes são: vegetação iluminada, solo iluminado, solo sombreado, e vegetação sombreada (Richardson et al., 1975; Jackson et al., 1979a; Jackson et al., 1979b; Kollenkark et al., 1982).

A proporção relativa desses quatro componentes varia com o espaçamento de fileiras (s), altura das plantas (H), largura das plantas (w), orientação de fileiras, ângulos azimutais e zenitais do sol (θ) (que variam com hora do dia e dia do ano), latitude e tamanho do elemento de resolução (Kollenkark et al., 1982), (Figura 2.2).

Segundo Jackson et al. (1979b), canteiros com alinhamento norte-sul apresentam maior variação no FR no decorrer do dia, chegando a uma variação de 230% na região do vermelho, com a cultura do trigo a 70% de porcentagem de cobertura vegetal (COV).

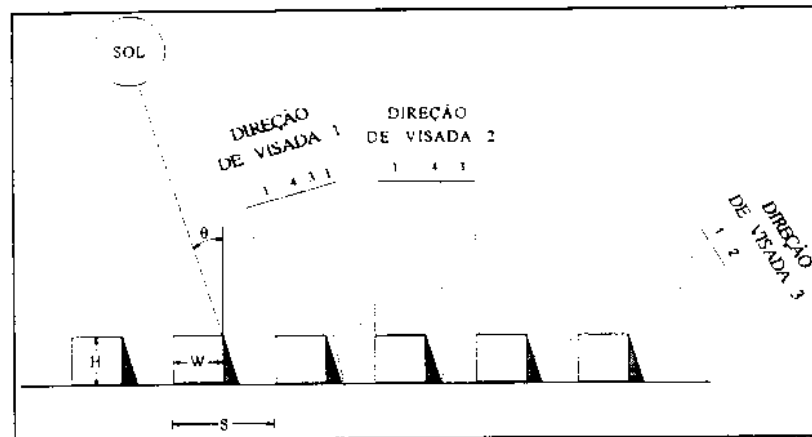


Fig. 2.2 - Representação de uma cultura em linha. As superfícies projetadas são vegetação iluminada (1), vegetação sombreada (2), solo iluminado (3) e solo sombreado(4) .

FONTE: Kimes e Kirchner (1983a), p.300

Vanderbilt et al. (1981), trabalhando com a cultura da soja montada sobre uma mesa giratória, obteve a mesma variação do fator de reflectância, com a cobertura vegetal de 60% sobre tábuas pintadas de branco (fundo espectralmente claro). Deve-se observar que, com a mesa giratória, os autores alteraram o azimute relativo sol/linhas de plantio sem alterar o ângulo zenital solar. O mesmo dossel de soja, quando sobre um plano de fundo espectralmente intermediário (solo), teve uma variação menor do FR e quando estava sobre tábuas pintadas de preto (fundo espectralmente escuro), a variação foi menor ainda.

Kollenkark et al. (1982), também trabalhando com a cultura da soja, com nove orientações de fileiras diferentes, obtiveram variação de até 140%, na região do vermelho, para os canteiros com orientação norte-sul, com 64% de cobertura do solo.

A resposta máxima no FR na região do visível, ocorre para o meio dia solar ou para azimutes relativos próximos de zero grau, quando as entrelinhas estão completamente iluminadas (Jackson et al., 1979b; Vandertilt et al., 1981; Kollenkark et al., 1982; Lord et al. 1988).

Baixos valores no fator de reflectância ocorrem para ângulos azimutais relativos de 90° e 270° e baixos ângulos de elevação solar. Nesses ângulos

ocorrem um maior sombreamento da entre linha e uma melhor interação da radiação com o dossel (Jackson et al., 1979b).

Todos os autores encontraram baixa variação no valor do fator de reflectância, em função da mudança dos ângulos solares, para a região do infravermelho próximo, uma vez que a transmitância nessa faixa é alta, ocorrendo assim um menor efeito de sombreamento. Na região do infravermelho próximo o sombreamento não é tão pronunciado como na região do visível, devido ao múltiplo espalhamento e a baixa absorção por pigmentos nesta faixa do espectro (Colwell, 1974; Daughtry et al., 1982).

Embora Vanderbilt et al. (1981) tenham observado pequeno aumento da reflectância na região do infravermelho próximo, quando o azimuth Sol/linhas de plantio era de zero graus, este aumento foi mais pronunciado sobre tábuas pintadas de branco, sobre as tábuas pintadas de preto houve uma ligeira queda no valor reflectância.

Jackson et al. (1979b) mostram que a reflectância na região do infravermelho próximo é maior para baixos ângulos de elevação solar. Segundo os autores, a baixos ângulos de elevação solar, a radiação entra no dossel num ângulo tal que numerosas folhas são iluminadas e a reflectância é alta.

Para Lord et al. (1988), a probabilidade dos raios incidentes do Sol encontrarem com um maior número de folhas aumenta com o aumento do ângulo zenital solar. Jackson et al. (1979b), utilizando trigo, Lord et al. (1988) com trigo, girassol e cevada observaram esse mesmo fenômeno. Ao contrário, Kollenkark et al. (1982) observaram ligeiro aumento do fator de reflectância no infravermelho próximo com a diminuição do ângulo zenital solar em dosséis de soja.

Todos autores observaram decréscimo na variação diurna do valor do fator de reflectância, quando os dosséis tinham porcentagem de cobertura do solo próxima de 100%.

Dosséis completos e homogêneos

Em geral, para dosséis completos e homogêneos, o fator de reflectância direcional aumenta com o incremento do ângulo zenital de visada em qualquer azimuth e para todos os ângulos solares (Kimes, 1983).

As camadas superiores do dossel causam sombreamento nas camadas inferiores. Esse sombreamento é mais intenso quando o Sol está mais próximo ao horizonte do que próximo ao zênite (Fig.2.3); assim, a reflectância aumenta com o incremento do ângulo zenital de visada, uma vez que no campo de visada do sensor (FOV), tem-se uma maior proporção de componentes superiores do dossel mais iluminados e conseqüentemente diminui a proporção dos componentes inferiores do dossel, que possuem maior grau de sombreamento. Kimes (1983) denomina esse efeito de "efeito 1".

Segundo o mesmo autor, em muitos dosséis vegetais a reflexão mínima ocorre na direção de espalhamento frontal ("forward scattering"), isto é, no plano de iluminação, mas no sentido oposto. Nesta direção o sensor "vê" mais componentes sombreados de vegetação os quais não estão expostos a radiação solar direta. Se esse fosse o único mecanismo operando, poder-se-ia esperar que a reflectância na direção de reflexão caísse continuamente com o incremento do ângulo zenital de visada, quando o sensor está no mesmo plano de iluminação. Entretanto, a reflectância mínima ocorre somente até ângulos zenitais de visada próximos de 30°, acima desse valor o efeito 1 torna-se dominante.

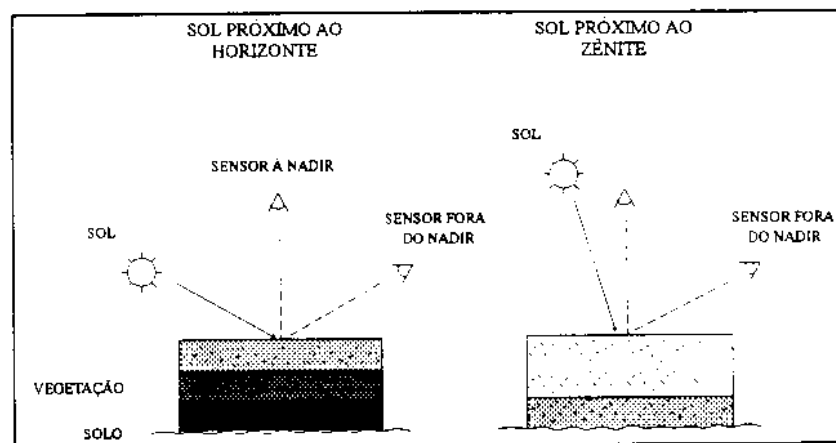


Fig. 2.3 - Efeitos dos ângulos de iluminação e visada no FRB de dosséis completos

FONTE: Kimes (1983), p. 1367.

A mudança do valor mínimo da reflectância fora do nadir, na direção de espalhamento frontal ("forward scattering") parece ocorrer a moderados ângulos solares (menores do que 55°). Isto é explicado pelo fato que, a moderados ângulos solares, a distribuição do fluxo solar interceptado como função da altura do

dossel é mais uniforme do que com ângulos solares próximos ao horizonte (Kimes, 1983; Jackson et al., 1990). Então, o "efeito 1" é grandemente diminuído dentro de um intervalo de ângulos de visada de 0 a 30°, e o segundo efeito de decréscimo da reflectância com o incremento do ângulo de visada é aparente.

A distribuição da reflectância para dosséis completos na faixa do infravermelho próximo segue tendência similar com a faixa do visível. Embora existam exceções como valores de reflectância na direção de retroespalhamento ("back scattering"), menores do que no nadir, o oposto do que seria esperado para grandes ângulos zenitais solares.

Segundo Kimes (1983), não ocorrem variações muito grandes para as reflectâncias no infravermelho próximo, para variações azimutais da fonte de iluminação, devido ao fato de que a transmitância e a reflectância da vegetação serem quais iguais nessa faixa espectral. Além disso, a reflectância da folha no infravermelho próximo é relativamente alta e então o "espalhamento múltiplo" tende a tornar mais simétrica a distribuição da reflectância, quando há variações azimutais da fonte.

Kimes et al. (1984a) lembram que esses mesmos mecanismos estão em operação nos dosséis incompletos em adição com os efeitos da estrutura em linha.

2.2.1.2 - ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E FITOMASSA

Considera-se dossel vegetal, o conjunto de todos os componentes vegetais acima do solo. Segundo Kimes e Kirchner (1983b), as folhas são as unidades primárias de um dossel e qualquer grandeza que relacione propriedades das folhas terá grande correlação com a resposta espectral.

Tucker (1979) estudou a correlação da biomassa total úmida e seca, conteúdo de água, concentração de clorofila em gramíneas, com a radiância na banda do vermelho (630 a 690 nm) e infravermelho próximo (750 a 800 nm) e obteve altos valores do coeficiente de determinação entre esses parâmetros. As relações entre a radiância no vermelho e infravermelho próximo com a biomassa verde não são lineares, embora a do vermelho seja inversa e a do infravermelho próximo direta.

Holben et al (1980), trabalhando com dosséis de soja encontraram boas correlações das bandas do vermelho e infravermelho próximo com os parâmetros

agronômicos, tais como: IAF, biomassa total e biomassa de folhas entre outros. Entretanto, as mais significantes correlações se deram com o IAFverde e biomassa de folhas.

Kimes et al (1981) realizaram medidas da radiância com radiômetros de bandas similares ao TM/Landsat em dosséis de milho, e chegaram à conclusão de que o índice de área foliar e a biomassa de folhas verdes foram as variáveis agronômicas que melhor relacionam com as bandas do vermelho e infravermelho próximo e com o índice NDVI gerado a partir delas.

Gausman et al (1976) mediram em laboratório a reflectância de folhas de milho sobrepostas, e observaram que o aumento gradual do IAF causa resposta na faixa do vermelho (absorção) até dois, enquanto que para a faixa do infravermelho próximo, a resposta no valor do FR (aumenta) para IAF próximo de oito; essa reflectância, à qual o acréscimo de IAF não provoca mais resposta, é denominada "reflectância infinita" (R_{∞}) (Figura 2.4).

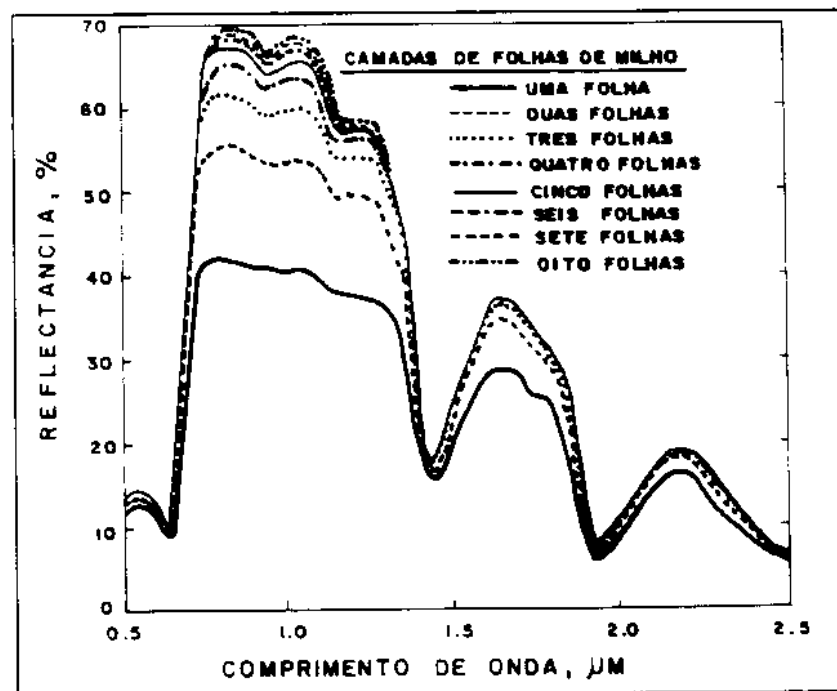


Fig.2.4 - Fator de Reflectância de folhas de milho sobrepostas
FONTE: Gausman et al (1976), p.296.

Almeida Jr. (1993), trabalhando com dosséis de trigo concluiu que a banda TM4 foi a banda que obteve melhor correlação com os parâmetros biofísicos, peso de folhas, fitomassa total e IAF. Provavelmente por ser a banda que melhor responde às variações de IAF, não tendo uma saturação precoce. Tucker (1979) observou que nas relações gráficas entre biomassa verde total e a radiância na faixa do vermelho e infravermelho próximo, a curva na região do vermelho torna-se assintótica mais rapidamente, em comparação a faixa do infravermelho próximo.

Pinter Jr. et al. (1983) conduziram um experimento com trigo em 12 parcelas (3 tratamentos e 4 repetições); os tratamentos foram plantados em intervalos de um mês (entre o primeiro e segundo) e dois meses entre o segundo e terceiro. Desse modo, os autores puderam medir o FRB da cultura em diferentes fases do ciclo no mesmo ângulo de iluminação.

As variações diurnas do coeficiente de determinação (R^2) entre o índice PVI e o IAF mudou de aproximadamente 0,18 as 8 horas para 0,80 as 10 horas. O R^2 obtido entre o NDVI e o IAF teve baixa alteração diurna em comparação com o índice ortogonal PVI.

Os autores ressaltam que deve ser observado o cuidado quanto à extrapolação de relações empíricas obtidas sob específicos ângulos solares e orientação de fileiras, para outras latitudes, estações do ano e hora do dia. Correlações pobres entre dados adquiridos por satélites e a "verdade terrestre" adquiridos num espaço de várias horas, pode ser o resultado de mudanças na resposta espectral em função do ângulo de elevação solar (Pinter Jr. et al., 1983)

2.2.1.3 - INFLUÊNCIA DO SUBSTRATO

O solo atua na resposta espectral de dosséis agrícolas como um plano de fundo; assim a reflectância de uma cultura agrícola é uma combinação das respostas das plantas e do solo subjacente a elas.

Para Jackson et al. (1990), propriedades não-Lambertianas dos solos são uma função de sua rugosidade. Essa rugosidade provoca um forte sombreamento da cena. Então a reflectância é máxima na direção de retroespalhamento ("backscattering"), pois nesta direção o sensor "vê" as superfícies as quais estão diretamente iluminadas (Kimes, 1983) (Fig.2.5).

Quando o sensor move-se para a direção de espalhamento frontal ("forward scattering"), dois mecanismos causam o decréscimo na reflectância: o sensor "vê" uma maior quantidade de superfícies sombreadas, e no FOV do sensor aumenta a proporção de facetas de partículas que desviam-se da normal à direção solar, causando decréscimo da irradiância solar nestas facetas (função cosseno) (Kimes, 1983).

Em dosséis completos, variação azimutal extrema não ocorre, porque a transmitância e reflectância das folhas são aproximadamente iguais (Kimes, 1983); assim, a não-Lambertianidade do solo não é importante para dosséis completos uma vez que o fluxo que chega ao solo é bastante próximo do isotrópico (Antunes, 1992).

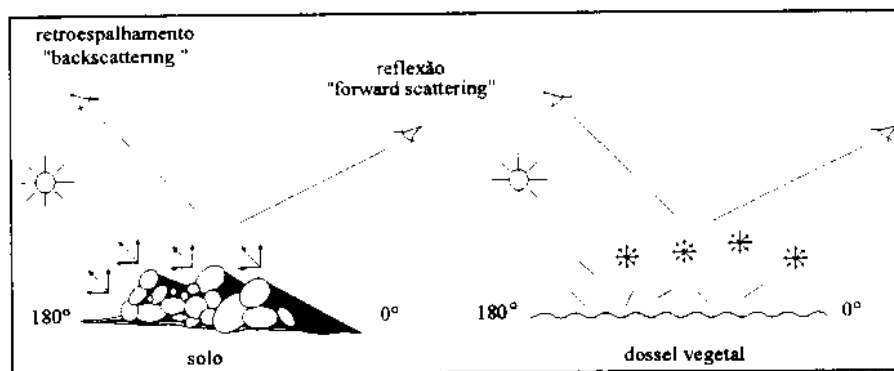


Fig. 2 5. - Efeito de sombreamento em solo nu. Em dosséis completos esta diferença não é tão pronunciada.

FONTE: Kimes (1983), p. 1368.

Huete et al (1985) verificaram a influência de quatro tipos de solos em dosséis de algodão. Para a banda do vermelho, o sinal composto por vegetação mais solo é idêntico para os quatro tipos de solos, para uma porcentagem de cobertura vegetal maior ou igual a 90%.

Para a banda do infravermelho próximo, com o desenvolvimento do dossel, houve um linear incremento na reflectância; acima de 90% de cobertura vegetal houve um aumento abrupto o qual foi atribuído a um rápido acúmulo de biomassa verde com um único aumento gradual da COV. Ao contrário da banda do vermelho, na banda do infravermelho o autor observou influência do solo "Superstition sand" (solo mais refletivo), para dosséis com 100% de cobertura vegetal. Isto é explicado devido à alta penetração do infravermelho próximo em dosséis vegetais.(Fig 2.6).

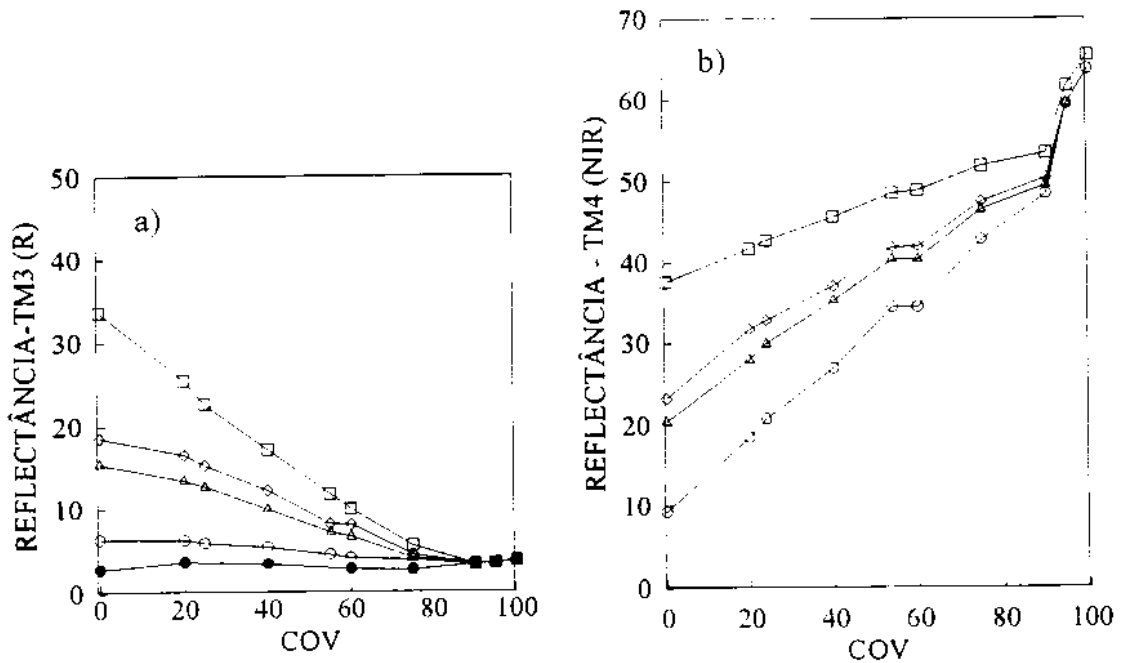


Fig. 2.6 - Relações entre porcentagem de cobertura e a reflectância no vermelho(a) e infravermelho próximo(b), para 5 tipos de solos: ($\square$) "Superstition sand" (seco); ($\diamond$) "Avondale loam" (seco); ($\triangle$) "Whitehouse-B SCL" (seco); ($\circ$) "Cloverspring loam" (seco); ($\bullet$) "Cloverspring-loam" (úmido)
 FONTE: Huete et al (1985), p. 41.

Como podemos observar, o solo "Superstition sand" possui uma reflectância no infravermelho próximo em torno de 38%, mas contribui para aumentar a reflectância do dossel para um valor próximo de 65%. Huete (1987) modelou a interação solo-dossel em componentes independentes que chegariam ao sensor (Figura 2.7), através da seguinte equação:

$$D_M(\lambda) = E_o(\lambda)R_s(\lambda)T_c^2(\lambda) + E_o(\lambda)R_c(\lambda),$$

onde: E_o é a irradiância global,

R_s é a reflectância do solo,

R_c é a reflectância do dossel e

T_c é a transmitância do dossel.

Assim, a radiação que chega ao sensor (D_M) é a soma da componente refletida pelo dossel mais a radiação transmitida pelo dossel refletida pelo solo transmitida através no dossel pela segunda vez. O autor considerou as interações subsequentes solo/dossel desprezíveis.

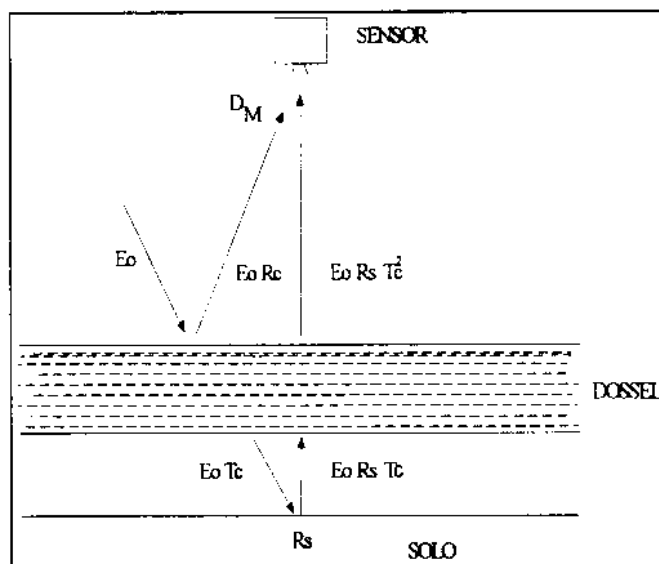


Fig. 2.7- Modelo de transferência radiativa entre dossel vegetal e solo.

FONTE: Huete (1987), p.62

Huete et al. (1985) lembram que a maior parte das informações dos vários índices de vegetação tem sido coletados com radiômetros de campo sobre solos uniformes, mas dados multiespectrais, coletados por sensores orbitais e aerotransportados, incluirão, frequentemente, diferentes tipos de solos com diversas condições de umidade.

2.2.1.4 - ARQUITETURA DE DOSSEL

Em sensoriamento remoto de alvos agrícolas, o estudo da estrutura de um dossel é importante porque descreve como as folhas, que são as unidades de espalhamento e/ou emissão estão posicionadas, sendo então um dos maiores determinantes da transferência radiante dentro e sobre o dossel (Kimes e Kirchner, 1983b).

Jackson e Pinter Jr. (1986), trabalhando com dosséis de trigo com mesma fitomassa seca e mesmo índice de área foliar, observaram durante o pico do IAF, que o índice razão simples (NIR/R), para o dossel erectófilo foi aproximadamente 30%

maior do que para o planófilo; entretanto, o índice perpendicular de vegetação (PVI), foi 30% maior para o dossel planófilo do que o erectófilo. Para os mesmos autores, os elementos verticais de um dossel erectófilo funcionam como uma armadilha, refletindo a radiação para dentro do dossel, com correspondente redução da quantidade de energia refletida verticalmente, o inverso ocorre para um dossel planófilo. Entretanto a variação do aumento dos índices RS e PVI nos dosséis (planófilo e erectófilo) é explicada pela variação da reflectância no vermelho.

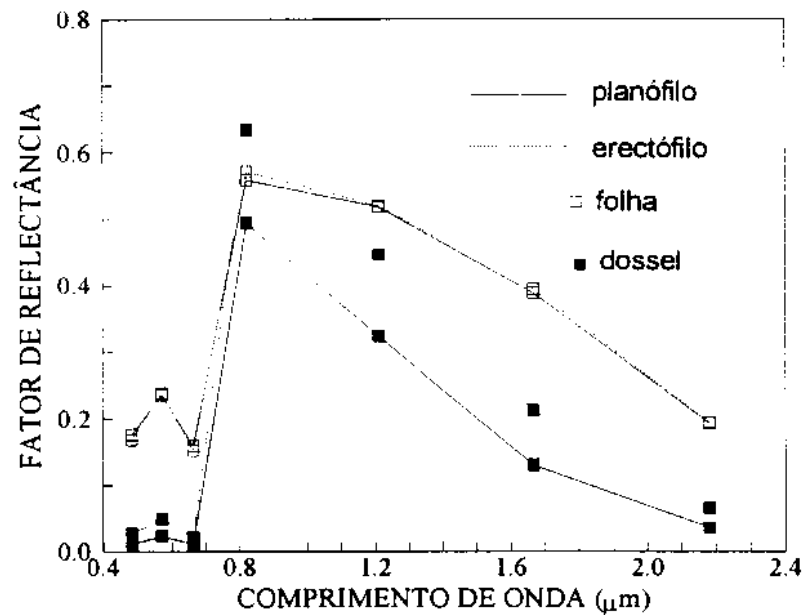


Fig.2.8 - Comparação entre o fator de reflectância de dosséis planófilo e erectófilo e folhas individuais.

FONTE: Jackson e Pinter Jr (1986), p.49.

Os FR para as folhas individuais foram essencialmente os mesmos para ambos os cultivares (Figura 2.8); entretanto para os dosséis essa diferença é bem significativa. Uma análise de variância mostrou uma diferença significativa entre os cultivares a nível de 5%. Esses resultados suportam a conclusão que a arquitetura do dossel, ao invés das características de reflectância da folha, representam o maior papel na determinação na resposta espectral de dosséis vegetais (Jackson e Pinter Jr, 1986).

Bunnik (1978) representa um conjunto de funções empíricas (ajuste visual), que são aplicadas às coberturas vegetais para descrever a sua distribuição de ângulos foliares. Supondo os azimutes aleatoriamente distribuídos, essas funções representam esta distribuição da seguinte forma:

- a) Planófilas- arquitetura de dossel em que as folhas orientadas na horizontal são mais freqüentes:

$$f'(\theta_L) = (2/\pi) (1 + \cos (2\theta_L))$$

- b) Erectófilas - folhas verticalmente orientadas são mais freqüentes:

$$f'(\theta_L) = (2/\pi) (1 - \cos (2\theta_L))$$

- c) Plagiófilas - folhas com ângulos oblíquos são mais freqüentes:

$$f'(\theta_L) = (2/\pi) (1 - \cos (4\theta_L))$$

- d) Extremófilas - folhas com ângulos oblíquos são menos freqüentes:

$$f'(\theta_L) = (2/\pi) (1 + \cos (4\theta_L))$$

- e) Esféricas - folhas distribuídas como se estivessem numa superfície de uma esfera:

$$f'(\theta_L) = \sin \theta_L$$

- f) Uniformes - folhas com ângulos igualmente freqüentes:

$f'(\theta_L) = 2/\pi$, sendo θ_L o ângulo entre a linha paralela à nervura central da folha e a horizontal.

A Figura 2.9 ilustra as curvas características de cada distribuição em função do ângulo horizontal.

Segundo Kimes e Kirchner (1983b), a estrutura de um dossel pode sofrer significativas variações diurnas devido ao tipo de vegetação, movimentos heliotrópicos da folha e condições ambientais (vento) e seca (estresse hídrico).

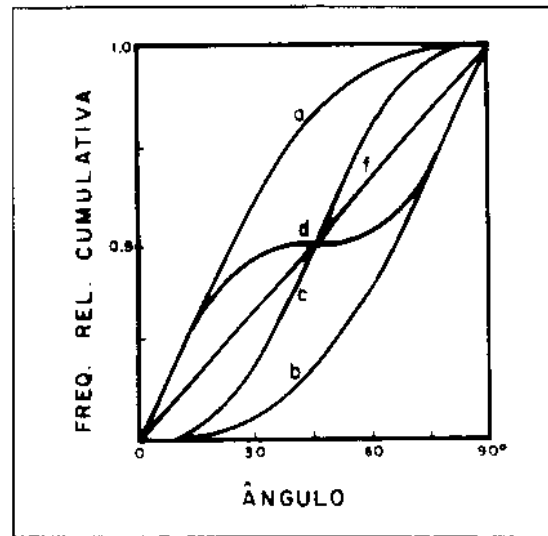


Fig. 2.9 - Frequência de distribuição cumulativa de seis arquiteturas de dosséis.

FONTE: Bunnik 1978, p.36

De acordo com Ehleringer e Forseth (1980), existem dois tipos de heliotropismo: diaheliotropismo e paraheliotropismo. No diaheliotropismo, o movimento das folhas é tal que o limbo, permanece perpendicular aos raios do Sol durante o dia. No movimento paraheliotrópico as folhas permanecem paralelas aos raios do Sol durante o dia.

Schutt et al (1985) determinaram o heliotropismo em folhas de algodão em função dos ângulos zenitais (ϕ), azimutais (ψ), e o ângulo de rolagem (giro do pecíolo) (θ), (Fig. 2.10). Uma análise de sensibilidade estabeleceu que o ângulo entre a normal à folha (n) e o Sol foi mais afetado pela mudanças no ângulo zenital (ϕ) e o ângulo de rolagem (θ).

Shell et al (1974) estudaram o heliotropismo em dosséis de feijão, e observaram que a tendência de mudança de posição das folhas, diminui com o aumento da idade da planta.

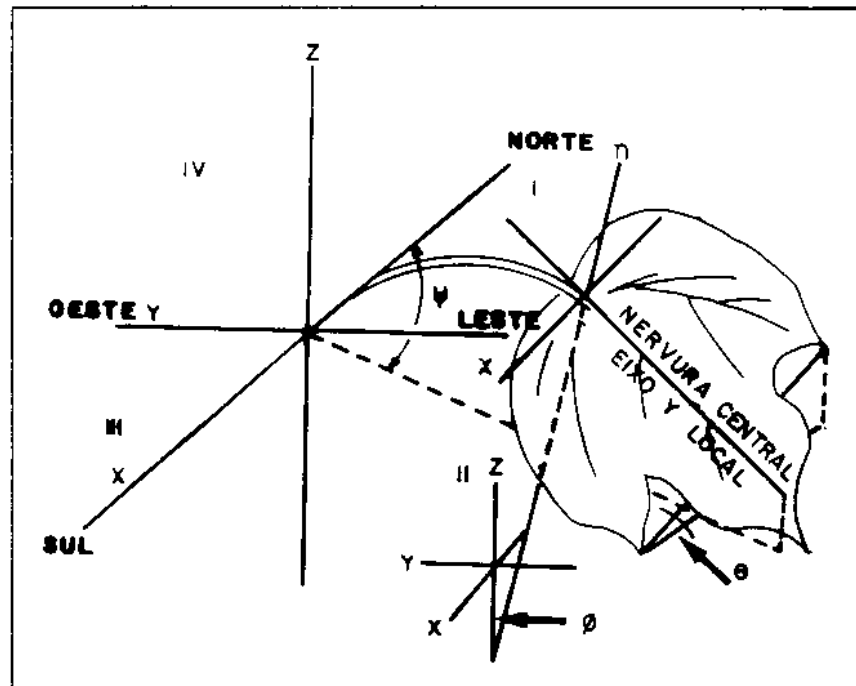


Fig. 2.10 - Diagrama de quadrante e esquematização de geometria de folha.

FONTE: Adaptada de Schutt et al. (1985), p. 15.

2.3 - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Grande número de índices de vegetação têm sido propostos para caracterizar dosséis vegetais (Huete, 1987). Os índices são tipicamente, a soma, diferença, razão ou outra combinação linear de radiância ou fator de reflectância de dois ou mais intervalos de comprimento de onda (Wiegand et al., 1991).

Segundo Chen et al (1986), as duas maiores vantagens de se trabalhar com índices de vegetação são: (a) redução do número de canais para um simples índice numérico (Wiegand et al, 1991), (b) ter um índice com significado físico, isto é, um número altamente correlacionado com os parâmetros agrônômicos.

Tucker (1979) trabalhou com dois grupos de nove índices de vegetação. Um grupo foi gerado com bandas do verde e vermelho e o segundo grupo com bandas do vermelho e infravermelho próximo. O segundo grupo foi o que

apresentou melhores correlações com os parâmetros biofísicos, biomassa seca, biomassa úmida, clorofila total, entre outros.

Formaggio (1989) utilizou as bandas TM1 a TM5 e TM7 para estudo de culturas agrícolas no Norte paulista, e concluiu que as bandas que contêm o maior quantidade de informações são as bandas TM3 e TM4; dessa forma, essas duas bandas seriam suficientes para monitorar as culturas.

De acordo com Baret et al (1989), as bandas do vermelho e do infravermelho próximo são as mais usadas por que estão presentes em quase todos os satélites meteorológicos e de recursos terrestres e contêm mais de 90% da informação espectral da vegetação. Para Wiegand et al. (1991), a alta absorção da radiação solar na faixa do vermelho (600-700nm) e a forte reflectância no infravermelho próximo (750-1350nm) pelo tecido fotossinteticamente ativo das plantas, é a marcante diferença entre a vegetação e as outras duas paisagens predominantes - solo e água.

Person e Miller (1972) propuseram o índice de vegetação "razão simples" (RS), o qual é definido pela seguinte fórmula:

$$RS = \frac{NIR}{R}$$

Rouse et al.(1974) desenvolveram o índice de vegetação "diferença normalizada" (NDVI), que é uma alteração do índice razão simples:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} = \frac{RS - 1}{RS + 1}$$

Pinter Jr. et al (1983) e Jackson et al (1990) mostraram que o índice razão simples nem sempre minimiza, mas pode exagerar os efeitos dos ângulos zenitais do sol e de visada. Embora o NDVI também altere se com os ângulos de visada e zênite solar, ele não altera tão drasticamente com o índice razão simples

Para amenizar o efeito do solo, Richardson e Wiegand (1977) introduziram o "Índice Perpendicular de Vegetação" (PVI), o qual é a distância ortogonal do ponto correspondente à reflectância do dossel à "linha do solo".

$$PVI = [(R_{solo} - R_{veg})^2 - (NIR_{solo} - NIR_{veg})^2]^{1/2}$$

"Linha do solo" é a relação linear entre a reflectância do solo no infravermelho próximo e vermelho. A dispersão dos valores de reflectância ao longo da reta é obtida pela medição da reflectância em várias condições de umidade; uma outra suposição, segundo Jackson et al.(1980) é que a linha do solo é linear e que todos os solos produziram dados que enquadrariam a esta reta, ocasionando a dispersão dos pontos, além da umidade. Os próprios autores observaram uma considerável variação dos valores de reflectância quando se utilizavam diferentes materiais (de cinzas a areia), e que a "linha dos solos" provavelmente não seria linear.

Baret et al.(1993) mostram, utilizando vários solos, que os valores de inclinação a e intercepto b desses solos são inversamente proporcionais, e a grande variação desses valores não dá suporte ao conceito de uma única "linha global dos solos". Entretanto, os mesmos autores observaram que com exceção a certos tipos de solos muito peculiares, a grande maioria tem uma variação limitada dos valores de intercepto e inclinação, e o conceito de uma única "linha global dos solos" poderia ser útil particularmente em dados de satélite de baixa resolução espacial.

Além da fórmula original proposta por Richardson e Wiegand (1977), há também a fórmula proposta por Jackson et al. (1980), a qual é a distância do ponto correspondente à reflectância do dossel até a linha do solo, cuja fórmula é a seguinte:

$$PVI_{R,NIR} = \frac{|NIR - R \cdot a - b|}{\sqrt{a^2 + 1}}, \text{ utilizando-se os valores vermelho (R) na abscissa e}$$

infravermelho próximo (NIR) na ordenada.

Jackson e Pinter Jr. (1986) observaram que, em dosséis de trigo de arquitetura erectófila, que o índice RS é maior que o PVI; entretanto, para o dossel planófilo, o índice PVI é maior. Uma mudança no infravermelho próximo causa mudanças similares no PVI e no RS, entretanto, as mudanças na faixa do vermelho causa mais alterações no índice RS do que no índice PVI. Mostrando matematicamente:

Com o índice RS; fazendo $RS = Y$, temos:

$$Y = \frac{NIR}{R} = \frac{B4}{B3},$$

e fazendo a derivada parcial em relação a $B4$ ($B3$ constante).

$$\frac{\partial Y}{\partial B4} = \frac{1}{B3}, \text{ (uma constante)}$$

Com o índice PVI: $PVI = a B4 - b B3 - c$, cuja derivada parcial em relação a B4 é:

$$\frac{\partial PVI}{\partial B4} = a, \text{ uma constante. Entretanto, derivando em relação a B3:}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial B3} = \frac{-B4}{(B3)^2} \quad \text{e} \quad \frac{\partial PVI}{\partial B3} = -b \text{ (uma constante)}$$

O que mostra que uma variação na razão devido a uma alteração no valor da reflectância no vermelho, altera o índice o inverso do quadrado de B3, enquanto que no PVI é uma constante. Segundo Jackson e Pinter Jr (1986) em estudos de vegetação, onde a reflectância no vermelho é geralmente baixa, erros na medição ou devido a ação da atmosfera podem causar grandes erros nos índices em forma de razão, mas erros menores no PVI.

Segundo Huete (1988), os índices na forma de razão e os ortogonais são mutuamente contraditórios em descrever o comportamento espectral solo/vegetação. Como exemplo, um particular dossel sobre um solo claro é mostrado na Figura 2.11; se o solo de fundo viesse a ficar úmido uma isolinha demarcada pelas condições seca e úmida poderia ser formada. Para efetivamente normalizar tais mudanças no solo de fundo, os índices RS ou NDVI deveriam ter uma mudança diretamente para a origem (B), também o PVI deveria seguir uma isolinha de valores constantes, paralela a linha do solo (C), ou seja o mesmo valor independente da claridade do substrato.

Na Figura 2.12 observam-se isolinhas de vegetação para dois tipos de dosséis com arquiteturas diferentes: algodão (planófilo) e grama (erectófilo), no espaço NIRxR. Estas isolinhas foram obtidas inserindo-se bandejas com quatro tipos de solos, nas condições seca e úmida, sob esses dosséis. Para os valores maiores de IAF, segundo Huete et al. (1985), observa-se o seguinte comportamento das isolinhas: (a) mudança ascendente na direção do infravermelho próximo positivo e um vermelho negativo; (b) decréscimo do comprimento do "vetor"; (c) incremento da inclinação.

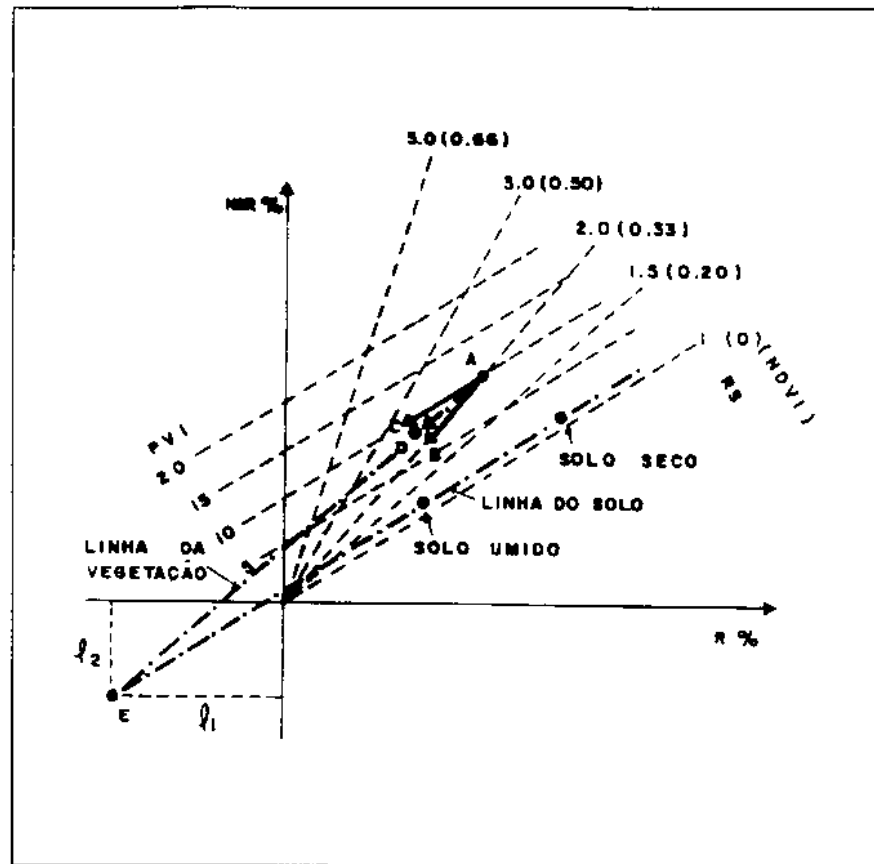


Fig. 2.11 - Isolinhas de PVI e NDVI (ou RS), e o ponto hipotético de encontro (E) entre a linha do solo e da linha vegetação.

FONTE: Huete (1988), p. 297.

Para Huete (1988), a inclinação das isolinhas está entre o que é descrito pelo índice ortogonal PVI, e na forma de razão NDVI ou RS (Fig 2.11); ou seja, com o umedecimento do solo, o valor dos índices não converge para a origem ($\overline{AB}$), e não se mantém paralela à linha do solo ($\overline{AC}$), e sim migrariam em direção ao ponto D.

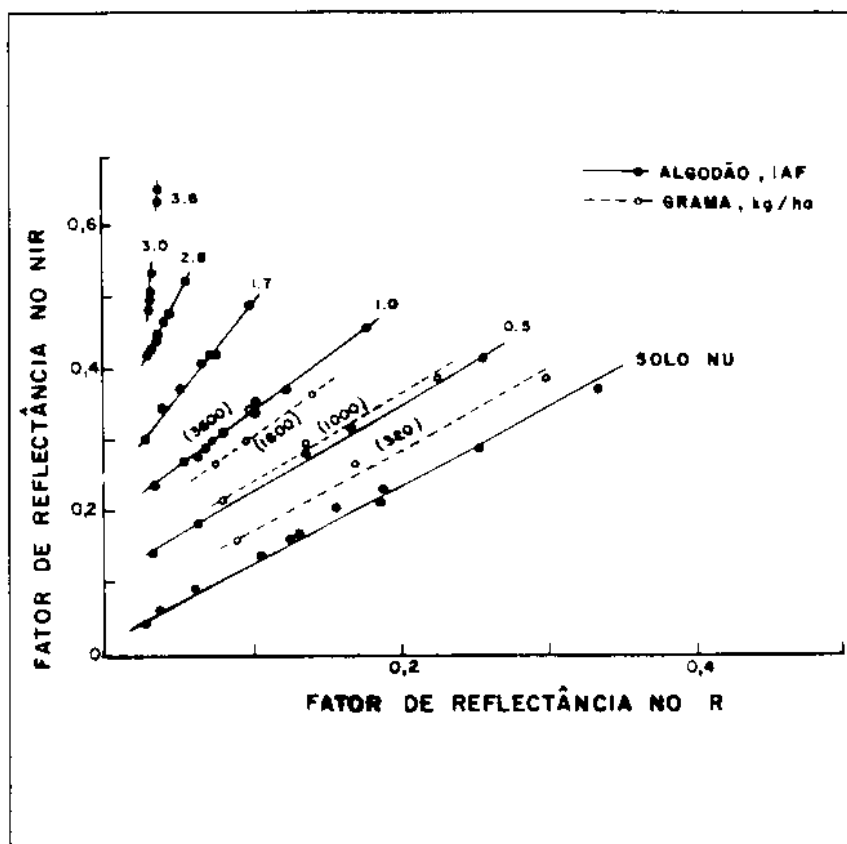


Fig 2.12 Isolinhas de vegetação observadas para dosséis de algodão e de grama, com diferentes solos de fundo.

FONTE: Huete (1988), p. 298.

Para Huete (1988), o comportamento da isolinha de vegetação pode ser graficamente modelado para o ponto de encontro da linha do solo e da vegetação, com o deslocamento do par ordenado NIRxR com a adição de uma constante. Assim:

$$l_1 + l_2 = 2l = L$$

$$\frac{[(NIR+l_2)-(R+l_1)]}{[(NIR+l_2)+(R+l_1)]}$$

$$SAVI = \left[\frac{(NIR - R)}{(NIR + R) + L} \right] \cdot (1+L)$$

Conforme o mesmo autor mostra, o valor da constante - L igual a 0,5 é bastante satisfatório e o índice apresenta baixa amplitude de valores tanto para dosséis em solos claros como para dosséis em solos escuros. A multiplicação pelo fator (1+L) é para que o índice tenha a mesma variação do NDVI (-1 a +1).

Wardley (1984) estudou a variabilidade de 5 índices de vegetação em condições de laboratório, medindo o FRB de gramíneas em cinco ângulos de elevação da fonte (10, 20, 30, 40 e 50°), quatro ângulos zenitais de visada (0, 10, 20, 30°) e três ângulos de azimute relativo (fonte/sensor), 0, 90, 180°. O referido autor utilizou, entre outros índices, o PVI e propôs o uso do PVI(A) (angular), onde a diferença desse índice com o PVI, seria o uso da reflectância do solo composta somente de reflectâncias obtidas fora do nadir.

O autor concluiu que ambos PVIs (ortogonal e angular) foram altamente sensíveis à geometria de visada, e esta sensibilidade é mais pronunciada na direção de espalhamento frontal ("forward scattering") a baixos ângulos de iluminação.

Os índices em forma de razão usados (RS e NDVI) foram menos sensíveis às variações da geometria de visada, e o autor alerta sobre o potencial problema na extrapolação espacial de dados de reflectância do solo adquiridos sob um regime angular, e aplicado na aquisição de dados de reflectância da vegetação sob outro, uma vez que os índices que tiveram o maior coeficiente de variação foram o PVI e PVI(A).

2.4. - VISADAS DIRECIONAIS

Em sensoriamento remoto agrícola, alta resolução temporal é desejável tanto para obtenção de uma maior taxa de dados, por se tratar de um alvo muito dinâmico, como para fugir da cobertura de nuvens que obviamente são simultâneas à época de maior atividade de plantio.

Para aumento da resolução temporal, o uso de várias plataformas orbitais operando com diferença de datas de passagem seria uma solução, além da vantagem da geometria Sol-alvo-sensor sofrer pouca alteração; porém o alto custo torna esta opção inviável e a melhor solução seria utilizar sensores com amplo ângulo de varredura (Schnetzler, 1981).

Holben (1986) enfatiza que, para os casos de sensores que apresentam alta frequência de dados (alta resolução temporal), há maior possibilidade de compor uma cena completa sem apresentar o efeito indesejável de nuvens e diminuir os efeitos atmosféricos, utilizando a técnica de mosaicagem.

Kimes et al., (1984b) realizaram medidas do FR à nadir e fora do nadir com incremento de 15° no ângulo zenital e 45° no ângulo azimutal de visada, resultando em 41 pontos de amostragem (Fig. 2.13). As medições foram feitas em três diferentes alvos: solo nu, e duas espécies de gramíneas, sempre com o azimute solar (relativo ao sensor) de 180° .

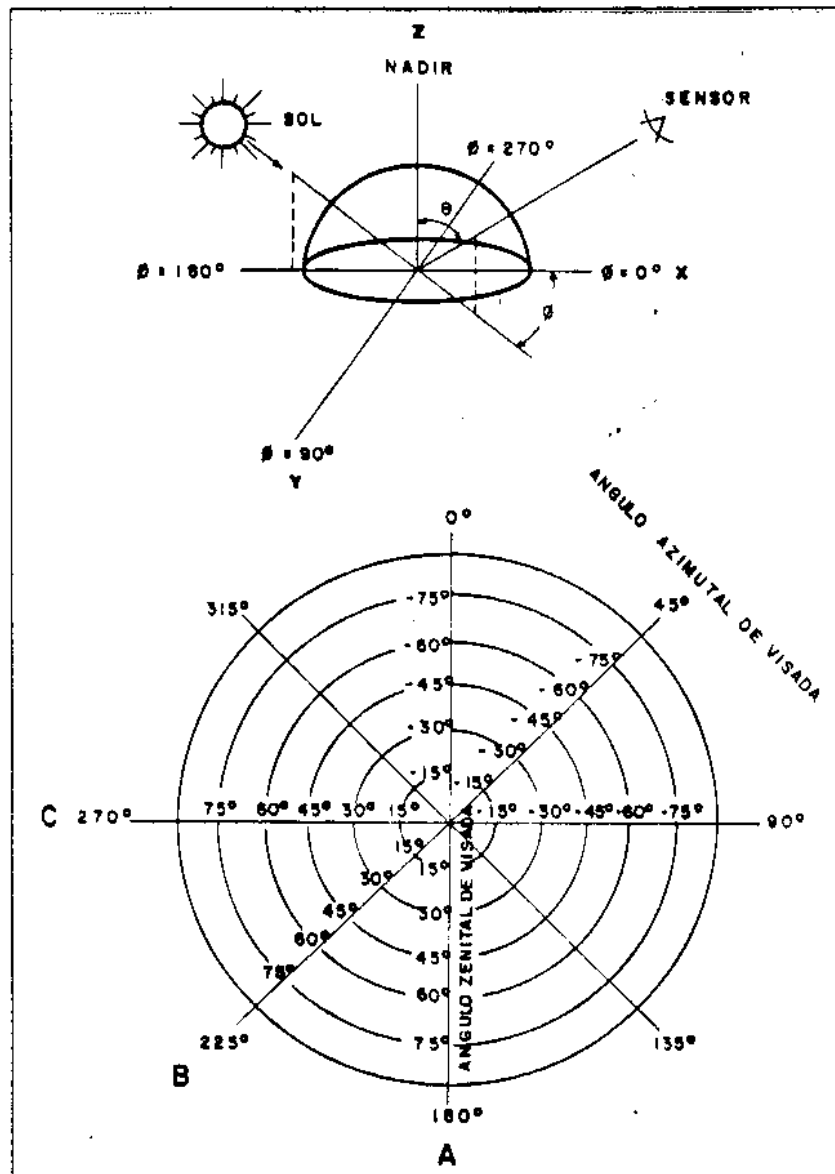


Fig. 2.13 - Sistema de coordenadas definindo ângulos solar e do sensor, e esquema polar ilustrando os pontos do fator de reflectância direcional.

FONTE: Kimes et al., (1984b) p. 890.

Segundo os autores, visadas direcionais proporcionam outro benefício além do aumento da resolução temporal, que é o de fornecer adicional e/ou superior informação para inferir características do alvo, como geometria do dossel.

Para o primeiro benefício (onde a situação ideal é ter um sinal constante do alvo em função de vários ângulos de visada) os resultados indicaram que os ângulos ótimos de visada são os perpendiculares à direção de azimuth em relação ao plano principal do Sol (C). As diferenças de reflectância entre nadir e fora-do-nadir nesse plano de azimuth, decresce significativamente com o decréscimo do ângulo zenital solar. Os resultados para o segundo benefício (a nível terrestre) indicam que os ângulos de visada ótimos estão no plano de azimuth principal do Sol (A).

Os autores geraram o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI) e chegaram à conclusão de que o uso do índice, para o primeiro objetivo, é ideal para ângulos zenitais de visada menores do que 45° .

Como foi dito anteriormente, muitos sensores do programa "Earth Observation System" (EOS) terão visadas direcionais; entre eles o "Moderate Resolution Imaging Spectrometer (Tilt)" (MODIS-T), com visadas $\pm 45^\circ$ transversais à órbita e $\pm 50^\circ$ ao longo da órbita (Salomonson et al., 1989); "High Resolution Imaging Spectrometer" (HIRIS), com visadas $+60/-30^\circ$ ao longo da trajetória e $\pm 24^\circ$ perpendicular à trajetória (Goetz e Herrin, 1989); "Multiangle Imaging SpectroRadiometer" (MISR), utilizando oito câmeras separas ($25,8^\circ$, $45,6^\circ$, 60° , $72,5^\circ$), em relação aos dois lados do nadir (Diner et al. 1989).

Ranson et al (1981) lembram que visadas direcionais são necessárias para o entendimento dos dados de sensores aerotransportados e orbitais com essas características. Além disso, os autores citam o objetivo de adquirir dados de reflectância com visadas direcionais, para providenciar dados apropriados para testar a precisão de modelos matemáticos, os quais tem sido propostos para descrever a radiância de um dossel vegetal para específicas condições de iluminação e observação.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - ÁREA DE ESTUDO, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATOS CULTURAIS.

Para atingir os objetivos propostos, foi instalado um experimento na estação experimental do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), no município de Pindamonhangaba (SP). A estação localiza-se na altitude de 560m nas coordenadas 22° 55' S e 45° 27' W, possui uma temperatura média anual de 22,1°C e a pluviosidade de 1259 mm anuais.

A área caracteriza-se por apresentar um Latossolo série Pinda (Verdade et al., 1961), sendo toda plana, usada para o cultivo de arroz por inundação em anos anteriores.

O experimento constituiu-se de delineamento inteiramente casualizado (DIC) com nove parcelas, sendo três tratamentos de solos e três repetições, mais três canteiros com solo nu. As dimensões das parcelas para os tratamentos e para os canteiros de solo nu foram 3m x 12m e 2m x 2m, respectivamente. (Fig. 3.1)

A cultura implantada foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), preto variedade IAC-Maravilha, num espaçamento de 0,5m. As linhas tiveram a orientação norte-sul verdadeiro (19°(+)) em relação ao Norte Magnético para o ano de 1993). O plantio foi realizado no dia 02/07/93 e recebeu 25g/m de adubação da fórmula 4-14-8 (N-P₂O₅-K₂O). Após a germinação a cultura apresentou uma densidade linear média de onze plantas.

O IAC-Maravilha é uma variedade adaptada à colheita mecânica; possui plantas erectas de crescimento indeterminado, sendo, por isso, classificado no grupo II, segundo Fageria (1989). É uma variedade indicada para o plantio nas três épocas de cultivo (águas, seca e inverno) no estado de S. Paulo, mas possui a maior produtividade na época de inverno. O ciclo médio das plantas, do plantio à colheita, está em torno de 98, 95 e 105 dias para as lavouras das águas, da seca e do inverno, respectivamente.

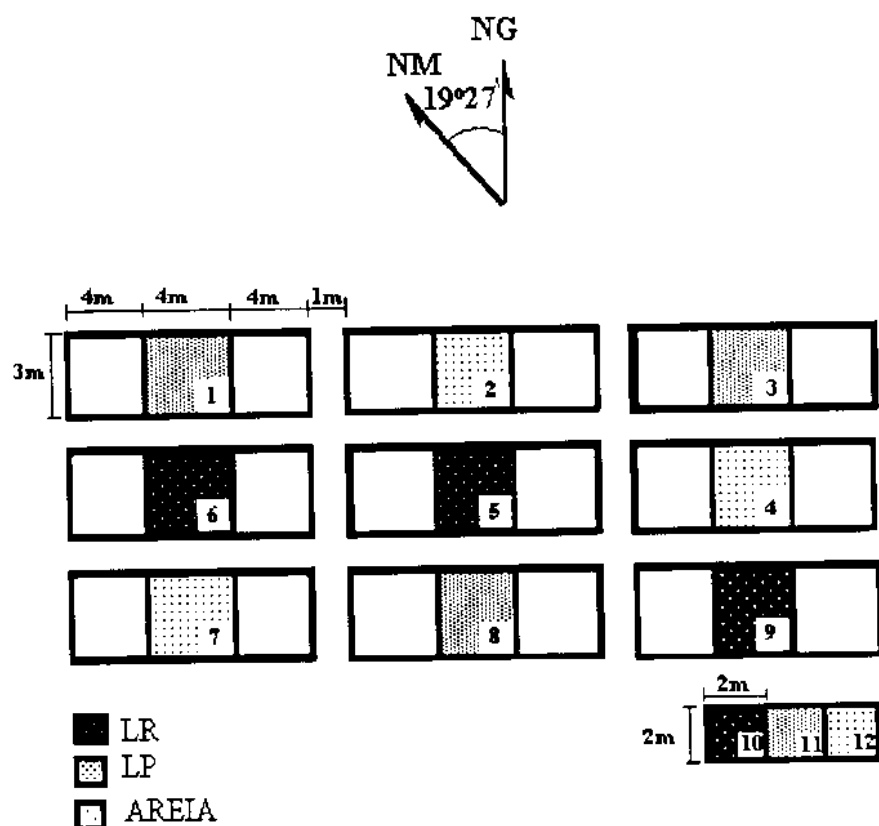


Fig. 3.1 - Disposição geral do experimento no campo

Com o objetivo de caracterizar os estádios de desenvolvimento do feijoeiro, em cada campanha de medições, faz-se na Figura 3.2, a descrição desses estádios segundo Fageria (1989).

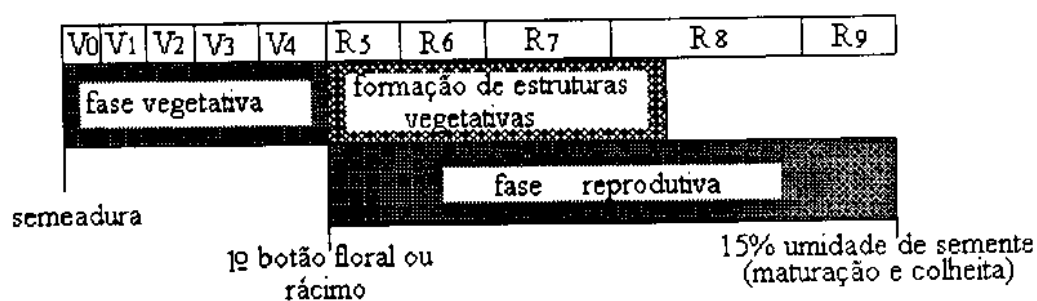


Fig. 3.2 - Diferentes fases do desenvolvimento do feijão.

FONTE: Fageria (1989), p.308

- Germinação (Vo) - 4 ou 5 dias para que os cotilédones saiam da terra.
- Emergência (V1) - cotilédones ao nível do solo em 50% das plantas.

- Folhas primárias (V2) - 50% das plantas com folhas primárias desenvolvidas.
- Primeira folha trifoliolada (V3) - 50% das plantas apresenta a primeira folha trifoliolada completamente aberta.
- Terceira folha trifoliolada (V4) - 50% das terceiras folhas trifolioladas apresentam-se abertas.
- Pré-floração (R5) - 50% das plantas apresenta o primeiro botão floral ou primeiro rácimo.
- Floração (R6) - 50% das plantas possuem a primeira flor.
- Formação de vagens (R7) - 50% das plantas apresenta a primeira vagem, com a corola de flor flácida ou desprendida.
- Enchimento de vagens (R8) - 50% das plantas começam a ter crescimento ativo das sementes.
- Maturação - (R9) - descoloramento e secagem de 50% das vagens.

Todas as sementes germinaram em solo local, mas quando a cultura atingiu cerca de 10cm, uma camada de aproximadamente 3cm de dois diferentes tipos de substratos foi espalhada sobre o solo local, somente no terço central de seis canteiros.

Assim, os feijoeiros tiveram o mesmo solo como substrato (solo local) e a resposta espectral do solo superior, com o objetivo de simular três diferentes substratos pedológicos. Esses substratos são: areia lavada, Latossolo Roxo e solo local (Latossolo série Pinda). A areia lavada foi usada como substrato espectralmente claro; o Latossolo Roxo, como substrato espectralmente escuro e o Latossolo série Pinda como substrato espectralmente intermediário (Fig. 4.1).

No terço central dos canteiros, assim como nos canteiros de solo nu, o substrato em questão era repostado sempre que ocorria alguma remoção acidental (irrigação), ou adição de substrato estranho.

O controle de ervas daninhas foi feito de modo manual no terço central e canteiros de solo nu, e mecânico em outras partes.

A irrigação foi feita sem nenhum controle, com seis aspersores, que eram distribuídos na área do experimento, sempre que ocorriam períodos prolongados sem chuva.

3.2 - MEDIDAS RADIOMÉTRICAS

O FR da areia, do Latossolo Roxo e do Latossolo série Pinda foi medido em laboratório com o espectroradiômetro Iris Mark IV ("Infra-Red Intelligent Spectroradiometer") na faixa espectral de 400 a 2500 nm, mas nesse trabalho analisou-se somente até 1150nm (faixa comum ao Spectron SE-590); isto foi feito para ilustrar bem as diferenças de respostas espectrais entre os três substratos. Este espectroradiômetro possui uma faixa espectral de 0,3 a 3,0 micrômetros e as seguintes resoluções espectrais: entre 0,3 e 1,0 μm (detetores de silício), resolução de 2 nm, entre 1,0 e 3,0 μm (detetores de PbS), resolução de 4nm (GER, s.d.).

Na área experimental as medidas radiométricas foram feitas em quatro horários diários, das 10 às 13 hs, fazendo-se uma bateria de medições por hora. Tomando o cuidado de que o tempo gasto numa bateria de medições radiométricas não ultrapassasse 20 minutos, para que não ocorressem mudanças significativas nos ângulos zenitais e azimutais do Sol (Kimes, 1983; Kimes et al., 1984a; Kimes et al., 1984b; Jackson e Pinter Jr., 1986). Uma bateria de medições consiste de medidas em dois ângulos zenitais de visada: a zero e a trinta graus, nos 12 canteiros (nove canteiros de plantas e três canteiros de solo exposto).

Com três tipos de solos, quatro horários e dois ângulos zenitais de visada o experimento constituiu-se de um esquema fatorial de $3 \times 2 \times 4 = 24$ tratamentos e três repetições. A Tabela 3.1 ilustra os vinte e quatro tratamentos solosxhoráriosxângulos de visada.

TABELA 3.1 - TRATAMENTOS USADOS NESSE TRABALHO.

Areiax10x0	L.Roxox10x0	L.Pindax10x0
Areiax11x0	L.Roxox11x0	L.Pindax11x0
Areiax12x0	L.Roxox12x0	L.Pindax12x0
Areiax13x0	L.Roxox13x0	L.Pindax13x0
Areiax10x30	L.Roxox10x30	L.Pindax10x30
Areiax11x30	L.Roxox11x30	L.Pindax11x30
Areiax12x30	L.Roxox12x30	L.Pindax12x30
Areiax13x30	L.Roxox13x30	L.Pindax13x30

Foram realizadas onze campanhas radiométricas ao longo do ciclo da cultura, embora em certos dias foi impossível fazer quatro baterias devido à

nebulosidade no período da tarde, em algumas não as baterias foi possível adquirir todos os dados, devido a problemas de gravação no equipamento.

O radiômetro utilizado foi o espectroradiômetro Spectron SE - 590.

O Spectron SE - 590 é um equipamento portátil (alimentado por uma bateria de NiCd), especialmente projetado para operações de medições radiométricas de campo e contém duas partes: a unidade controladora (data logger/CE-500) e a unidade detectora (CE-390WB)(Fig.3.3). Esta unidade de construção é baseada numa rede de difração e uma matriz linear de 256 detetores de Silício (CCD): é capaz de realizar medições de espectros na faixa de 350 a 1150 nm com resolução espectral de 8 nm (Steffen et al., 1992).

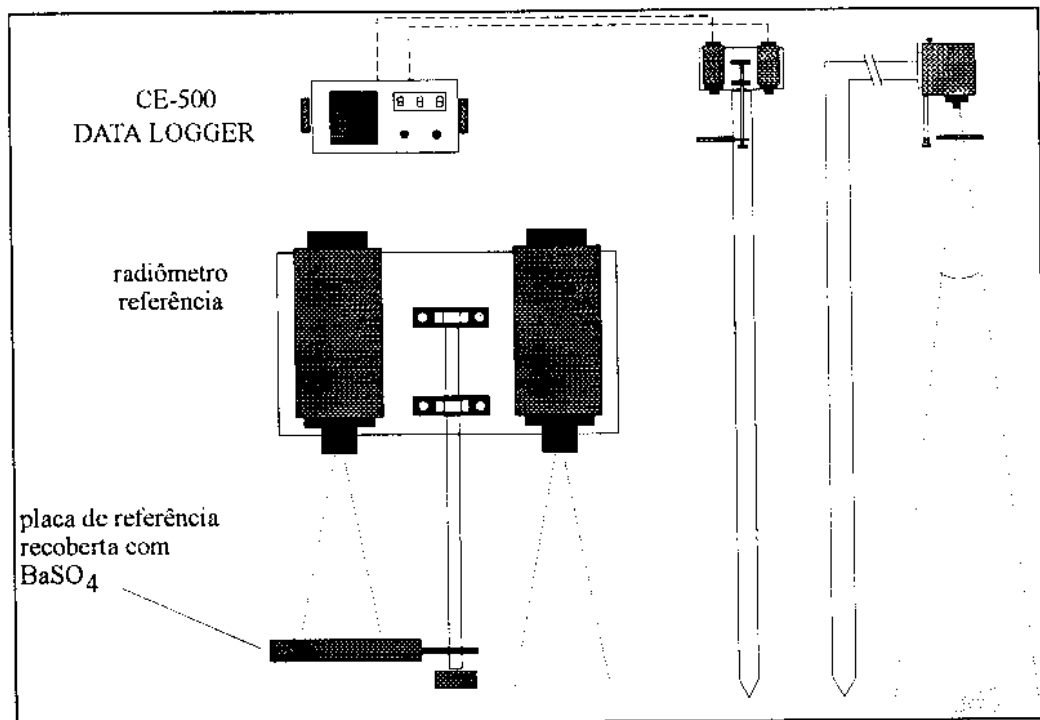


Fig. 3.3 - Equipamento de campo utilizado.

FONTE: Steffen 1992, p. 3.

Foram utilizadas 2 cabeças sensoras com FOV de 15° e uma bateria externa, uma vez que o tempo de uso era excessivo para a bateria interna. Utilizou-se também mastro com 3m de altura com 0,9m de alcance (Fig. 3.3), e placa de referência pintada com BaSO₄.

O sinal posteriormente foi corrigido pela placa padrão de sulfato de bário LARAD/INPE¹.

As medições foram feitas em "zigue-zague" iniciando-se as medições a nadir, seguindo-se a numeração na Figura 3.1; após o término a cabeça sensora que visava o alvo era mudada para a posição de 30° e executavam-se novas medições na ordem regressa dos canteiros.

O FOV dos ângulos zenitais de visada de 0° e 30° possuem o diâmetro de 0,79m (0,49 m² de área) e 1,06x 0,79m (0,66m² de área), respectivamente. Assim, foram feitas quatro medições por canteiro a zero grau e duas medições por canteiro a trinta graus. Para visadas a zero grau, foram feitas amostragens linha/entrelinha, que, segundo Daughtry et al.. (1982), é o melhor tipo de amostragem para dosséis incompletos. As medições foram feitas no lado sul dos canteiros, para que a projeção das sombras do mastro e do operador ficassem fora dos mesmos (Fig 3.4).

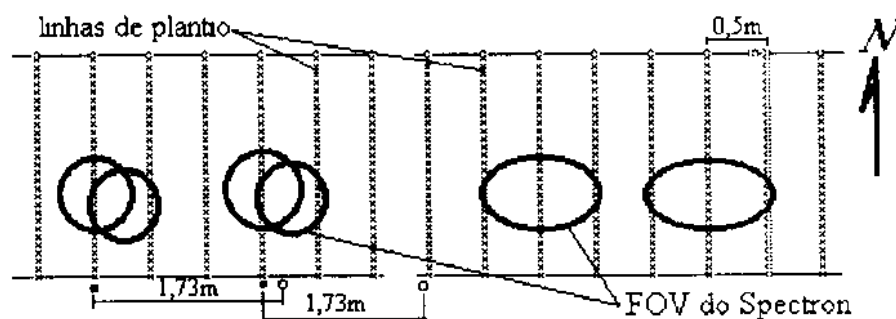


Fig. 3.4-Esquema de amostragem no terço central dos canteiros, e pontos de estacionamento do mastro para visadas a zero(n) e a trinta graus(O).

Deve-se salientar que o ângulo zenital de visada escolhido (30°), é um ângulo alcançado ou próximo do alcançado por quase todos sensores de visada direcionais lançados (AVHRR/NOAA, HRV/SPOT), ou por serem lançados; e a escolha do azimuth de visada (90°), foi escolhido para se obter informações da face mais iluminada do dossel.

¹ Laboratório de Radiometria, do INPE.

Cálculo do Fator de Reflectância Bidirecional

A calibração foi feita através da seguinte equação:

$$FRB = \frac{La, c1}{Lpr, c2}$$

$La, c1$ = radiância do alvo feita com a cabeça 1

$Lpr, c2$ = radiância da placa de referência feita com a cabeça 2

Conforme Milton (1987), o uso de duas cabeças permite uma medição alvo/referência num espaço de tempo bem curto, mas cuidados devem ser tomados para corrigir a diferença de sensibilidade entre as cabeças. Assim:

$$FCC = \frac{Lpr, c1}{Lpr, c2} \quad \text{onde:}$$

FCC = fator de correção das cabeças

$Lpr, c1$ = radiância da placa de referência feita com a cabeça 1

$Lpr, c2$ = radiância da placa de referência feita com a cabeça 2

B - Calibração da Placa de Referência

Para corrigir o sinal da placa de referência, foram feitas em laboratório, leituras da placa de referência e da placa padrão LARAD/INPE. O seguinte fator foi calculado:

$$FCPR = \frac{Lpp, cx}{Lpr, cx}, \quad \text{onde:}$$

FCPR = Fator de Correção da placa de referência.

Lpp, cx = Radiância da placa padrão medida com a cabeça x

Lpr, cx = Radiância da placa de referência medida com a cabeça x

Assim, o fator de reflectância direcional final é:

$$FRB = \frac{La,cl}{Lpr,c2 * FCC * FCPR}$$

Posteriormente os dados foram integrados em bandas TM1 (450-520 nm), TM2(520-600 nm), TM3(630-690 nm) e TM4(760-900 nm). Para este trabalho utilizou-se apenas as bandas TM3(R) e TM4(NIR).

Todos esses passos foram feitos em rotina do programa Espectro (desenvolvido no LARAD). Esse programa facilita a transferência e o tratamento de dados obtidos pelo espectroradiômetro Spectron. Utilizou-se um microcomputador PC 386 com coprocessador matemático, sistema operacional DOS 5.0, uma vez que o programa exige versão maior ou igual ao 3.0, e um porta de comunicação serial RS 232.

Cálculo dos índices de vegetação

Após a conversão da reflectância em bandas TM, deu-se entrada dos valores na planilha Quattro Pro para o cálculo dos índices de vegetação NDVI, PVI e SAVI. O mesmo cálculo foi feito novamente no pacote estatístico SAS.

O NDVI foi calculado pela seguinte fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

Para o cálculo do PVI, a linha do solo foi obtida utilizando os três solos, uma vez que a variação dos valores de inclinação e intercepto entre os solos era pequena. Utilizou-se a seguinte fórmula:

$$PVI_{R,NIR} = \frac{[NIR - aR - b]}{[1 + a^2]^{1/2}}, \text{ uma vez que a linha do solos era feita}$$

com os valores de infravermelho próximo na ordenada e vermelho na abcissa.

Quanto ao índice SAVI, este foi gerado pela seguinte equação $SAVI = \frac{[(NIR+l_2)-(R+l_1)]}{[(NIR+l_2)+(R+l_1)]}$, e utilizou-se valores de l_1 e l_2 iguais a 0,25 (utilizado por

Huete (1988) tentando-se obter uma isolinha intermediária ao NDVI e ao PVI. A fórmula final foi:

$$SAVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)}, \text{ onde L é um valor igual a 0,5.}$$

Os ângulos solares foram calculados através de um programa em Basic, utilizando como parâmetro de entrada a latitude e a longitude local; a ascensão reta e a declinação do Sol foram obtidas para as respectivas datas de medições, no Anuário Astronômico USP (1993).

3.3 - PARÂMETROS AGRONÔMICOS

No fim de um dia de medição radiométrica, duas plantas eram coletadas de cada terço lateral dos canteiros, sendo posteriormente acondicionadas em sacos de papel já identificados colocadas em sacos de papel identificados. Esse procedimento de amostragem foi feito para que amostras à esquerda e à direita fossem mais representativas tanto quanto possível das plantas centrais, onde as medições radiométricas eram conduzidas.

As folhas das plantas eram retiradas e a sua área total foi obtida no medidor de área foliar LI-3100.

O índice de área foliar foi obtido pela fórmula:

$$IAF = \left(\frac{NPM * AFMP}{EF} \right) \quad , \quad \text{onde:}$$

NPM = número médio de plantas por metro

AFMP = Área foliar média por planta (m²)

EF = espaçamento entre fileiras

Posteriormente, as folhas foram colocadas novamente nos respectivos sacos junto com os caules e ramos. Todo material foi levado à estufa e secado a 85°C por 48 horas; após a secagem, o material era pesado em balança mecânica, com precisão de 0,1 grama.

Também foram coletadas amostras dos três tipos de solo para a obtenção da umidade. A amostragem era feita nos três canteiros e no canteiro de solo nu para cada tipo de substrato, e colocados em sacos plásticos .

A umidade dos substratos foi obtida pelo método padrão de estufa (gravimétrico), segundo Bernardo (1989). Os substratos foram colocados em recipientes

abertos (placa de Petri), pesados (M1) e colocados em estufa a 105°C por 24 horas no mínimo. Retirou-se o recipiente com substrato da estufa e pesou-se novamente (M2). Sendo M3, o peso do recipiente, a porcentagem de umidade é dada pela equação:

$$\text{Porcentagem de umidade} = \frac{M1 - M2}{M2 - M3} * 100$$

Fotografias verticais foram obtidas com uma câmera fotográfica (com dispositivo de retardo do disparo) acoplada ao mesmo mastro do radiômetro. Foi obtida uma foto/canteiro/dia, para os canteiros que apresentavam diferenças visuais de desenvolvimento; para os demais canteiros (iguais entre si), uma foto para representar todos eles.

A porcentagem de cobertura vegetal (COV) foi obtida colocando-se a foto embaixo de um papel milimetrado transparente, e então realizada uma contagem de pontos referentes à vegetação. Dividindo-se a área com vegetação pela área total delimitada na foto, obteve-se a porcentagem de cobertura vegetal.

Um outro parâmetro medido foi o ângulo de inclinação de folhas com um clinômetro de mão. A base do clinômetro era colocada paralelamente à nervura central de cada folha, tendo-se coletado o ângulo de aproximadamente 50 folhas em intervalos de uma hora. Posteriormente gerou-se curvas da Função Acumulativa de Distribuição de Ângulos e caracterizou-se o dossel segundo Bunnik (1978).

3.4 - TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS.

De posse dos dados, foi realizada a análise de variância (ANOVA) fatorial no pacote estatístico SAS, escolhendo-se quatro datas para representar todo o ciclo da cultura. Essas datas também foram escolhidas por que foram dias em que se conseguiu obter todos os dados (quatro baterias).

Os valores dos índices foram analisados para os fatores: solos, ângulo de visada, horário e suas interações- soloxângulo, soloxhorário, ânguloxhorário e soloxânguloxhorário.

Foram feitos gráficos de barras para cada índice, analisando-se os três fatores isoladamente e destacando-se se o fator analisado era significativo a nível de 5%(*) ou a 1%(**) respectivamente(teste F).

As interações que foram significativas foram desdobradas para se observar o comportamento de um fator A dentro de um fator B, e posteriormente o comportamento do fator B dentro do fator A. As médias significativamente iguais foram ordenadas e agrupadas pelo teste de Duncan a nível de 5%.

As regressões também foram obtidas no pacote estatístico SAS, pelo modelo não linear, entre cada índice as variáveis agronômicas COV, FST e IAF; utilizaram os dados das dez primeiras datas, somente a nadir e plotaram em um mesmo gráfico, os valores de um índice para três tipos de solos, fazendo-se uma observação visual da dispersão dos dados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo do ciclo da cultura foi possível realizar onze campanhas de coleta de dados (uma na fase senescente) radiométricos e agronômicos. Em algumas campanhas não foi possível realizar quatro baterias radiométricas, devido a condições atmosféricas desfavoráveis no período próximo ao meio dia. Para a análise de variância, foram escolhidas quatro datas para representar todo o ciclo da cultura; essas datas foram a do dia 13-8 com uma COV de 22%, 30-8 com uma COV de 51%, 6-9 com uma COV de 67% e dia 20-9 com uma COV de 100%; nestas datas temos uma grande variação da geometria do dossel, de estruturas em linhas a geometria plana. Deve-se também ressaltar que nessas datas conseguiram-se todos os dados (quatro horários) nos dois ângulos de visada.

Um fator importante que deve ser ressaltado aqui é o crescimento desigual dos canteiros causado pela irrigação via aspersão, tanto pelo posicionamento dos aspersores dentro do experimento como pela influência do vento no jato de água. A Tabela 4.1 mostra os dados de umidade dos solos (na camada de 0 a 4 cm) obtidos ao longo do ciclo da cultura e os respectivos estádios fenológicos.

TABELA 4.1 - UMIDADE MÉDIA (%) DOS TRÊS SUBSTRATOS E OS RESPECTIVOS ESTÁGIOS FENOLÓGICOS

CAMPANHA	DATA	EST. FENOL	COV (média)	UMIDADE (%)		
				AREIA	L. PINDA	L. ROXO
1	6-8	V4	16	0	0	0
2	9-8	V4	18	4.1	17	24
3	13-8	V4	22	5.4	20	29
4	18-8	V4	32	6	28.8	31
5	23-8	V4	47	5	22.7	28
6	26-8	V4	48	4	20.6	24.5
7	30-8	V4	51	0.1	3	7.6
8	6-9	V4-R5	67	0	0	0
9	14-9	R5	93	0	0	0
10	20-9	R5	100	1	18	23
11	4-10	R8-R9	94	3	20	25

Além da irrigação desigual entre os canteiros, deve-se observar que os diferentes substratos têm diferentes texturas granulométricas que proporcionam drenagens desiguais.

Como esperado, os três substratos produziram respostas espectrais com intensidade baixa, média e alta, como se pode ver na Figura 4.1.

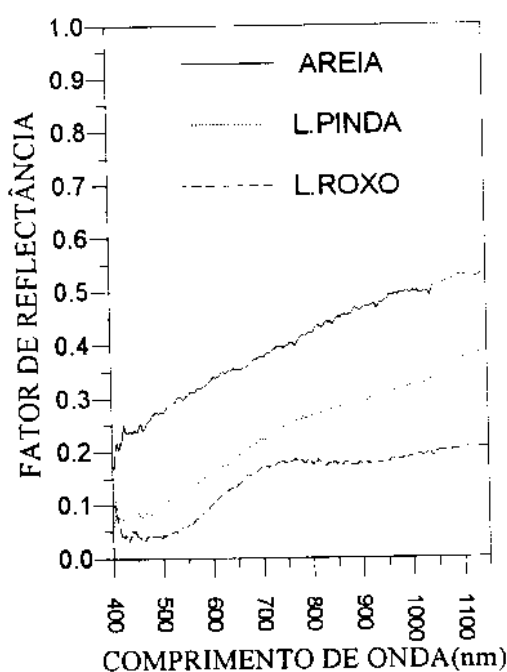


Fig. 4.1 - Fator de Reflectância dos três solos utilizados (medidas radiométricas efetuadas no espectroradiômetro Iris Mark-IV).

Dos canteiros de solo nu, obtiveram-se os dados para o cálculo das equações de regressão ("linhas do solo" para o cálculo do índice PVI), nas bandas R e NIR, como é possível visualizar na Figura 4.2. Observa-se na mesma figura, a dispersão ao longo da linha para os três solos usados; essa dispersão deve-se a variação da umidade no decorrer dos dias; vê-se também que essa variação do valor da reflectância foi mais acentuada em solos claros.

Os coeficientes, inclinação e intercepto para os três solos são mostrado na Tabela 4.2. Observa-se que os coeficientes de inclinação são bastante próximos entre si, e os valores de intercepto bastante próximos de zero.

TABELA 4.2 - COEFICIENTES DE INCLINAÇÃO E INTERCEPTO PARA AS LINHAS DE SOLOS INDIVIDUAIS.

SOLO	INCLINAÇÃO (a)	INTERCEPTO (b)
LATOSSOLO ROXO	1,335	-0,0064
LATOSSOLO série PINDA	1,315	0,01327
AREIA	1,159	0,02051

Devido à baixa variação dos coeficientes de intercepto e de inclinação, optou-se por se fazer uma única linha dos solos, como observado na Figura 4.2. Nota-se que todos os três solos aproximam-se muito de se enquadrar em uma única reta. Observa-se também, na mesma figura, a variação dos valores de reflectância para os solos, sendo esta variação determinada pela alteração da umidade dos mesmos. A amplitude é mais acentuada na Areia do que nos solos mais escuros.

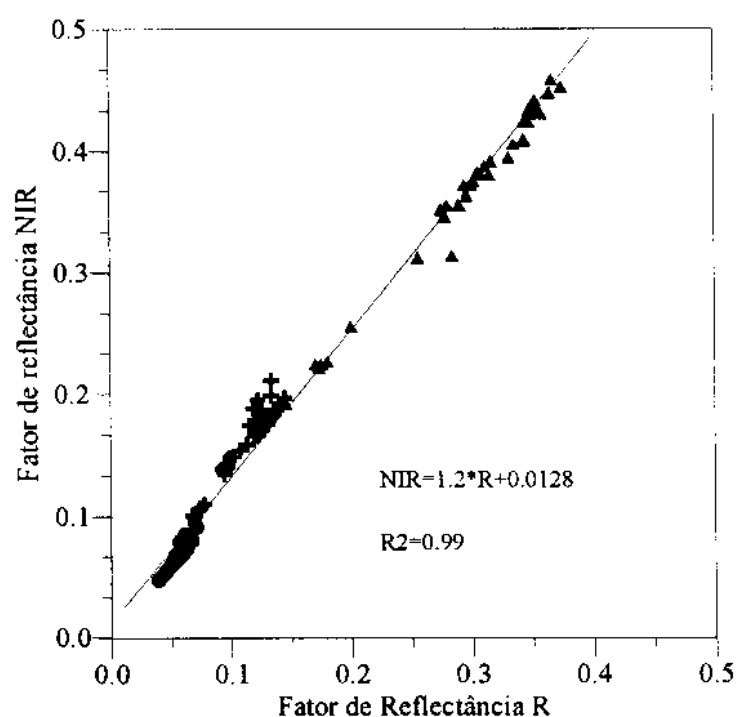


Fig. 4.2 - "Linha dos solos" para os três substratos utilizados; (▲)Areia, (●)L. Roxo e (✚)L. Pinda.

Assim, a equação para o cálculo do PVI foi:

$$PVI = 0,640 \cdot NIR - 0,768 \cdot R - 0,0082$$

Nos gráficos e tabelas seguintes apresentam-se o resultados da análise de variância fatorial para os três índices estudados. Os ângulos zenitais e azimutais solares para cada dia, nos quatro horários diários de medição (h1 a h4) é mostrado na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - ÂNGULOS ZENITAIS E AZIMUTAIS SOLARES (EM GRAUS) E HORAS MÉDIAS EM QUATRO DATAS DE MEDIÇÕES.

		DATAS DE MEDIÇÕES							
		13-8-93		30-8-93		6-9-93		20-9-93	
MEDIÇÃO	HORA	AZIM	ZEN	AZIM	ZEN	AZIM	ZEN	AZIM	ZEN
h1	10:14	35	44,8	45	43	43	38,7	47	32
h2	11:16	13	38,6	21	34,2	22,5	31,6	22,6	26
h3	12:19	347,5	38,4	351,3	32	353	29,7	346,5	24,7
h4	13:18	327	43,6	327	37	328	33,9	317	31,4

Na Figura 4.3 têm-se os valores do índice NDVI para os três fatores analisados: solo, ângulo de visada e horário para as quatro fases da cultura que foram analisadas. Observa-se primeiramente para o fator solo, que este influenciou de forma significativa o índice em todas as fases da cultura, tanto a nível de 1%(**) como a nível de 5%(*).

O valor do índice, sobre canteiros com areia, foi sempre menor até a fase em que a cultura apresentou uma porcentagem de cobertura vegetal de 67%; mas quando a cultura apresenta uma porcentagem de cobertura de 100%, o valor do NDVI obtido no canteiro de areia é maior. Para Huete et al. (1985), o NDVI decresce com o aumento do brilho do solo para porcentagens de cobertura vegetal inferiores a 90%; neste trabalho observa-se um comportamento inverso, já que o valor do NDVI no solo LR, que é o solo mais escuro entre os três, é menor do que o LP, na fase de 22% de COV.

Uma possível explicação para isso, seria devido aos valores de vermelho e infravermelho próximo para o Latossolo Roxo serem bastante próximo entre

si. Exemplificando através de uma representação gráfica, vemos na Figura 4.4 linhas de NDVI para três valores de NIR fixos. Uma queda no valor de R igual a 0,05 em relação a linha NIR igual a 0,15 causa uma elevação no valor do índice muito maior do que uma queda de 0,1 em relação a curva NIR igual a 0,45.

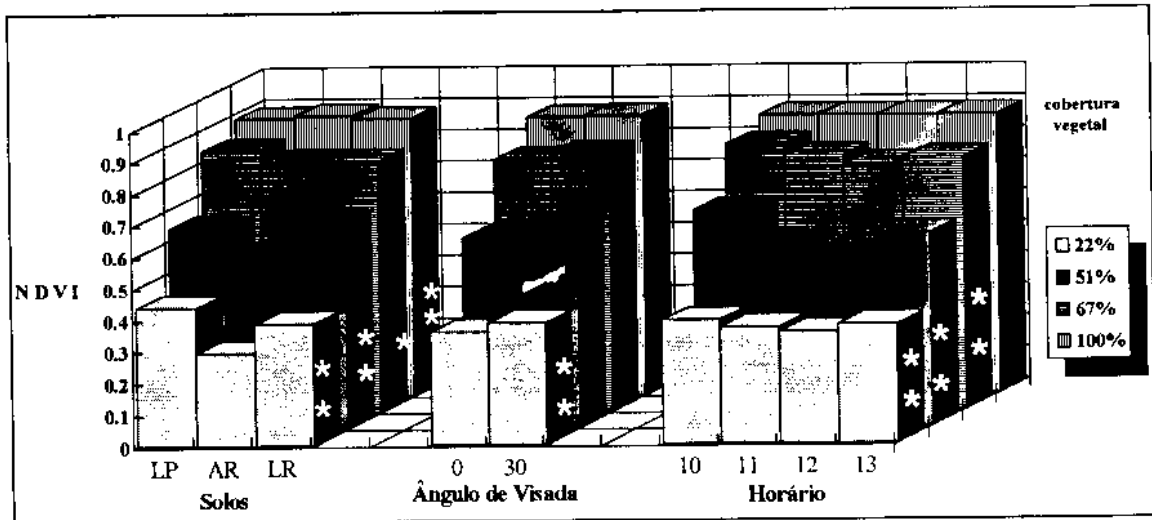


Fig. 4.3 - Valores do NDVI para os três fatores estudados. Os asteriscos representam o grau de significância a nível de 5%(*) e 1%(**), respectivamente.

Com relação aos ângulos de visada, a diferença entre os ângulos zenitais zero e trinta graus só foi significativa (a nível de 1%) na fase inicial da cultura; nas demais fases, essa diferença não foi relevante.

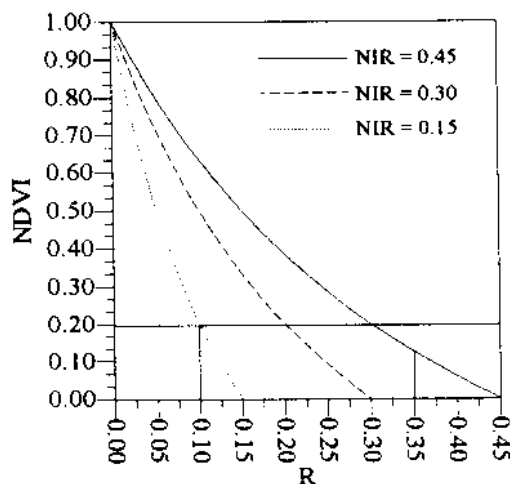


Fig. 4.4 - Variação dos valores do índice NDVI, com NIR fixo em função de R.

Quanto ao horário de medição, observa-se que a mudança dos ângulos solares causou mudanças significativas no valor do NDVI até quando a cultura apresentou uma estrutura em linhas (67% COV), pois a alteração de superfícies iluminadas e sombreadas no dossel e no solo era mais acentuada (Fig. 4.5). Quando a cultura apresentou um COV de 100% e uma geometria plana a alteração de horário deixou de ser relevante.

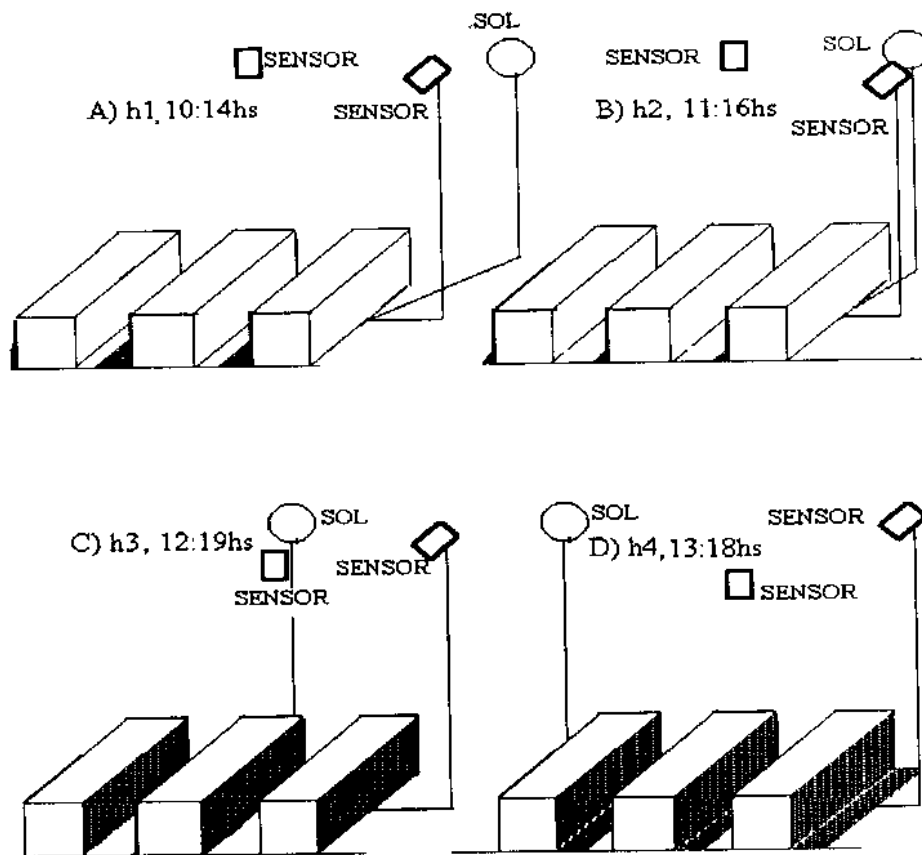


Fig.4.5 - Representação esquemática da variação de sombreamento de uma cultura em linha, com alinhamento norte-sul, em quatro horários.

Para o índice PVI, observa-se na Figura 4.6 o mesmo tipo de gráfico construído para o NDVI, os asteriscos indicam se as médias foram significativas a nível de 5%(*) ou a 1%(**).

Nota-se que, para o fator solo, o índice PVI obtido nos canteiros com areia apresenta um maior valor do que para o índice NDVI. Huete (1985), trabalhando com dosséis de algodão, também encontrou valores maiores para o PVI em solos com alto brilho, em relação a solos de menor brilho, em todas as fases do ciclo.

Novamente, o fator solos influenciou o valor do índice. No caso, o PVI, até mesmo quando a cultura apresentou uma porcentagem de cobertura vegetal de 100%. Ao contrário do NDVI, a variação dos ângulos zenitais de visada não foram significativos em nenhuma fase do ciclo.

Quanto ao terceiro fator analisado, variação do horário, nota-se que somente a 100% de COV a variação do PVI deixou de ser significativa.

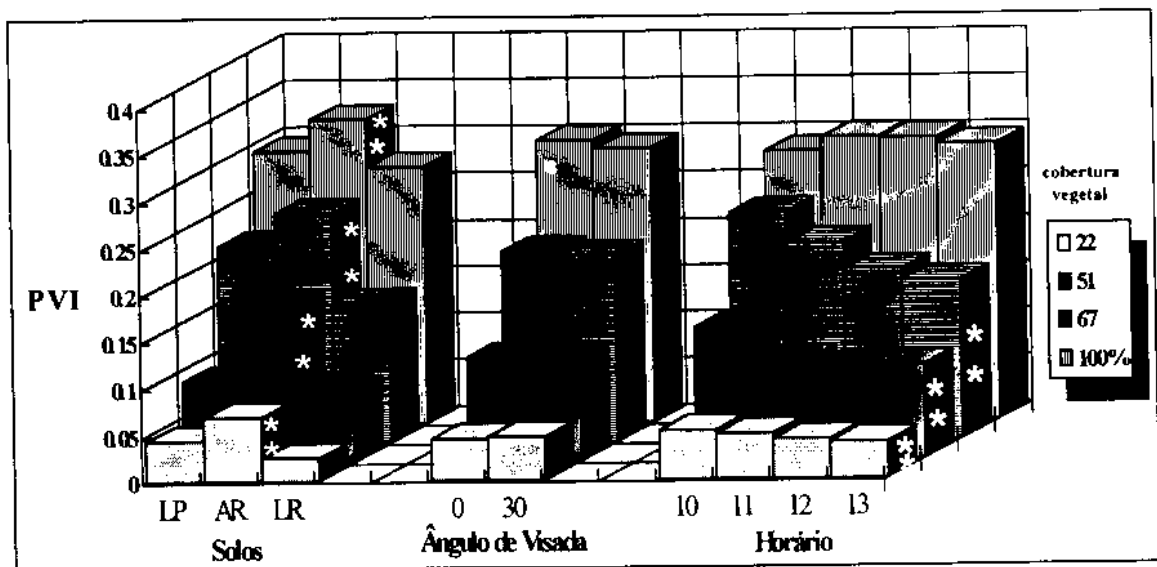


Fig.4.6 - Valores de PVI para os três fatores analisados. Os asteriscos representam o grau de significância a nível de 5%(*) e 1%(**) respectivamente.

Quanto ao índice SAVI (Figura 4.7), observa-se um desempenho muito semelhante ao PVI, para todos os fatores. Uma das possíveis causas dessa redundância, seja os valores de l_1 e l_2 (Cap3), os quais foram ajustados para o valor 0,25 ($L=0.5$) e não produziram valores intermediários ao NDVI e ao PVI, e sim valores mais próximos ao PVI. Para Baret e Guyot (1991), para valores de $L=0$ o SAVI é equivalente ao NDVI, mas se o valor de L for muito grande o SAVI é equivalente ao PVI (as linhas do solo e da vegetação são paralelas). Nota-se novamente que os solos

influenciaram significativamente o índice em todas as fases do ciclo; já variação dos ângulos zenitais de visada não foram relevantes e somente a 100% de COV a variação do horário deixou de ser significativo.

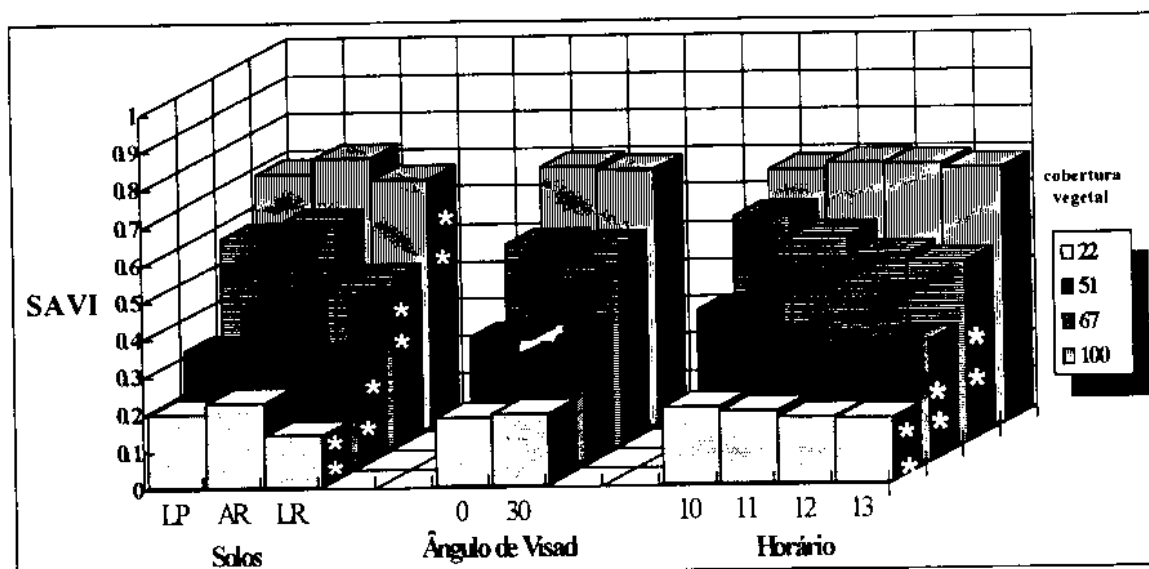


Fig 4.7 - Valores de SAVI para os três fatores analisados. Os asteriscos representam o grau de significância a nível de 5%(*) e 1%(**).

Portanto, observa-se ao se analisar a influência dos fatores nos três índices estudados, que os solos interferem na avaliação do dossel vegetal até mesmo a porcentagens de cobertura vegetal de 100%. No que diz respeito ao ângulo de visada, exceção do índice NDVI na fase de 22% de COV, a variação do ângulo zenital de visada até trinta graus não é um fator relevante, para Smith et al. (1980) citado por Wardley (1984), o ângulo de visada de $\pm 30^\circ$ seria um intervalo apropriado na discriminação de dosséis vegetais.

Nota-se também que a interação geometria do dossel com a variação do ângulo solar (horário), foi determinante na influência dos diferentes horários sobre os três índices de vegetação.

A análise da interação soloxângulo foi feita, primeiramente, analisando a diferença dos solos depende do ângulo e depois analisando se dentro de um mesmo solo existe diferença entre os ângulos. Observou-se que somente na fase inicial (22% de COV), a interação soloxângulo foi significativa a nível de 5% para os três índices.

Na Tabela 4.4 observa-se o desdobramento dos solos para cada ângulo e a separação das médias pelo teste de Duncan a nível de 5%; vê-se que, para os três solos os valores médios dos índices diferem entre si, qualquer que seja o ângulo de visada, na verdade como se observou anteriormente existe a influência dos solos para qualquer que seja o ângulo de visada.

TABELA 4.4 - DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO SOLOxÂNGULO PARA OS ÍNDICES NDVI, PVI, SAVI A 22% DE COV.

ÂNGULO	SOLO	NDVI	PVI	SAVI
0	L. Pinda	0,42426 A	0,04331 B	0,19319 B
	Areia	0,28778 C	0,07070 A	0,22788 A
	L.Roxo	0,3564 B	0,02094 C	0,12617 C
30	L.Pinda	0,44738 A	0,04489 B	0,19748 B
	Areia	0,29410 C	0,06650 A	0,22198 A
	L.Roxo	0,41176 B	0,02883 C	0,15040 C

Na Tabela 4.5 observa-se o desdobramento dos ângulos para cada solo e a separação das médias pelo teste de Duncan a nível de 5%; vê-se que somente sobre o Latossolo Roxo a diferença entre os dois ângulos de visada deu-se significativamente diferente.

TABELA 4.5 - DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO ÂNGULOxSOLO PARA OS ÍNDICES NDVI, PVI, SAVI A 22% DE COV.

SOLO	ÂNGULO	NDVI	PVI	SAVI
L.PINDA	0	0,42426 A	0,04331 A	0,19319 A
	30	0,44738 A	0,04489 A	0,19748 A
AREIA	0	0,28778 A	0,07070 A	0,22198 A
	30	0,29410 A	0,06650 A	0,22617 A
L.ROXO	0	0,3564 B	0,02094 B	0,12617 B
	30	0,41176 A	0,02883 A	0,15040 A

Portanto, como observado, na interação soloxângulo a uma COV média de 22% a variação dos solos dentro de um mesmo ângulo é um fator relevante e a variação de ângulos para um mesmo solo só é relevante sobre solos escuros. Uma vez que a variação da proporção solo escuro x vegetação dentro do FOV do sensor causou

diferenças no valor dos índices poderia se esperar que o mesmo ocorresse nas fases seguintes onde existia estruturas em linhas, o que não correu.

A interação solo x horário não foi significativa em nenhuma das quatro fases analisadas; entretanto a interação ângulo x horário foi significativa para os índices PVI e SAVI na fase de 22% de COV e para os índices NDVI e SAVI na fase de 51% COV.

Analisando, primeiramente, a fase onde a COV média era de 22%, vemos na Tabela 4.6 o desdobramento dos ângulos em função do horário. Observa-se que, em nenhum dos quatro horários, a diferença entre os ângulos zenitais de visada foi significativa, como já visto anteriormente.

TABELA 4.6 -DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO ÂNGULOxHORÁRIO PARA OS ÍNDICES PVI E SAVI A 22% DE COV.

HORÁRIO	ÂNGULO	PVI	SAVI
10	0	0,04603 A	0,1900 A
	30	0,05928 A	0,2189 A
11	0	0,0485 A	0,1891 A
	30	0,0491 A	0,1965 A
12	0	0,0423 A	0,1780 A
	30	0,0428 A	0,1783 A
13	0	0,0431 A	0,1776 A
	30	0,0359 A	0,1661 A

Na Tabela 4.7 faz-se o desdobramento da interação ânguloxhorário, analisando-se a variação do horário dentro de um mesmo ângulo zenital de visada. Nota-se que somente no ângulo de visada de 30°, ocorreu variação significativa devido a mudança de horários.

TABELA 4.7 - DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO HORÁRIOxÂNGULO PARA OS ÍNDICES PVI E SAVI A 22% DE COV.

ÂNGULO	HORÁRIO	PVI	SAVI
0	10	0,0460 A	0,1900 A
	11	0,0485 A	0,1891 A
	12	0,0423 A	0,1730 A
	13	0,0431 A	0,1776 A
30	10	0,0593 A	0,2189 A
	11	0,0491 AB	0,1965 AB
	12	0,0428 AB	0,1783 B
	13	0,0358 B	0,1661 B

Para a fase de COV média de 51%, os índices NDVI e SAVI mostraram-se significativamente diferentes. Na Tabela 4.8 faz-se a análise da interação horário x ângulo, observando-se a mudança de horário para um mesmo ângulo; para o índice NDVI, somente a mudança do horário para visadas a nadir são significativas, mas para o índice SAVI a variação do horário para ambos ângulos de visada foram significativas

TABELA 4.8 - DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO ÂNGULOxHORÁRIO PARA OS ÍNDICES NDVI E SAVI A 51% DE COV.

ÂNGULO	HORÁRIO	NDVI	SAVI
0	10	0,7351 A	0,4183 A
	11	0,5820 B	0,3312 B
	12	0,5233 B	0,3003 B
	13	0,5648 B	0,3237 B
30	10	0,6354 A	0,4030 A
	11	0,5712 A	0,3265 AB
	12	0,6065 A	0,3175 B
	13	0,6584 A	0,3237 AB

Ainda vê-se na Tabela 4.9, que existe variação significativa para o fator ângulo de visada para as 10 horas no índice NDVI; isto é uma foi de relevância isolada, porque como já se viu nas análises anteriores a variação do ângulo não foi significativa.

TABELA 4.9 - DESDOBRAMENTO DA INTERAÇÃO HORÁRIOxÂNGULO PARA OS ÍNDICES NDVI E SAVI A 51% DE COV.

HORÁRIO	ÂNGULO	NDVI	SAVI
10	0	0,7351 A	0,4183 A
	30	0,6354 B	0,4030 A
11	0	0,5820 A	0,3312 A
	30	0,5712 A	0,3265 A
12	0	0,5233 A	0,5233 A
	30	0,6065 A	0,6065 A
13	0	0,5648 A	0,3237 A
	30	0,6584 A	0,3237 A

A interação soloxânguloxhorário não foi significativa em nenhuma das fases analisadas.

Nos gráficos seguintes (Fig. 4.8 a 4.10) mostra-se a regressão, segundo funções não lineares, dos índices de vegetação com os parâmetros agronômicos. Escolheu-se para esta análise o horário das 10 horas e plotou-se conjuntamente os valores de cada índice obtidos a nadir nos três substratos, visualizando-se a dispersão dos pontos tanto para solos mais claros como para solos mais escuros. Deve-se considerar que existe uma variação de 16° para ângulos zenitais e 19° para os ângulos azimutais da primeira (9-8-93) até a última (20-8-93) medição radiométrica devido principalmente a variação sazonal do sol.

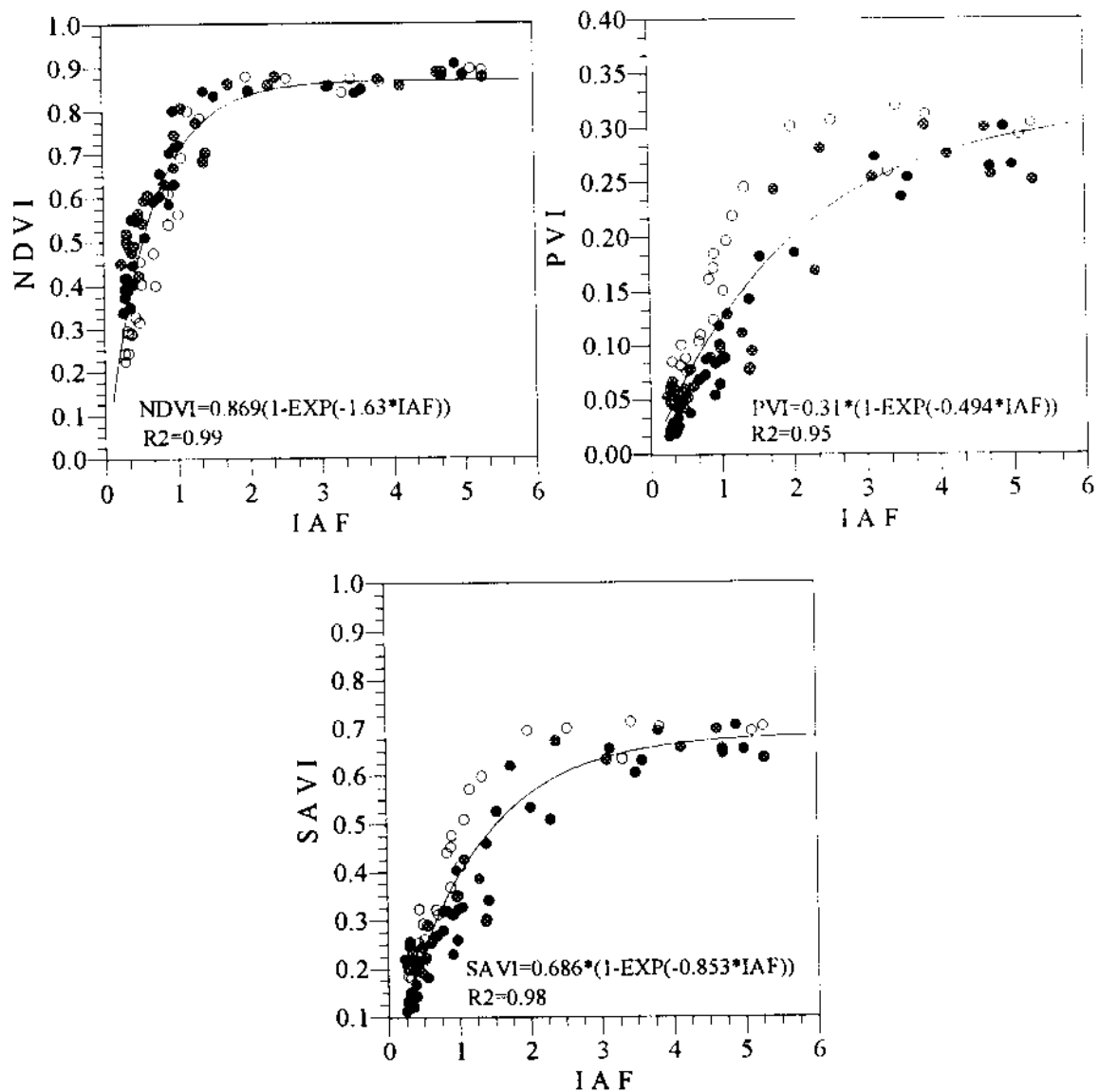


Fig. 4.8 - Análise de regressão dos índices NDVI, PVI e SAVI com o parâmetro agrônomo IAF obtidos na Areia(○), LP(◐), LR(●).

Observa-se que dentre os índices analisados o NDVI é o índice que apresenta uma melhor dispersão dos dados, dos solos mais claros a solos mais escuros; vê-se também que para o índice SAVI ao redor do IAF dois há uma maior dispersão de pontos, embora menor do o PVI. Na regressão $NDVI \times IAF$, observa-se que apesar de existir uma tendência de resposta para IAF maior do que dois, pequenas variações do valor do índice ou erros de medição levariam a uma estimativa errada do valor do IAF. Holben et al. (1980) também observou que a natureza assintótica dessa curva tornaria o uso desse índice restrito em condições de alta biomassa de folhas.

Nas análises de regressões dos índices com o parâmetro agrônômico FST (Fig 4.9), nota-se uma distribuição de pontos bastante redundante com o IAF, mostrando que as folhas na cultura do feijão é um parâmetro bastante determinante das características do dossel.

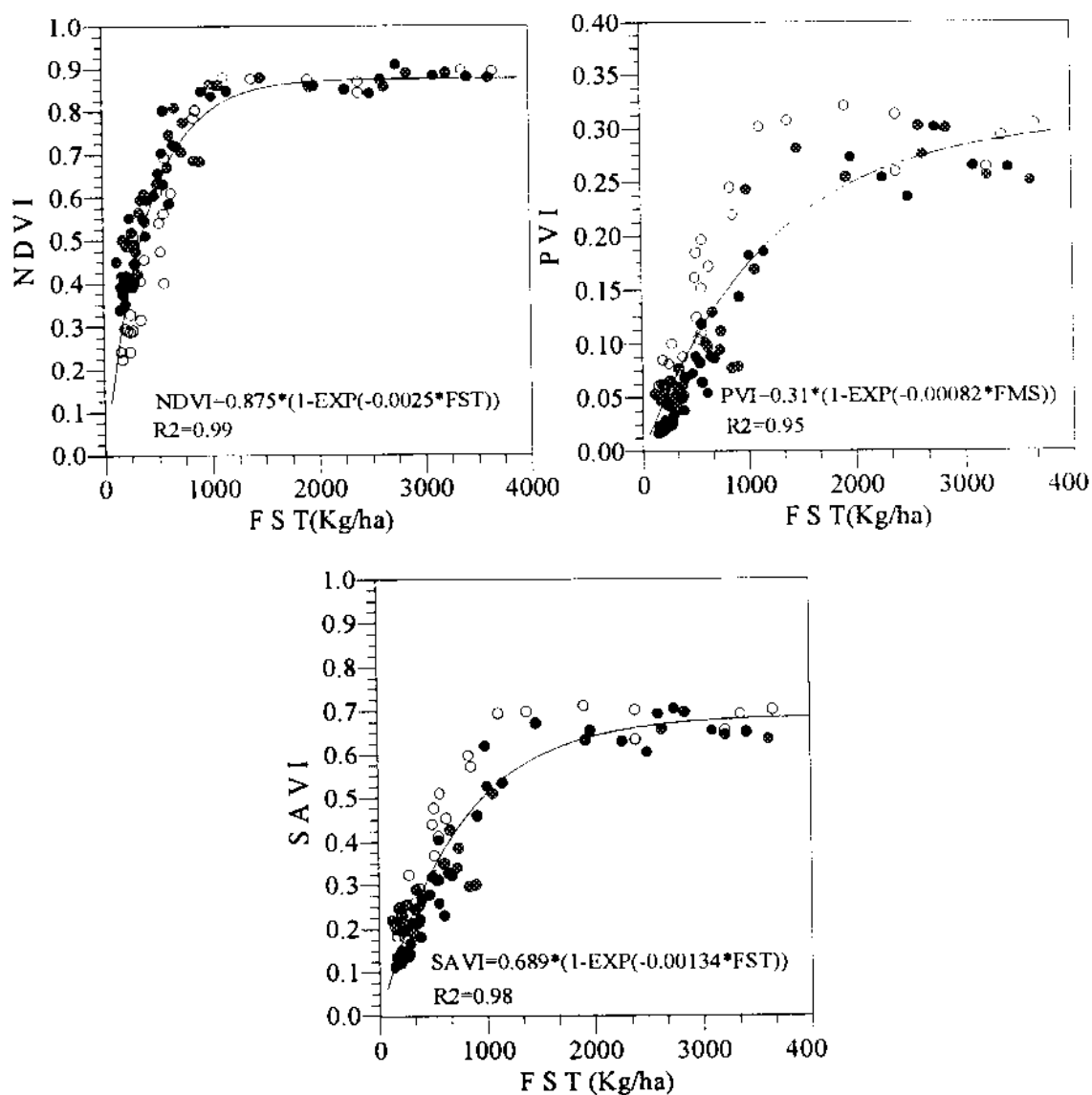


Fig. 4.9 - Análise de regressão dos índices NDVI, PVI e SAVI com o parâmetro agrônômico FST obtidos na Areia(○), LP(◐), LR(●).

Com o parâmetro agrônômico COV não foi feita regressão, e assim optou-se em mostrar a dispersão dos pontos. Observa-se na Figura 4.8 uma leve tendência em "s" dos pontos analisados e uma dispersão muito grande dos valores dos índices; isto é devido o parâmetro agrônômico COV não retratar o desenvolvimento do dossel como o IAF e a

FST. Observou-se que, com o aumento do número de camadas de folhas, ocorre uma expansão vertical do dossel sem uma correspondente expansão horizontal, ou seja, canteiros com IAF bastante diferentes apresentavam COV muito próximas.

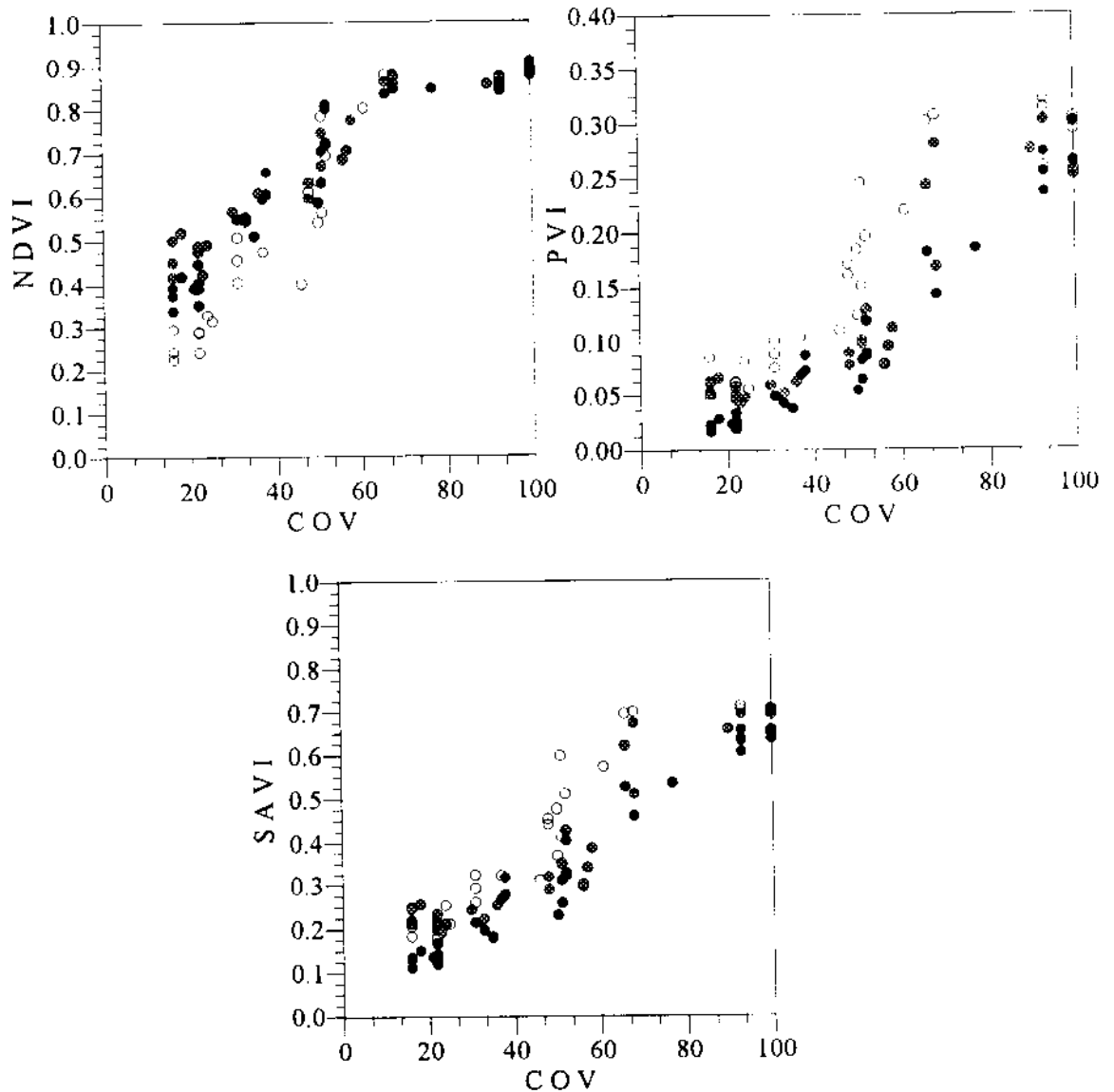


Fig. 4.10 - Análise de regressão dos índices NDVI, PVI e SAVI com o parâmetro agrônômico COV obtidos na Areia(○), LP(◐), LR(●).

Um outro problema com esse parâmetro agrônômico, seria a saturação em descrever o desenvolvimento do dossel em fases mais avançadas. Neste trabalho, conseguiu-se somente uma medição radiométrica com uma COV de 100%. Holben et al. (1980) mostram que após a cultura atingir uma COV de 100% o IAF continua a

aumentar alterando a resposta espectral, isto pode ocorrer principalmente em função do espaçamento da cultura.

As curvas de frequência cumulativa foram geradas em três datas - 9-8, 13-8 e 26-8-93, em quatro horários diferentes para cada data (Fig 4.11).

Observa-se que ocorreram mudanças de um horário para outro nas frequências cumulativas em todos os dias (principalmente no dia 13-8), embora o dossel fosse, sempre, predominantemente planófilo, segundo Bunnik (1978).

No dia 9-8, vê-se no ponto em destaque (seta) que praticamente 100% das folhas tem ângulo menor ou igual a 60° . No dia 13-8, nota-se na linha do primeiro horário(●), que até o sexto ponto (seta), quase 95% das folhas têm ângulo de inclinação menor ou igual a 50° ; esse valor cai para 75% no quarto horário. No dia 26-8 o heliotropismo segue a mesma tendência dos dias anteriores.

Ranson et al (1981) encontraram resultados similares para dosséis de soja, entretanto, realizaram apenas uma medição por dia (durante três dias), estando eles preocupados com a mudança de arquitetura do dossel ao longo do ciclo e não durante o dia. Os autores supuseram que os dias quentes e sem chuvas (estresse hídrico) foram a principal causa da mudança dos ângulos das folhas.

A medição do ângulo de inclinação das folhas é um trabalho difícil e moroso, principalmente em dias com vento; além do heliotropismo estar muito dependente das condições ambientais. Na literatura observa-se que não existe uma sequência de pesquisa sobre esse assunto, alguns autores como Shutt et al (1985) foram os que melhor retrataram o heliotropismo, estudando as variações nas posições das folhas num sistema de três eixos.

Uma outra preocupação é avaliar a influência do heliotropismo no FRB. Neste sentido, Jackson e Pinter Jr. (1986) observaram a influência da arquitetura na resposta espectral de trigo, entretanto essa cultura apresenta uma "arquitetura estática". Em culturas heliotrópicas, a mudança de ângulo das folhas ocorre dentro de um contexto maior de mudança de posição do sol, e alteração do sombreamento da cena, principalmente em dosséis com a geometria de linhas. Então fica difícil analisar o quanto da variação da resposta espectral deve-se ao heliotropismo e o quanto deve-se à variação do sombreamento.

Uma possível solução seria usar um modelo altamente preciso, onde alterando-se os parâmetros de geometria de iluminação e mantendo-se a distribuição angular das folhas constante (DAF), conseguir-se-ia quantificar realmente o quanto a resposta alterou em relação ao medido (com heliotropismo).

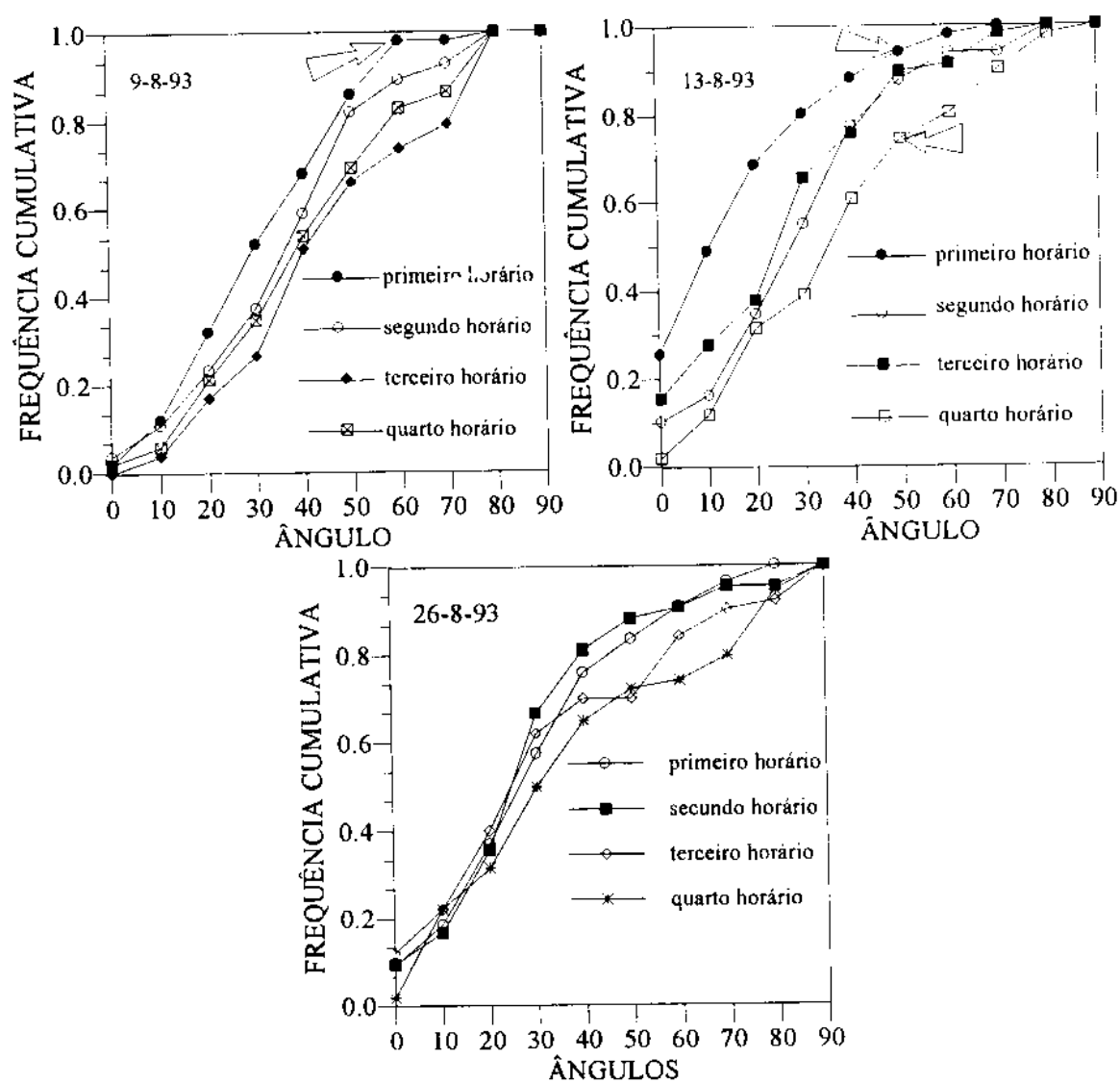


Fig. 4.11 - Frequência cumulativa dos ângulos de inclinação das folhas de feijão em três datas diferentes.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.

Considerando o material e métodos empregados, nas condições ambientais da área em estudo, a análise e interpretação dos dados possibilitam as seguintes conclusões:

Os três tipos de solos influenciaram de forma significativa os índices PVI, SAVI e NDVI em todas as fases da cultura.

A variação do ângulo zenital de visada influenciou o índice NDVI apenas na fase inicial da cultura, com COV de 22%. Os demais índices não foram afetados em nenhuma das quatro fases do ciclo da cultura.

O ângulo de elevação solar influenciou todos os índices durante as três fases analisadas da cultura, que apresentava uma geometria em linhas (COV entre 22 e 67%).

Nas relações entre parâmetros agronômicos e índices vegetativos, foi observado que o NDVI apresenta menor dispersão dos pontos para os três solos analisados, o índice que melhor estima o IAF.

Quanto ao heliotropismo, apesar de haver alteração do ângulo de inclinação das folhas durante o dia, a arquitetura da planta permanece a mesma.

A metodologia utilizada mostrou-se adequada para realização dos objetivos propostos, mas em experimentos futuros certos procedimentos serão mais adequados:

Se possível, a utilização de um mastro mais alto. Assim, o FOV do radiômetro seria maior e não seriam necessárias muitas repetições para uma melhor amostragem de cada canteiro, principalmente quando a cultura apresenta uma geometria em linhas. Gastando-se menos tempo em cada canteiro, ao se fazer as medidas radiométricas, poder-se-ia fazer um maior número de repetições de cada tratamento.

Ao se executar as medições radiométricas, evitar a sequência empregada neste trabalho, ou seja, as medições com visada zenitais de zero e trinta graus no canteiro 9 foram feitas num intervalo de tempo muito próximo, enquanto as medições, nos dois ângulos de visada, para o canteiro 1 tiveram um intervalo de tempo próximo de vinte minutos.

Ao se fazer a simulação dos solos, utilizar solos sobre bandejas fixas, conforme Huete et al. (1985), na última campanha (dia 4-10) os dados agronômicos e espectrais colhidos não foram usados, porque percebeu-se visualmente que no terço central dos canteiros com LR houve influência desse substrato, possivelmente lixiviação de nutrientes, que provocou um senescência tardia das plantas nesses canteiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida Jr, A. **Avaliação de dois modelos de simulação de dosséis agrícolas em trigo.** (Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, defendida em dezembro de 1993.
- Antunes, M.A.M. **Aplicação dos modelos de reflectância SUITS e SAIL, no estudo do comportamento espectral da soja (*Glycine max* (L.) Merrill).** (Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, defendida em março 1992.
- Baret, F. Guyot, G., and Major, D. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In: IGARSS'89, Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, Canada, July 10-14, 1989. **Remote Sensing: An economic tool for the nineties.** IEEE, 1989, v. 3, p. 1195-1197.
- Baret, F.; Guyot, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI e APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, 35(2-3): 161-173, 1991.
- Baret, F.; Jacquemoud, S.; Hanocq, J.F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, 7(2):65-82, 1993.
- Bernardo, S. **Manual de Irrigação.** Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 5. ed., 1989. 596p.
- Bunnik, N.J.J. **The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relations with their morphological and optical properties.** (Thesis). Agricultural University of Wageningen, Wageningen, 1978. 175p
- Chen, C. S.; Tardin, A.T.; Batista, G.T. **Índices vegetativos e suas aplicações na agricultura.** São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, , 1986. 24p. (INPE- 3912-MD/030).
- 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, 1982.
- Diner, D.J.; Bruegge, C.J.; Martonchik, J.V.; Ackerman, T.P. et al. MISR: A multiangle Imaging SpectroRadiometer for Geophysical and Climatological Research from Eos. **IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing**, 27(2): 200-214, 1989.
- Ehleringer, J. ; Forseth, I. Solar tracking by plants. **Science**, 210 (4474): 1094-1098, 1980.
- Fageria, N.K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília, D.F. EMBRAPA, 1989, 425p.
- Formaggio, A.R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto do trigo e feijão**. (Tese de Doutorado) - Piracicaba, ESALQ/USP, 1989. 161p.
- Gausman, H.W., Rodriguez, R.R.; Richardson A.J. Infinitive reflectance of dead compared with live vegetation. **Agronomy Journal**, 68(2): 295-296, 1976.
- Geophysical Environmental Research Corp(GER). Mark V Dual Field of View IRIS Manual. New York. 147p. s.d.
- Ghizoni, C.C.; Yiyuan, C. The China-Brasil Earth Resources Satellite (CBERS) Program. In: International Symposium on Primary Data Acquisition (ISPRS), Manaus, AM. **Proceedings Manaus, AM**, 1990, v.28, p.119-128.
- Goetz, A.F.H.; Herring M. The high resolution imaging spectrometer (HIRIS) for Eos. **IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing**, 27 (2): 136-144, 1989.
- Holben, B.N.; Tucker, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 46(5):651-656,1980.
- Huete, A.R.; Jackson, R.D.; Post, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, 17(1): 37-53 ,1985.
- Holben, B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11): 1417-1434, 1986.

- Huete, A.R. Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy. **Agronomy Journal**, 79 (1):61-68, 1987.
- Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25 (3): 295-309. 1988.
- Jackson, R.D.; Reginato, R.J.; Pinter Jr., Idso, S.B. Plant canopy information extracyion from composite scene reflectance of row crops. **Applied Optics**, 18(22): 3775-3782.1979a.
- Jackson, R.D.; Pinter Jr, P.J.; Idso, S.B.; Reginato, R.J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. **Applied Optics**, 18(22): 3730-3731, 1979b.
- Jackson, R.D.; Pinter, P. J.; Reginato, R.J.; Idso, S.B. **Hand-held radiometry**. Oakland, C.A. 1980. 66p.Agricultural Reviews and Manuals W-19. USDA. Sciense and Education Administration.
- Jackson, R.D.; Pinter Jr., P.J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, 20(1):43-56,1986.
- Jackson, R.D.; Teillet, P.M. ; Slater, P.N.; Fedosejevs, G.; Jasinski, M.F.; Aase, J.K.; Moran, M.S.Bidirecional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. **Remote Sensing of Environment**, 32(1):189-202,1990.
- Kimes, D.S.; Markham, B.L.; Tucker, C.J.; McMurtrey III, J.E. Temporal relationship between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. **Remote Sensing of Environment**, 11(5): 401-411,1981.
- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A. Irradiance measurement erros due to the assumption of a lambertian reference panel . **Remote Sensing of Environment**, 12(2): 141-149.1982.
- Kimes, D.S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. **Applied Optics**, 22(9): 1364-1372, 1983.
- Kimes, D. S. ; Kirchner, J. A. Directional radiometric measurements of row-crop temperatures. **International Journal of Remote Sensing**, 4(2) 299-311. 1983a.

- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A. Diurnal variations of vegetations of vegetation canopy structure. **International Journal of Remote Sensing**, 4(2): 257-271, 1983b.
- Kimes, D.S.; Newcomb, W.W. , Schutt, J.B.; Pinter Jr., P.J.; Jackson, R.D. Directional reflectance factor distributions of a cotton row crop. **International Journal of Remote Sensing**, 5(2), 263-277, 1984a.
- Kimes, D.S.; Holben, B.N.; Tucker, C.J.; Newcomb, W.W. Optical directional view angles for remote sensing missions. **International Journal of Remote Sensing**, 5(6):887-908. 1984b.
- Kollenkark, J.C.; Vanderbilt, V.C.; Daughtry, C.S.T.; Bauer, M.E. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. **Applied Optics**, 21(7): 1179-1184, 1982.
- Lord, D.; Desjardins, R.L.; Dubé, P.A. Sun-angle effects on the red and near infrared reflectances of five different crop canopies. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 14(1):46-55, 1988.
- Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, 8(12): 1807-1827, 1987.
- 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. 52p. (NBS Monograph 160)
- Pearson, R.L.; Miller, L.D. Retome mapping on standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie. In: International Symposium on Remote Sensing of Enviroment, 8., Ann Arbor, MI. 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, 1972, v.2, p.1355-1381.
- Pinter Jr., P.J.; Jackson, R.D.; Idso, S.B., Reginato, R.J. Diurnal patterns of wheat spectral reflectances. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 21(2): 156-163, 1983.

- Ranson, K.J.; Vanderbilt V.C.; Biehl, L.L.; Robinson, B. F.; Bauer, M. E. Soybean canopy as a function of view and illumination geometry. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15., Ann Arbor, MI. 1972. **Proceedings Ann Arbor, MI, 1981, v.2, p853-865.**
- Richardson, A.J., Wiegand, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(12): 1541-1552. 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. 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.
- Rouse, J.W.; Hass, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W.; Halan, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation.** Final Report, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 1974. 371p.
- Salomonson, V.V.; Barnes, W.L.; Maymon, P.W., Montgomery, Ostron, H. MODIS: Advanced facility instrument for studies of the earth as a system. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 27(2):145-153, 1989.
- Schnetzler, C.C. On the use of off-nadir pointing for increased temporal resolution of earth observing satellite systems (Greenbelt, MD).NASA. (Technical Memorandum 82139), 1981.
- Schutt, J.B.; Kimes, D.S Newcomb, W.W. Effect on heliotropism on the bidirectional reflectance of irrigated cotton. **International Journal of Remote Sensing**, 17(1): 13-25. 1985.
- Shell, G.S.G.; Lang, A.R.G.; Sale, P.J.M. Quantitative measures of leaf orientation and heliotropic response in sunflower, bean, pepper, pepper and cucumber. **Agricultural Meteorology**, 13(1):25-37. 1974.

- Steffen, C.A.; Gama, F.F.; Novo, E.M.L.M. **Teste operacional de aquisição de dados aerotransportado - SADA o experimento de Barra Bonita**. São José dos Campos, INPE, 1992. (INPE- 5451-NTE/305).
- Steffen C.A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba 10-14, 1993. Tutorial 2, São. José. Campos, INPE, 1993, 7p.
- Staenz, K; Ahern F.J.; Brown, R.J. The influence of illumination and viewing geometry on the reflectance factor of agricultural targets. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15., 1981. Ann Arbor, MI. 1981 **Proceedings**. Ann Arbor, MI, 1981 p.867-875.
- Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8(2): 127-150, 1979.
- Universidade de São Paulo. Instituto Astronômico e Geofísico. **Anuário Astronômico 1993**. USP, 1993. 206p.
- Vanderbilt, V.C.; Kollenkark, J.C.; Biehl, L.L.; Robinson, B.F.; Bauer, M.E.; Ranson, K.J. Diurnal changes in reflectance factor due to sun-row directions interactions. In: International Colloquium on spectral signatures of objects in Remote Sensing , Avignon, Montfavet, INRA, 1981., p.449-508.
- Verdade, F.C.; Hungria, L.F.; Russo, R.; Nascimento, A.C.; Grottmann, F.; Penna Medina, H. Solos da Bacia do Taubaté (Vale do Paraíba). **Bragantia**. 20(4):1-43, 1961.
- Wardley, N.W. Vegetation index variability as a function of viewing geometry. **International Journal of Remote Sensing**, 5(2): 861-870. 1984
- Wiegand, C.L.; Richardson, A. J.; Escobar, D.E.; Gerbermann. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, 35(2):105-119. 1991.