



AUTORES AUTHORS	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS SENSORIAMENTO REMOTO, ESPECTROSCOPIA DE CAMPO, TM/LANDSAT-5, ÍNDICES DE VEGETAÇÃO, FEIJÃO, TRIGO		AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY Luiz Gylvan Meira Filho Diretor Sensor. Remoto	
	AUTOR/RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR Antonio Roberto Formaggio		DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION ☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED	
CDU/UDC 528.711.7:63		REVISADA POR / REVISED BY Maurício Alves Moreira		DATA / DATE Maio 1990
TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-5125-RPE/630		ORIGEM ORIGIN DPA	
	CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DE CULTURAS E RENDIMENTO AGRÍCOLA		PROJETO PROJECT SIAG	
AUTORES/AUTHORSHIP	Antonio Roberto Formaggio José Carlos Neves Epiphanyo		Nº DE PAG. NO OF PAGES 178	
			ULTIMA PAG. LAST PAGE 167	
		VERSÃO VERSION		Nº DE MAPAS NO OF MAPS
RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES Este relatório descreve algumas atividades realizadas dentro do Convênio INPE/FIBGE. Trata-se de vários trabalhos conduzidos tendo por base dados coletados em duas missões de campo (1986 e 1987). É apresentada uma ampla revisão de literatura sobre sensoriamento remoto aplicado à área agrícola, bem como descrição de estudos de radiometria e aplicação de dados orbitais TM/Landsat para as culturas de trigo e feijão irrigados.				
OBSERVAÇÕES / REMARKS Relatório Final de atividade junto ao Convênio INPE/FIBGE (1989).				

CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DE CULTURAS E RENDIMENTO AGRÍCOLA

ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO
JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO

Relatório final de atividade junto ao projeto SIAG
desenvolvido entre o INPE e a FIBGE

Instituto de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos, maio de 1990

SUMÁRIO

Pág.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Contexto teórico do sensoriamento remoto agrícola.....	5
2.2. Propriedades refletivas da vegetação.....	12
2.2.1. Folhas.....	12
2.2.2. Dosséis.....	17
2.3. Indicadores Espectrais Versus Parâmetros Agronômicos.....	19
2.4. Modelos de reflectância de dossel.....	53
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS	60
3.1. Introdução.....	60
3.2. Descrição geral das áreas de estudo.....	61
3.3. Seleção de áreas/acompanhamento das culturas.....	63
3.4. Coleta de parâmetros agronômicos.....	66
3.5. Aquisição dos parâmetros espectrais.....	71
3.5.1. Dados do TM/Landsat-5.....	71
3.5.2. Dados de espectroscopia de campo.....	82
3.5.3. Geração dos índices de vegetação.....	89
3.6. Análises dos dados.....	91
CAPÍTULO 4 - RADIOMETRIA DE CAMPO NA AVALIAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E AGRONÔMICAS.....	93
4.1. Introdução.....	93
4.2. Resultados e discussão.....	94
CAPÍTULO 5 - DADOS DE SATÉLITE NA AVALIAÇÃO DE RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E AGRONÔMICAS (I).....	104
5.1. Introdução.....	104
5.2. Resultados e discussão.....	106
5.3. Conclusões.....	111
CAPÍTULO 6 - DADOS DE SATÉLITE NA AVALIAÇÃO DE RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E AGRONÔMICAS (II).....	112
6.1. Introdução.....	112
6.2. Os índices "Razão" e "PVI".....	113
6.3. Resultados e discussão.....	118
6.4. Conclusões.....	127
CAPÍTULO 7 - IDENTIFICAÇÃO DO SURGIMENTO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL TÍPICO DE VEGETAÇÃO EM IMAGENS DE SATÉLITE.....	129
7.1. Introdução.....	129
7.2. Material e métodos.....	130
7.3. Resultados e discussão.....	131
7.4. Conclusões.....	140

CAPÍTULO 8 - DADOS DE SATÉLITE NA DISCRIMINAÇÃO DE TRIGO E DE FEIJÃO.....	141
8.1. Introdução.....	141
8.2. Material e métodos.....	143
8.3. Resultados e discussão.....	144
8.4. Conclusões.....	149
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	150
AGRADECIMENTOS.....	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154

LISTA DE FIGURAS

Pág.

- Figura 2.1 - Aspectos geométricos da detecção da radiação magnética com um sensor remoto aerotransportado (Adaptado de BUNNIK, 1978).....8
- Figura 2.2 - Detecção da radiância do dossel de uma cultura sob um ângulo zenital de visada θ , com um ângulo sólido W_θ (Adaptado de BUNNIK, 1978).....11
- Figura 2.3- Estrutura morfológica de uma folha verde normal. (Adaptado de BUNNIK, 1978).....13
- Figura 2.4 - Principais características da resposta espectral de folhas verdes de plantas (HOFFER, 1978).....14
- Figura 2.5 - Reflectância de diferentes números de camadas foliares de algodão sobrepostas (ALLEN e RICHARDSON, 1968).....16
- Figura 2.6- Ilustração esquemática das três grandes fases do ciclo fenológico de uma cultura agrícola, quanto aos principais componentes do sistema a influenciar na resposta espectral dos dosséis.....23
- Figura 2.7- Reflectância bidirecional de dosséis vegetais simulados para um solo claro (a), e para um solo escuro (b), para as bandas verde, vermelha e infravermelha (COLWELL, 1974b).....27
- Figura 2.8- Fatores de reflectância para a alfafa, obtidos a nadir nas bandas TM3 (a) e TM4 (b), como função do ângulo zenital solar. Os erros de estimativa (2 desvios-padrão) são indicados pelas barras em cada ponto plotado (Adaptado de KIRCHNER et al., 1982).....31
- Figura 2.9- Perfis temporais do IAF para a cultura do trigo em (a) duas datas de plantio diferentes (adaptado de ASRAR et al., 1985); (b) três diferentes anos agrícolas, cultivares e densidades de plantio (Adaptado de AASE, 1978).....37

- Figura 2.10- Relações entre a reflectância de dossel (cultura do milho e o índice de área foliar, para as seis bandas refletivas do TM/Landsat-5 (Adaptado de GARDNER, 1983).....38
- Figura 2.11- Esboço simplificado do efeito de camadas foliares múltiplas na reflectância de dosséis vegetais; onde I=energia incidente; T=energia transmitida; R= energia refletida (Adaptado de HOFFER, 1978).....40
- Figura 2.12- Relações entre o IAF e as combinações espectrais Razão IVP/V e Diferença Normalizada para a soja (HOLBEN et al., 1980).....41
- Figura 2.13- Relações entre a DN e o IAF para as fases de crescimento (x---x) e de senescência (●---●) do trigo (ASRAR et al., 1984).....43
- Figura 2.14- Relações entre as variáveis COV, para a soja, e (a) a Razão IVP/V; e (b) o índice de Área Foliar (Adaptado de HOLBEN et al., 1980). Relações entre a COV e a Diferença Normalizada para (c) soja e (d) milho (Adaptado de TUCKER et al., 1979). As setas em (a), (c) e (d) indicam o "fenômeno de trajetória" dos dados ao longo dos respectivos ciclos agrícolas.....45
- Figura 2.15- Efeitos do solo, como superfície de fundo da cultura de soja, nas relações da Porcentagem de Cobertura (COV) com três variáveis espectrais: (a) fator de reflectância no vermelho; (b) fator de reflectância no infravermelho próximo; e (c) razão IVP/V (Adaptado de KOLLENKARK et al., 1982b).....47
- Figura 2.16- Relações entre a Porcentagem de Cobertura (algodão) e a reflectância no vermelho (a) e no infravermelho próximo (b) para cinco solos diferentes: (a) "Superstition sand" (seco); (b) "Avondale loam" (seco); (c) "Whitehouse-B SCL" (seco); (d) "Cloversprings loam" (seco); (e) "Cloversprings loam" (úmido) (HUETE et al., 1985).....48
- Figura 2.17- Padrões de comportamento da Fitomassa ao longo do ciclo agrícola para: (a) soja (KOLLENKARK et al., 1982b); e para (b) milho sob diferentes tratamentos de adubação N (WALBURG et al., 1982).....49
- Figura 2.18- índice de Vegetação Diferença Normalizada versus Matéria Seca Total para seis densidades de plantio do trigo. A linha tracejada mostra o momento em que se atingiu a máxima Porcentagem de Cobertura do terreno em cada densidade de plantio (AASE e SIDDOWAY, 1981).....50

Figura 2.19- Relações entre a Diferença Normalizada e (a) Biomassa Fresca de soja; (b) Biomassa Fresca de milho; (c) Biomassa Seca de soja; e (d) Biomassa Seca de milho. As setas indicam o "fenômeno de trajetória" dos dados (Adaptado de TUCKER et al., 1979).....	52
Figura 2.20- Configuração do sistema completo de Sensoriamento Remoto (Adaptado de GOEL, 1988).....	55
Figura 2.21- Representação esquemática do problema direto, do problema inverso e da estimação de parâmetros de dossel a partir de dados de reflectância (GOEL, 1988).....	56
Figura 3.1- Localização da área de estudo a NW do Estado de São Paulo, e ilustração da imagem TM/Landsat da órbita 221/ponto 74.....	62
Figura 3.2- Diagrama de dispersão e equação de regressão para as variáveis peso das folhas versus área foliar para o feijão (para os dados de 1987).....	68
Figura 3.3- Representação esquemática de uma imagem digital, das diferentes bandas TM, dos pixels, das tonalidades para os alvos solo/vegetação e dos correspondentes níveis de cinza.....	74
Figura 3.4- Aspectos geométricos envolvidos na medição da radiação (L). Os subscritos i e r referem-se aos feixes incidentes e refletidos, respectivamente. Os ângulos envolvidos são o azimutal (ϕ) e o zenital (θ) (NICODEMUS et al., 1977).....	86
Figuras 4.1.1 a 4.1.21- Diagramas de dispersão ilustrando as tendências gerais das relações entre 7 variáveis espectrais da espectroscopia de campo (as 4 bandas simuladas TM1, TM2, TM3 e TM4 e os índices de vegetação RRS, RND e RTV) e as variáveis agrônômicas IAF, FIT e COV, para as culturas do trigo e do feijão conjuntamente.....	96
Figura 4.2- Ilustração de algumas possibilidades de amostragem quando se utiliza espectroscopia de campo.....	103
Figura 5.1- Diagramas de dispersão e ajustes entre as variáveis reflectância TM3 x IAF (a) e TM4 x IAF (b), para áreas com cultura de feijão.....	108
Figura 5.2- Comportamento das principais variáveis ao longo do ciclo do feijão: (a) IAF, FIT e COV; (b) reflectâncias TM3, TM4 e TM5; e (c) índices de vegetação RRS, RND e RTV.....	110
Figura 6.1- Diagrama da Linha de Solos e dos pontos de vegetação para o cálculo do PVI.....	115

Figura 6.2- Dinâmica das variáveis IAF e COV ao longos dos ciclos das culturas de trigo (a) e de feijão (b). FONTE: FORMAGGIO (1989).....	116
Figura 6.3- Relação entre as bandas TM3 e TM4 para os solos...	118
Figura 6.4- Relação entre as bandas TM3 e TM4 para as culturas.....	119
Figura 6.5- Relação entre as bandas TM3 e TM4 para os solos e as culturas conjuntamente.....	119
Figura 6.6- Relação entre a banda TM4 e a porcentagem de cobertura do solo.....	120
Figura 6.7- Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a porcentagem de cobertura do solo.....	121
Figura 6.8- Relação entre a razão infravermelho/vermelho e a porcentagem de cobertura do solo.....	121
Figura 6.9- Relação entre porcentagem de cobertura do solo e índice de área foliar (IAF).....	122
Figura 6.10- Relação entre a banda TM4 e o índice de área foliar (IAF).....	123
Figura 6.11- Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e o índice de área foliar (IAF).....	124
Figura 6.12- Relação entre a razão infravermelho/vermelho e o índice de área foliar (IAF).	124
Figura 6.13- Relação entre a banda TM4 e a densidade de clorofila.....	126
Figura 6.14- Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a densidade de clorofila.....	126
Figura 6.15- Relação entre a razão infravermelho/vermelho e a densidade de clorofila.....	127
Figura 7.1- Comportamento espectral dos três principais solos da região de estudo. LR = Latossolos Roxo; LE = Latossolo Vermelho Escuro; LV = Latossolo Vermelho Amarelo.....	132
Figura 7.2- Comportamento espectral da área F10 nas seis bandas TM/Landsat-5 nas passagens disponíveis.....	134

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1- Coeficientes de determinação (r^2) para algumas variáveis agronômicas em função das reflectâncias no vermelho (600-700 nm) e no infravermelho (800-1100 nm) e da Razão IVP/V, para um solo escuro ("Chalmers") e para um solo claro ("Russell") (Adaptado de KOLLENKARK et al., 1982b).....	46
Tabela 3.1- Datas das passagens Landsat, datas das campanhas de campo e % de cobertura de nuvens (1987).....	65
Tabela 3.2- Bandas do sensor TM/Landsat-5 e suas principais aplicações potenciais.....	72
Tabela 3.3 - Agrupamento das áreas de trigo e de feijão por grupos de idade e dados gerais sobre cada área, para a campanha de 1987.....	76
Tabela 3.4- Valores dinâmicos de pós-calibração dos dados TM processados após 15 de janeiro de 1984.....	81
Tabela 3.5- Valores de distância Terra-Sol, cosseno do ângulo de elevação solar e irradiância solar para as duas passagens TM/Landsat utilizadas.....	82
Tabela 4.1- Coeficientes de correlação pelos modelos linear, logarítmico e exponencial para os diversos pares formados pelas variáveis agronômicas (IAF, FIT e COV) e variáveis espectrais (4 bandas TM, simuladas a partir de dados de espectroscopia de campo, e 3 índices espectrais de vegetação, simulados com aquelas bandas), considerando os dados de trigo e feijão conjuntamente.....	95
TABELA 5.1- Coeficientes de correlação e regressões pelos modelos linear simples, logarítmico e exponencial para os diversos pares formados pelas 3 variáveis agronômicas e 9 variáveis espectrais estudadas.....	107
Tabela 7.1- Dias após plantio para as áreas de trigo nas diversas passagens do satélite (1986).....	135

Tabela 7.2- Dias após plantio para as áreas de feijão nas diversas passagens do satélite (1986).....	138
---	-----

Tabela 8.1- índice de Eficiência de Aceitação Correta (EAC) para as bandas do TM/Landsat-5 nas três passagens e sob os limiares de percentagem de cobertura do solo e de índice de área foliar estabelecidos.....	145
--	-----

RESUMO

Este relatório descreve algumas atividades realizadas dentro do convênio INPE/FIBGE. Trata-se de vários trabalhos conduzidos tendo por base dados coletados em duas missões de campo (1986 e 1987). É apresentada uma ampla revisão de literatura sobre sensoriamento remoto aplicado à área agrícola, bem como descrição de estudos de radiometria e aplicação de dados orbitais TM/Landsat para as culturas de trigo e feijão irrigados.

ABSTRACT

This work describes some activities developed under the grant INPE/FIBGE. There are some works conducted with the data obtained in two field missions along 1986 and 1987. It is presented an extensive literature review about remote sensing applied to agriculture with the theory involved. Also it is presented the use of radiometry and TM/Landsat data applied to the study of wheat and bean.

**CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DE
CULTURAS E RENDIMENTO AGRÍCOLA**

**ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO
JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO**

**Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE
São José dos Campos, maio de 1990**

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este relatório representa uma das atividades do Projeto SIAG realizado em convênio entre o INPE e a FIBGE.

Uma das vertentes de pesquisa em sensoriamento remoto agrícola no Departamento de Pesquisas e Aplicações de Sensoriamento Remoto do INPE (DPA/INPE) é a que tem como motivação os aspectos de produtividade agrícola.

Para a realização de pesquisa científica nesse campo, o DPA/INPE tem contado com o apoio de diversas instituições sob a forma de convênios ou de financiamentos.

Em 1986 foi obtido um financiamento junto à FAPESP para realizar uma pesquisa científica na região de Barretos/ Guairá-SP. A finalidade foi estudar parâmetros agronômicos de trigo e de feijão e parâmetros espectrais em imagens de satélite. Esse estudo permitiu que fossem obtidos conhecimentos significativos quanto à interrelação entre aqueles parâmetros.

Numa segunda etapa, contando com financiamentos da EMBRAPA, nessa mesma área de estudo, em 1987 foi implementado o uso de radiometria de campo e ampliado o número de parâmetros agronômicos e espectrais estudados.

Nessas duas etapas de estudo com sensoriamento remoto foi levantado um volume significativo de dados, muitos dos quais não puderam ser adequadamente explorados. Dentro do projeto SIAG foi proposta essa atividade, com o objetivo de explorar melhor parte dos dados coletados naquelas duas campanhas de campo (1986 e 1987).

Assim, esse relatório contém resultados de relações entre vários parâmetros agronômicos e espectrais, além de uma abordagem sobre a definição de bandas mais adequadas à diferenciação entre trigo e feijão.

O conhecimento dessas relações entre parâmetros agronômicos e espectrais torna-se importante na medida em que podem vir a incorporar sistemas de previsão de desenvolvimento agrícola como produtividade, vigor, evapotranspiração, biomassa, etc. Grande parte dos trabalhos desenvolvidos até o presente são realizados a nível de estações experimentais com radiometria de campo, onde o nível de controle é muito maior. Um aspecto importante desse trabalho é o fato de tratar com dados obtidos em campos comerciais de cultivo. Embora isso ocasione menor controle das variáveis, permite que se possa trabalhar com os dados de satélite.

A literatura envolvendo o comportamento espectral de alvos agrícolas é extensa em número e espaçada no tempo. Abrange desde estudos teóricos de reflexão e absorção, frutos de interações da radiação eletromagnética com pigmentos e estrutura interna das folhas, até avaliações de parâmetros agronômicos a partir de dados de sensoriamento remoto. Tem-se observado uma relativa carência de trabalhos de revisão que ordenam toda essa literatura. Os poucos trabalhos dessa natureza acham-se em periódicos de acesso limitado no Brasil, de modo que o pesquisador brasileiro ressenete-se dessa lacuna.

Como qualquer progresso nessa área do conhecimento pressupõe o domínio dessa vasta literatura, achou-se que nessa atividade junto ao IBGE seria oportuno tentar oferecer uma revisão abrangente sobre os fundamentos do uso do sensoriamento remoto em agricultura. Assim, a Revisão de Literatura (Capítulo 2) aqui apresentada cumpre não apenas a finalidade de fornecer os subsídios necessários à discussão dos resultados apresentados, como também fornecer, de uma forma sistematizada, os pressupostos básicos do sensoriamento remoto agrícola.

O capítulo seguinte (Cap. 3) apresenta os métodos empregados na coleta, redução e tratamento dos vários tipos de dados que serviram de base para esta pesquisa científica. Nesse capítulo expõe-se a metodologia de uma maneira mais generalizada tratando principalmente sobre: a maneira de transformação de números digitais em reflectâncias; os cuidados nas medições de espectroscopia de campo; e as análises dos dados.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados dos relacionamentos entre os vários parâmetros agrônômicos e os vários parâmetros espectrais obtidos por radiometria "in situ".

Os mesmos tipos de relacionamentos, porém para dados espectrais do TM/Landsat-5, são abordados no Capítulo 5.

Os índices espectrais de vegetação mais utilizados têm sido a Razão Simples e a Diferença Normalizada. Assim, no Capítulo 6 relatam-se os resultados de uma pesquisa em um índice do tipo ortogonal é introduzido --- o índice Perpendicular de Vegetação (PVI).

As culturas anuais apresentam dinâmica muito rápida de variação de características fenológicas. Isto resulta em redução na parcela útil do ciclo destas culturas para a prática do sensoriamento remoto. Assim, no Capítulo 7 são abordados aspectos do surgimento da tipicidade de vegetação verde vigorosa quando se conta com dados espectrais TM/Landsat.

No Capítulo 8 são abordados aspectos relacionados à discriminabilidade entre culturas agrícolas, a partir de dados de satélite.

Por fim, no Capítulo 9 são indicadas as principais conclusões propiciadas pela execução das várias pesquisas descritas neste Relatório. Além disso, são feitas sugestões para a realização de pesquisas visando dar continuidade à linha de trabalho em foco.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contexto teórico do sensoriamento remoto agrícola

O Sensoriamento Remoto, nos moldes como é concebido atualmente pela Sociedade Americana de Fotogrametria, é definido como a obtenção de informações sobre propriedades de objetos ou de fenômenos através de dispositivos de registro que não estejam em contato físico com tais objetos ou fenômenos em estudo. Consiste na utilização, à distância (a partir de aviões, espaçonaves ou navios, p.ex.), de equipamentos capazes de coletar informações ambientais, tais como medições de campos magnéticos, radiação eletromagnética (REM) ou ainda energia acústica (REEVES, 1975).

Conforme KOFFLER (1982), o termo "sensoriamento remoto" resultou da evolução da habilidade do homem de observar, em regiões do espectro eletromagnético, além da faixa da visão humana e da sensibilidade fotográfica, através de imageadores no infravermelho termal, nas microondas e outros. Completando-se o quadro com o advento das plataformas espaciais, o "sensoriamento remoto" surge como expressão mais abrangente do que o tradicional "levantamento aerofotográfico". O autor frisa ainda que começa-se a usar o termo "imagem" em substituição a "fotografia" e "análise de imagens" ao invés de "fotointerpretação".

O sensoriamento na região espectral compreendida entre o visível e o infravermelho médio (400 a 3000 nm) é baseado em medições remotas da radiação eletromagnética (REM) refletida pelos alvos da superfície terrestre. Assim, as informações coletadas são interpretadas a partir do pressuposto de que diferentes alvos apresentam comportamentos espectrais característicos.

Considera-se essencial para um uso otimizado das técnicas de sensoriamento remoto que se tenha um bom entendimento da maneira pela qual a REM é coletada, como este processo depende das propriedades físicas do objeto refletor e da radiação incidente, sem desconsiderar a influência da atmosfera terrestre, do ambiente e da geometria de observação.

Suponha-se, então, que a radiação refletida por uma cultura esteja sendo detectada por um sensor remoto instalado num avião ou num satélite. Dado que normalmente a detecção ocorre dentro dos limites de um determinado ângulo sólido, sob um ângulo variável de observação, considera-se que a radiância seja a unidade física quantificativa adequada.

A radiância espectral é definida como sendo a potência radiativa emanada por uma unidade de área refletiva, projetada na direção de observação por unidade de ângulo sólido e por unidade de comprimento de onda; assim, a radiância geralmente é expressa em $\text{mW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$.

BUNNIK (1978) explica que, sendo uma função da geometria de observação e das propriedades de espalhamento e de absorção da atmosfera terrestre (a qual atua como um meio de transferência entre a cultura sob observação e o sensor), a radiância espectral detectada é dada pela equação (1).

A Figura 2.1 ilustra os vários aspectos de geometria da reflexão bidirecional da superfície terrestre, quando se utiliza um sistema imageador aerotransportado em sensoriamento remoto.

$$L_A(\theta, \phi, A, h, t) = L_x(\theta, \phi, A, t) \cdot T(\theta, A, h, t) + L_p(\theta, \phi, A, h, t) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

L_A = radiância aparente detectada pelo sensor remoto;
 L_x = radiância intrínseca da cultura, no nível local;
 T = transmitância através da atmosfera;
 L_p = radiância atmosférica de percurso;
 A = parâmetro geral representando o estado da atmosfera;
 h = distância entre o sensor e a superfície terrestre;
 θ = ângulo zenital de observação;
 ϕ = ângulo zenital solar;
 α = ângulo azimutal entre a direção de observação e a posição do Sol;
 λ = comprimento de onda;
 t = tempo.

Sabe-se que a radiância medida por um sensor remoto difere da radiância intrínseca do objeto em estudo, devido a efeitos de absorção e de espalhamento causados por aerossóis, gases e moléculas d'água da atmosfera, confundindo as características espectrais dos alvos presentes numa imagem digital orbital, por exemplo.

O espalhamento atmosférico possui um efeito aditivo sobre os valores de radiância que chegam ao sensor, obedecendo a uma relação em que o efeito é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (princípio do espalhamento de Rayleigh). Desta maneira, é explicável o porquê de faixas espectrais de menores comprimentos de onda de um imageador multiespectral (banda 1 do TM/Landsat, p.ex.) serem bem mais afetadas que as de bandas correspondentes a comprimentos de onda maiores.

Quanto ao efeito de absorção atmosférica, este reflete-se na subtração de valores de brilho para os comprimentos de onda maiores (infravermelho) por causa da absorção da energia eletromagnética pelas moléculas d'água, nestas regiões do espectro.

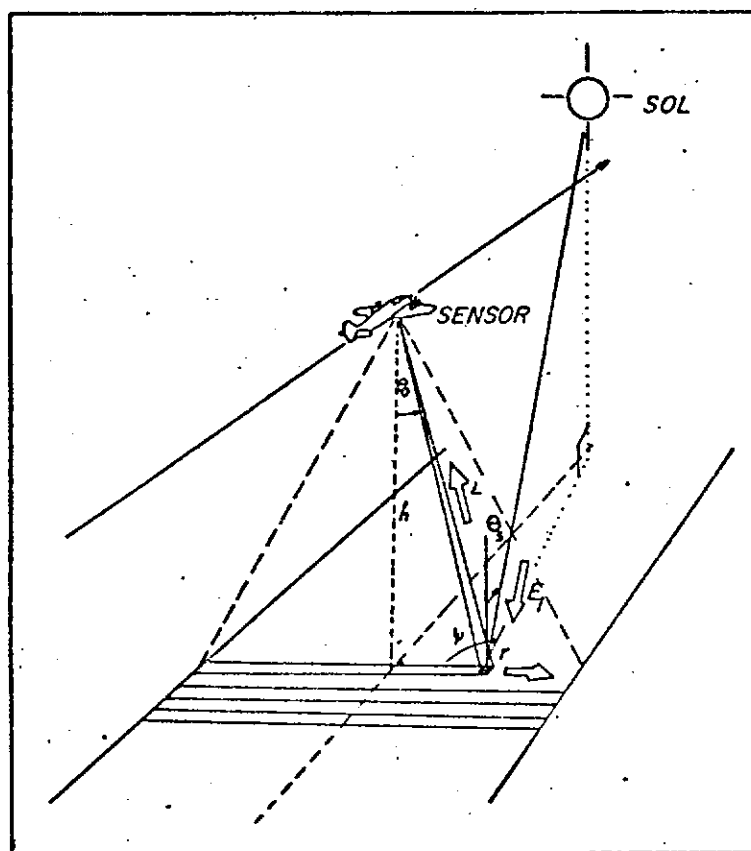


Figura 2.1 - Aspectos geométricos da detecção da radiação magnética com um sensor remoto aerotransportado (Adaptado de BUNNIK, 1978).

É reconhecidamente bastante difícil a coleta dos parâmetros que caracterizam o estado da atmosfera sobre uma determinada área, num determinado momento, de forma rigorosamente exata.

Tratando-se de sensoriamento remoto orbital, estes parâmetros atmosféricos deveriam, a rigor, ser coletados para uma determinada área de interesse na mesma hora em que o satélite adquire a cena, através de equipamentos de radiossondagem. Então, estes dados seriam utilizados em modelos numéricos computacionais de correção atmosférica como o LOWTRAN VI (KNEIZYS et al., 1983), por exemplo. Tais procedimentos são considerados custosos e estão ainda em desenvolvimento.

Desta maneira, tentando contornar estas dificuldades de forma satisfatória, algumas técnicas operacionais semi-empíricas de correção atmosférica sobre dados sensoriados orbitalmente foram desenvolvidas, entre as quais tem sido muito utilizado o procedimento descrito por SCHOWENGERDT (1983).

Neste método de correção atmosférica, a água límpida é tomada como referência, dado que sua reflectância é praticamente zero na região do infravermelho refletido. Como afirma MENEZES (1986), ajustes para absorções atmosféricas são difíceis de se determinar porque a atmosfera é muito variável na quantidade de vapor d'água, tamanho das moléculas, etc. O que se faz, então, é tentar eliminar o efeito da radiância adicionada pelo espalhamento atmosférico. Para isto, basta determinar os valores digitais ou níveis de cinza dos alvos que deveriam, por princípio, ter valores zero de reflectância e, na imagem em estudo, são maiores que zero devido à contribuição atmosférica. Em seguida, estes valores são subtraídos para todos os pixels da referida imagem, em todas as bandas.

Quando se necessita de uma análise quantitativa dos dados sensoriados remotamente, a interferência atmosférica usualmente não deve ser negligenciada, se se deseja exatidão (MALILA, 1972).

As informações deduzidas a partir da radiância medida, conforme expõe BUNNIK (1978), são dadas pela radiância intrínseca da superfície (L_x). Esta radiância depende da radiância global incidente e das propriedades de reflectância do objeto em questão. Considerando uma superfície de espalhamento difuso ideal (lambertiana), a seguinte definição pode ser introduzida:

$$L_x(\theta_o, \theta_s, \psi, A, \lambda, t) = 1/\pi \cdot r(\theta_o, \theta_s, \psi, \lambda) \cdot E(\theta_s, A, \lambda, t) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

r = reflectância direcional espectral;

E = irradiância espectral (global) hemisférica;

$L_x, \theta_o, \theta_s, \psi, A, \lambda, t$ = definidos após a Eq. 1.

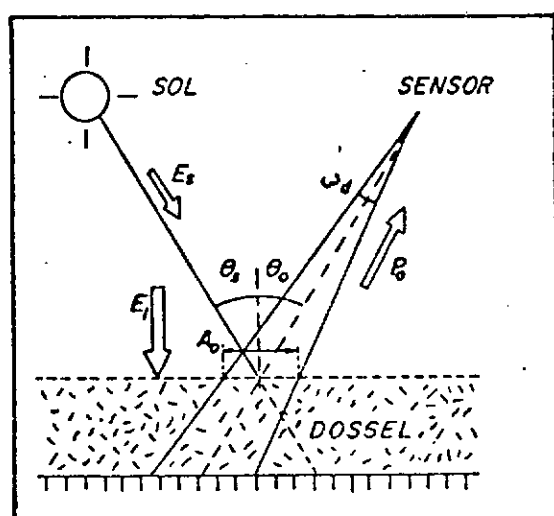
A irradiância é constituída de dois componentes: um que emana da radiância solar direta e outro dado pela radiação difusa do céu. A irradiância é determinada principalmente pelo ângulo zenital solar (θ_s), pelas condições meteorológicas, pela distribuição das nuvens, pelo estado da atmosfera e é dependente do comprimento de onda, bem como de variações diurnas.

O coeficiente de reflectância (r) contém a informação espectral real sobre o objeto observado. Sabe-se que, na realidade, os dosséis de vegetação não atuam como refletores lambertianos, uma vez que as reflectâncias das culturas, p.ex., dependem da direção de observação. Além disso, tais reflectâncias variam com o crescimento vegetativo, com os tipos de manejos culturais e com influências ecológicas.

Pode-se considerar que um dossel de vegetação é constituído por elementos de espalhamento muito grandes em comparação com os comprimentos de onda da radiação de interesse, tendo como fundo a superfície do solo. A radiação incidente será espalhada por componentes das plantas, como as folhas, as hastes, as flores, etc. e, desta maneira, uma parte desta radiação espalhada deixará o dossel na direção para cima. Se, como na Figura 2.2, um dossel é observado sob o ângulo zenital θ_o , com um sensor de ângulo sólido de visada ω_o , uma quantidade de potência radiativa $P_o(A_o, \theta_o, \lambda)$, emanando da área A_o atinge a abertura do sistema sensor e é captada pelo detector. Esta potência origina-se das componentes do dossel e da fração do solo vista diretamente pela abertura do sistema sensor.

Assume-se que, na maioria dos casos, as folhas do dossel sejam os elementos refletores dominantes, em comparação com o restante dos componentes da planta. Sob luz solar direta, as folhas irradiadas diretamente ou uma parte delas que estejam na porção mais superficial do dossel e, ainda, no caso de cobertura incompleta do solo, uma parte do solo sob iluminação direta, são observados. Além disso, o campo de visada também é preenchido pelos elementos de folhas e de solos sob sombra.

O perfil do fluxo radiante dentro do dossel é determinado pela distribuição espacial das folhas e pelas suas propriedades de reflectância e de transmitância para a REM, como função do comprimento de onda e, também, da reflectância espectral do solo de fundo. A quantidade de sombra presente dentro do dossel está relacionada ao ângulo solar e à distribuição de orientações das folhas.



Legenda:

E_s =Irradiância difusa;

E_i =Irradiância solar direta;

θ_s =Ângulo zenital solar;

θ_o =Ângulo zenital de observação

A_o =Área visada pelo sensor;

W_d =Ângulo sólido de visada;

P_o =Potência radiativa que atingirá a abertura do sistema sensor.

Figura 2.2 - Detecção da radiação do dossel de uma cultura sob um ângulo zenital de visada θ_o , com um ângulo sólido W_d (Adaptado de BUNNIK, 1978).

O nível de irradiância local em cada componente observado do dossel e no solo depende do perfil do fluxo radiante e da distribuição de sombras dentro do dossel. A quantidade e a localização dos componentes observados do dossel e do solo dependem do ângulo de visada. Quando a visada é perpendicular, a fração do terreno observada será máxima quando a cobertura do solo pelo dossel for inferior a 100%. Sob visada oblíqua, a maior fração de componentes observados serão as camadas superiores do dossel, ficando o solo mais escondido.

Quando são estudadas culturas agrícolas plantadas com estrutura em fileiras, deve ser considerado um fator complicativo adicional. A estrutura em fileiras interfere na maneira como

ocorre a penetração da radiação através do dossel, bem como nas quantidades observadas de folhas, de solos e de sombras.

Desta maneira, verifica-se que são vários os parâmetros importantes para o sensoriamento remoto agrícola e fica claro que as relações entre as propriedades físicas e morfológicas de um dossel agrícola são dinâmicas, não correspondendo de modo único nem simples com uma assinatura espectral estática e imutável.

2.2. Propriedades refletivas da vegetação

2.2.1. Folhas

As folhas são consideradas os elementos dominantes das plantas quanto às influências sobre as propriedades espectrais de dosséis vegetais.

Alguns autores têm publicado excelentes revisões bibliográficas sobre o comportamento espectral de folhas individuais e de dosséis vegetais, entre eles: GATES et al. (1965), KNIPLING (1970), BAUER et al. (1980) e GAUSMAN (1985).

Tratando-se das propriedades de reflectância e de transmitância de folhas individuais, vários estudos têm considerado que este comportamento está relacionado com propriedades físicas das folhas.

O exame da estrutura interna de uma folha normal (Figura 2.3) mostrará que a folha é limitada nas suas superfícies superior (ventral) e inferior (dorsal) pela epiderme. Entre as camadas da epiderme está o mesófilo que, para muitas folhas, pode ser subdividido em dois tipos: o mesófilo paliçádico na parte mais ventral e o mesófilo esponjoso na porção mais dorsal. O

tecido do mesófilo contém os pigmentos que são divididos em plastídeos e em vacúolos dissolvidos no suco celular.

Os plastídeos mais importantes são os cloroplastos verdes, os quais contêm clorofila dentro dos grana. Além dos cloroplastos, estão presentes também os carotenóides, os quais determinam a cor de uma folha na ausência da clorofila. Dentro da estrutura do mesófilo estão presentes cavidades de ar, cheias de vapor saturado de água.

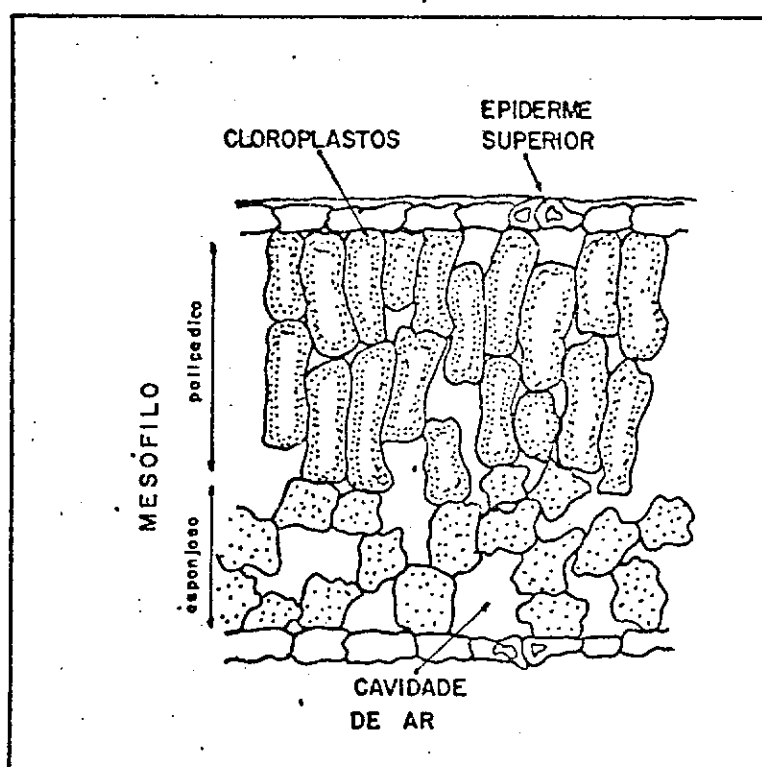


Figura 2.3- Estrutura morfológica de uma folha verde normal.
(Adaptado de BUNNIK, 1978).

Se for considerado o espectro de reflectância de uma folha normal verde no intervalo de 400 a 2600 nm (Figura 2.4), ele pode ser subdividido em três regiões espectrais.

Entre 400 nm (azul) e 700 nm (vermelho), a reflectância é muito baixa. Em 550 nm ocorre um pico (ou seja, uma diminuição relativa de absorção), o qual explica a percepção da cor verde da vegetação; este pico é causado por duas bandas de absorção da

clorofila centradas em aproximadamente 450 nm e em 650 nm (HOFFER, 1978). Os pigmentos carotenos e xantofilas também absorvem energia próximo de 450 nm. Desta maneira, mudanças na pigmentação de uma folha afetarão a forma da curva de reflectância na região entre 400 e 700 nm (HOFFER e JOHANNSEN, 1969).

Na região espectral entre 700 nm e 1400 nm (ou seja, no infravermelho próximo), as folhas verdes saudáveis apresentam altos valores de reflectância (45-50%), alta transmitância (45-50%) e baixa absorptância (menos de 5%), conforme explica HOFFER (1978).

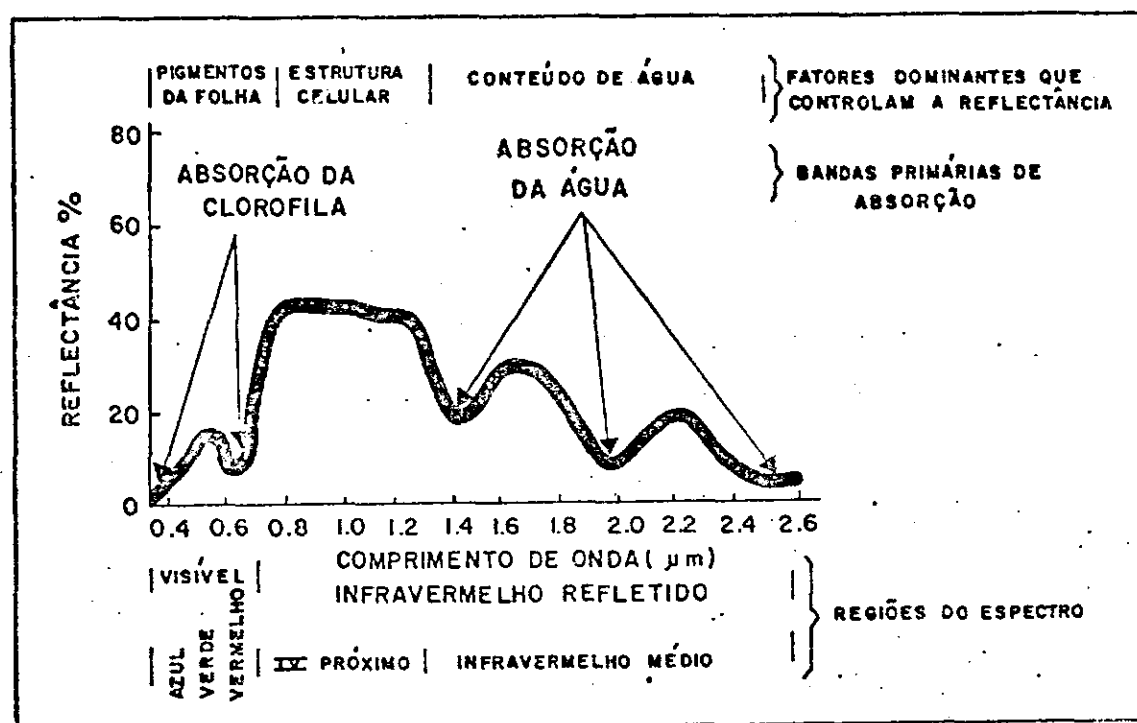


FIGURA 2.4 - Principais características da resposta espectral de folhas verdes de plantas (HOFFER, 1978).

Essa elevada reflexão de energia na região do infravermelho é atribuída por vários autores à estrutura interna das folhas. Trabalhos de GATES et al. (1965), KNIPLING (1970) e BUNNIK (1978), entre outros, atribuem a Willstätter e Stoll (1918) a explicação deste fenômeno. Segundo esses autores, a radiação

solar é difundida e espalhada através da cutícula e epiderme foliar para as células do mesófilo e cavidades de ar no interior da folha. Aí a radiação é novamente espalhada e sofre reflexões e refrações múltiplas devido à diferença de índices de refração entre o ar (1,0) e as paredes celulares hidratadas (1,4). Uma vez que a estrutura interna das folhas geralmente varia entre as diferentes espécies, as diferenças de reflectância são, em geral, maiores no infravermelho do que no visível.

Quando se sobrepõem várias camadas de folhas (Figura 2.5), ocorrem aumentos (em comparação com a reflectância de uma folha individual) nos níveis de reflectância nas porções espectrais do infravermelho próximo até que se atinja um valor estável máximo, denominado de "reflectância infinita", simbolizada por R_{∞} (ALLEN e RICHARDSON, 1968).

Na região do infravermelho médio, como indicam BAUER et al. (1980), a reflectância da vegetação verde é dominada por fortes bandas de absorção pela água, que ocorrem aproximadamente em 1400, 1900 e 2700 nm; portanto, as regiões entre estas bandas de absorção são fortemente influenciadas pelo conteúdo de umidade das folhas. Nesta região espectral, a reflectância foliar é inversamente relacionada com a quantidade total de água presente nas folhas.

As propriedades de reflectância, de transmitância e de absorção pelas folhas dependem da concentração de pigmentos e de água, além da estrutura interna que é função das espécies. Estas entidades fisiológicas e morfológicas dependem do tipo de folha, estágio de maturação e da senescência.

Quanto ao tipo de folha, há significativas diferenças nas características de reflectância, principalmente no infravermelho próximo, de folhas de monocotiledôneas (que possuem o mesófilo foliar indiferenciado) para folhas de dicotiledôneas (que apresentam mesófilos dorsiventrais) (GAUSMAN et al., 1973).

À medida em que as folhas amadurecem, a sua reflectância visível diminui, ao passo que, no infravermelho próximo a

reflectância aumenta. GAUSMAN et al. (1970) atribuíram este efeito a um maior número de espaços intercelulares de ar no mesófilo de folhas maduras, quando comparadas com folhas jovens mais compactas.

A senescência produz um efeito oposto ao da maturação, ou seja, a reflectância no visível aumenta devido à diminuição das clorofilas, enquanto que a reflectância no infravermelho diminui, embora relativamente menos do que o aumento na reflectância visível.

As propriedades ópticas das folhas de plantas são também afetadas por vários tipos de estresses (incluindo deficiências nutricionais, salinidade e danos causados por doenças e insetos), conforme assinala KNIPLING (1970).

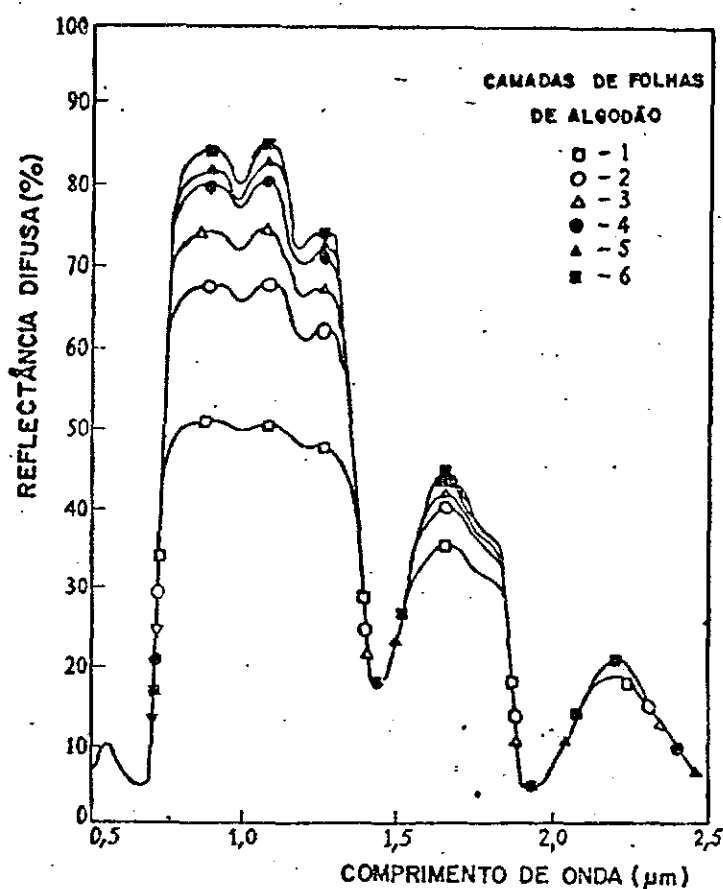


Figura 2.5 - Reflectância de diferentes números de camadas foliares de algodão sobrepostas (ALLEN e RICHARDSON, 1968).

Conforme BAUER et al. (1980) esses estresses são acompanhados, tipicamente, por redução na produção de clorofila, o que causa menor absorção de energia pelas folhas e, portanto, um aumento na reflectância visível. Na porção do infravermelho próximo, a reflectância reduz-se devido àqueles estresses, embora um estresse que cause uma perda de água das folhas deverá resultar em aumentos na reflectância infravermelha. Entretanto, as mudanças na reflectância em função da umidade não são substanciais enquanto o turgor das folhas apresentar valores superiores a 75%.

Deve-se salientar que, nos trabalhos sobre o comportamento espectral das folhas individuais citados até aqui, somente foram consideradas medições de reflectância e transmitância totais.

BREECE e HOLMES (1971) estudaram a distribuição direcional de reflectância e transmitância para folhas de milho e de soja e encontraram que a contribuição especular para a reflectância aumentava com o ângulo de incidência, porém a transmitância foi praticamente lambertiana.

Em síntese, como explicam BAUER et al. (1980), pode-se afirmar que o comportamento óptico das folhas na região visível é determinado pela concentração de clorofila e de outros pigmentos; no infravermelho próximo, é afetado pela estrutura do mesófilo foliar; no infravermelho médio, é dominado pelas propriedades ópticas da água no tecido.

2.2.2. Dosséis

A reunião de todos os componentes da vegetação acima da superfície do solo é denominada dossel vegetal.

Assim, as propriedades de reflectância de folhas individuais são, evidentemente, fundamentais para o entendimento da refletividade de uma planta inteira ou de um dossel vegetal, contudo não se pode extrapolar diretamente, sem modificações, os

dados espectrais de uma folha individual para um dossel. Há diferenças qualitativas e quantitativas nos dois tipos de espectros. Numa base percentual, a reflectância de um dossel é consideravelmente menor do que a de uma folha individual, em função de atenuações gerais da radiação devidas a variações no ângulo de iluminação, na orientação das folhas, nas sombras e nas superfícies-de-fundo não foliares, tais como o solo (KNIPLING, 1970).

Há, então, que se considerar que os dosséis vegetais são mais que simples coleções de folhas, conforme frizam BAUER et al. (1981) e que interações complexas que não são fatores influenciantes (quando espectros de folhas individuais são medidos) devem ser levados em conta no sensoriamento remoto de dosséis que se desenvolvem nas condições de campo. Entre as mais importantes e mais citadas variáveis que influenciam a reflectância dos dosséis estão: o índice de área foliar (IAF), a distribuição de ângulos foliares, a porcentagem de cobertura do solo, a reflectância do solo e as propriedades ópticas das folhas e dos outros componentes dos dosséis. Diferenças nestes parâmetros são causadas por variações em fatores culturais e ambientais, incluindo: data de plantio, cultivar, espaçamentos inter e intra-fileiras, adubação, umidade do solo, entre outros. Os ângulos azimutal e zenital do Sol e de visada também afetam a reflectância medida das culturas. Discussões mais detalhadas sobre estes parâmetros são apresentadas no subcapítulo 2.3 deste trabalho.

KNIPLING (1970) assinala que as diferenças de refletividade que permitem a discriminação de espécies de plantas ou de tipos de vegetação podem ser baseadas nas características de suas folhas e do dossel. As folhas de uma dada espécie tendem a ter algumas características próprias como superfície (típica de cada espécie), espessura, estrutura interna e conteúdo de pigmentos. Similarmente, o dossel, tanto na sua dimensão horizontal quanto na vertical, tende a ter uma estrutura ou geometria característica, que é determinada pelo tamanho, forma e orientação das plantas e de suas folhas, bem como pelas práticas culturais e condições ambientais de crescimento. Conforme conclui

o autor, todos esses fatores influenciam as propriedades ópticas da folha e do dossel, e os padrões de reflectância recebidos pelos sensores remotos representam a integração destes efeitos.

Vários autores têm desenvolvido modelos de reflectância de dossel, tais como SUITS (1970), SMITH e OLIVER (1972) e VERHOEF E BUNNIK (1976), com a finalidade de otimizar o entendimento já adquirido sobre as propriedades espectrais de dosséis vegetais agrícolas. Como afirmam BAUER et al. (1980), os modelos são particularmente úteis para estudar os efeitos de alterações nos valores das variáveis de entrada (ou seja, os parâmetros ópticos, geométricos e direcionais). No subcapítulo 2.4 deste trabalho trata-se com maior detalhamento sobre os modelos de reflectância de dosséis vegetais.

2.3. Indicadores Espectrais Versus Parâmetros Agronômicos

Como descreve JACKSON (1984), desde meados dos anos 70 já eram utilizados radiômetros pequenos, leves e portáteis, os quais poderiam ser carregados por uma pessoa ou montados em veículos, com o principal objetivo de coletar dados espectrais a fim de auxiliar na interpretação de imagens obtidas por satélites.

Pôde-se, então, considerar que havia começado o processo de coletar "in situ" intensivos conjuntos de dados sobre as interações da radiação eletromagnética com solos e com culturas; processo este que, no entender de vários autores, de há muito se fazia necessário.

A elucidação destas complexas interações foi sendo encaminhada através de freqüentes coletas de dados sobre numerosos canteiros experimentais, nos quais as culturas eram cuidadosamente monitoradas, as variáveis culturais (p.ex., a umidade do solo, os nutrientes, o espaçamento e a orientação das

fileiras de plantio) eram convenientemente manipuladas e o ambiente aéreo da cultura era adequadamente especificado.

Trabalhos detalhados realizados em laboratório dentre os quais pode-se citar GATES et al., 1965; GAUSMAN et al., 1971, 1973; THOMAS e GAUSMAN, 1977 forneceram as bases necessárias para a interpretação dos dados de campo.

O número de pesquisadores e de instituições conduzindo pesquisas deste tipo aumentou consideravelmente durante os anos seguintes.

Muitos grupos usavam radiômetros que mediam radiação emitida na faixa espectral de 8000 a 14000 nm (infravermelho termal) para inferir as temperaturas das plantas e dos solos, enquanto que outros usavam radiômetros nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho refletidos.

Os objetivos da maioria das pesquisas baseadas em dados espectrais coletados "in situ" têm sido estimar a quantidade de vegetação presente num campo agrícola, bem como avaliar o estado de vigor vegetativo das plantas.

Em geral, as técnicas baseadas em dados no infravermelho termal têm sido utilizadas para detectar o conjunto de estresses das plantas (água, pragas e doenças, nutrientes e salinidade do solo). Por outro lado, as técnicas que usam a radiação solar refletida (nas regiões espectrais do visível e do infravermelho) têm sido mais úteis para se estimar propriedades das plantas, tais como a fitomassa, o índice de área foliar (ou seja, a área de folhas verdes por unidade de área de terreno); propriedades que, por sua vez, podem ser usadas para avaliar o resultado de estresses e podem servir como dados de entrada para modelos de crescimento de plantas e para modelos de evapotranspiração.

A região espectral de interesse da presente pesquisa abrange o visível e o infravermelho refletido (400 a 2500 nm) e, assim, serão feitas referências apenas aos dados a ela restritos.

A fim de relacionar parâmetros agronômicos com indicadores espectrais das condições vegetativas de culturas, ao invés de se usar bandas individuais simplesmente, a abordagem mais utilizada tem sido os índices de Vegetação. Segundo JACKSON et al. (1980), um índice espectral de vegetação é obtido através da razão, diferenciação ou outro tipo de combinação ou transformação de dados espectrais, a fim de representar características de dosséis de plantas, tais como o índice de área foliar, a fitomassa, o peso da matéria verde, o peso da matéria seca, a porcentagem de cobertura do terreno por vegetação, etc. O seu objetivo é, também, diferenciar vegetação de solo (que atua como plano de fundo, quando a cena é visada por um sensor remoto) e fornecer um valor numérico que possa ser relacionado com vários parâmetros das plantas.

PERRY e LAUTENSCHLAGER (1984) reportam que pelo menos quatro dúzias de diferentes índices de vegetação já foram propostos, porém muitos deles são funcionalmente equivalentes entre si.

Provavelmente, o índice de vegetação mais usado seja a Razão Simples, ou seja, a razão entre a radiância (ou a reflectância) numa banda espectral do infravermelho próximo e a de uma outra banda do visível. JORDAN (1969) foi quem primeiramente relatou o uso da razão simples como um estimador espectral da vegetação e, desde então, ela tem sido utilizada por um grande número de autores.

TUCKER (1979) reviu os índices de vegetação formados por várias combinações das bandas do infravermelho próximo e do vermelho e mostrou que eles são úteis para monitorar a fitomassa fotossinteticamente ativa de dosséis de plantas.

A Razão Simples é sensível à vegetação verde porque a luz vermelha (630 a 670 nm) é absorvida pela clorofila, com pouca transmissão e pouca reflexão, ao passo que, no infravermelho próximo (700 a 1300 nm), a absorção é quase zero e a reflectância e a transmitância são altas (KNIPLING, 1970). Desta maneira, a reflectância na banda do infravermelho próximo (IVP) aumenta e a

reflectância na banda do vermelho diminui, fazendo com que a razão IVP/V aumente à medida em que a quantidade de vegetação aumenta.

ROUSE JR. et al. (1973) propuseram a razão diferença-soma das duas bandas já citadas: $(IVP-V)/(IVP+V)$, atualmente conhecida como Diferença Normalizada (DN), para o monitoramento de vegetação com dados do sensor MSS/Landsat, índice este que tem sido amplamente utilizado por um grande número de autores.

Sob certas condições, pode acontecer de a Diferença Normalizada tornar-se negativa, uma vez que, para densidades muito baixas de vegetação, a reflectância composta (vegetação+solo) é praticamente aquela do solo (ou seja, a reflectância do solo na banda espectral do vermelho pode ser maior do que a do infravermelho próximo).

A fim de evitar valores negativos da Diferença Normalizada e para evitar outros possíveis problemas, formulou-se a Diferença Normalizada Transformada ou, também, índice de Vegetação Transformado (TVI), uma vez que o nome original da Diferença Normalizada era "índice de Vegetação" (DEERING et al., 1975).

Esse índice é, meramente, a raiz quadrada de $(DN + 0,5)$. A sua utilidade sobre os outros índices não tem sido grandemente demonstrada.

Estes três índices espectrais de vegetação, apresentados neste item, constituem-se naqueles utilizados na presente pesquisa. Assim, nos passos seguintes são mostradas citações de trabalhos em que os mesmos foram utilizados, a fim de se poder entender melhor o que já é conhecido acerca das interações entre estimadores espectrais e parâmetros agrônômicos de culturas.

Antes, porém, é interessante lembrar que, no caso das culturas agrícolas de ciclo curto, há uma variação da quantidade de material vegetal contido no dossel da plantação (parâmetro cultural de máximo interesse na interação com a radiação eletromagnética que leva as informações da cultura até os sensores remotos) durante o ciclo.

Assim, como é mostrado na Figura 2.6, a extensão do ciclo de uma cultura pode ser subdividida, de maneira simplificada, em três fases fenologicamente distintas: numa primeira fase, ocorre o domínio do solo nas interações com a radiação eletromagnética - é a fase que envolve o plantio, a germinação e o desenvolvimento inicial, em que a cultura não recobre totalmente a superfície do solo.

Numa segunda fase, ocorre o domínio da cobertura verde nas interações da cultura com a radiação eletromagnética - neste ponto, já se pode considerar formado o dossel ou "telhado" da lavoura; e, numa visada vertical sobre a cultura, só se enxergaria o entrelaçamento das folhas verdes (evidentemente, em função de fatores como o espaçamento e a densidade de plantas); na segunda metade desta fase já ocorre o florescimento e a formação dos grãos.

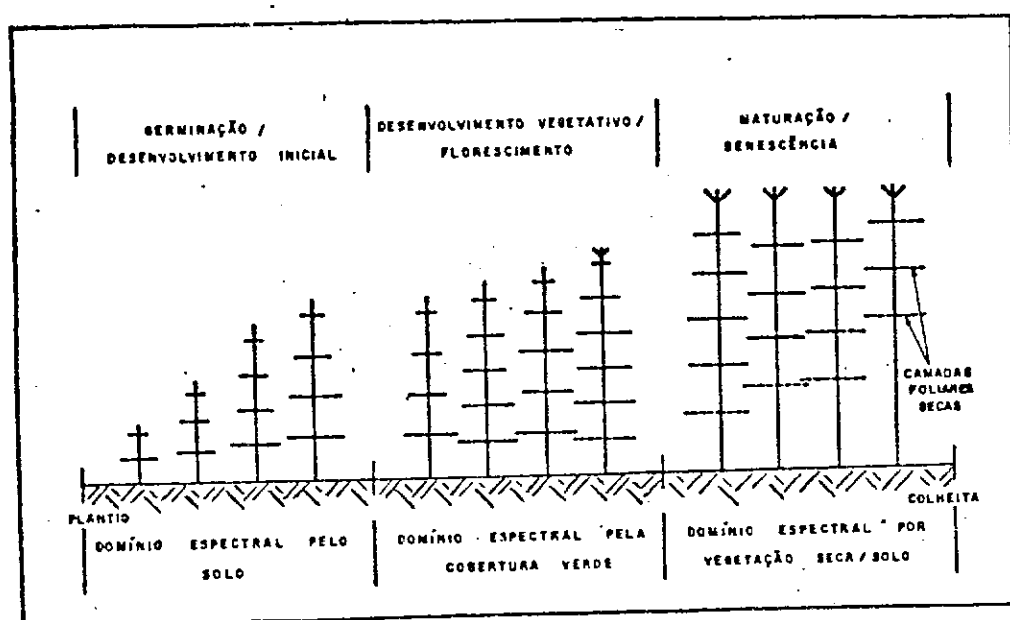


Figura 2.6- Ilustração esquemática das três grandes fases do ciclo fenológico de uma cultura agrícola, quanto aos principais componentes do sistema a influenciar na resposta espectral dos dosséis.

Na terceira e última fase do ciclo fenológico/espectral de uma cultura agrícola, sobrevêm a maturação e a senescência - dá-se, então, o secamento e a queda acentuada das folhas, voltando-se a expor grande porcentagem do solo e, assim, ocorre o domínio conjugado da vegetação seca e do solo exposto.

Deve ficar claro que cada cultura tem características fenológicas próprias no decorrer do seu ciclo biológico, seja em função de sua dinâmica de desenvolvimento, seja em relação a aspectos de arquitetura das plantas, ou seja ainda com referência a aspectos de tratos culturais, quando se comparam diferentes plantações da mesma cultura.

Têm sido citados múltiplos fatores como influenciantes na resposta espectral dos dosséis vegetais de culturas agrícolas. Entre eles, pode-se destacar: os solos, a estrutura do dossel (densidade de plantio e arquitetura das plantas) e aspectos de geometria de iluminação e de visada da cena.

A influência do solo, como "plano de fundo" da cena agrícola, sobre a reflectância espectral de culturas tem sido reconhecida por muitos autores, principalmente para baixas porcentagens de cobertura vegetal e, também, para lavouras em fileiras quando visadas verticalmente e sob ângulos altos de elevação solar.

Como afirmam KOLLENKARK et al. (1982a), dados multiespectrais coletados sobre alvos vegetais freqüentemente representam uma mistura complexa das contribuições espectrais de plantas individuais, de sombras e de solos. Estudando a influência do ângulo de iluminação solar sobre a reflectância de um dossel de soja, os autores encontraram que os maiores valores de reflectância ocorreram quando o ângulo azimutal solar era igual ao ângulo azimutal das fileiras de plantas. Houve variações de reflectância, durante o dia, de até 140% na banda espectral do vermelho, sendo que os maiores valores foram encontrados quando o solo entre as fileiras estava iluminado; e os menores valores de reflectância, quando o solo estava sombreado pelas plantas. Com relação às variações diurnas do fator de reflectância no

infravermelho próximo, elas foram menores do que aquelas do visível e não estavam claramente relacionadas com as interações Sol-fileiras como no visível. À medida em que a cobertura do solo se aproxima dos 100%, fechando o dossel, aquelas variações diurnas de reflectância diminuíram.

Segundo KOLLENKARK et al. (1982b), significativas diferenças no fator de reflectância, para as bandas espectrais vermelha e IV próxima, devido ao tipo de solo, foram especialmente proeminentes quando havia baixos valores de cobertura do solo. Em ambas as bandas, os fatores de reflectância da cultura sobre solo escuro foram significativamente menores do que os fatores de reflectância para o solo claro, até que os dosséis desenvolvessem pelo menos 80% de cobertura. O parâmetro solo, como painel de fundo para a cultura, afetou muito menos os valores da Razão Simples e da Transformação "Greenness" do que os fatores de reflectância nas bandas individuais vermelha e IV próxima.

Realmente, segundo TUCKER (1979), transformações como estas (Razão Simples e "Greenness") tendem a normalizar ou a minimizar diferenças devidas a tipos de solos e a condições de umidade do solo e são especialmente úteis para se estimar parâmetros de dosséis.

Quanto à influência dos tipos de solo, são bastante ilustrativas as Figuras 2.7(a) e (b), onde se pode verificar que, nos solos escuros com baixa reflectância bidirecional no vermelho, praticamente não há mudanças na reflectância bidirecional do dossel à medida em que vão sendo aumentados os índices de área foliar (IAF). O que se nota é a grande influência dos solos na fase em que os IAFs são baixos, para as três bandas espectrais analisadas (COLWELL, 1974a).

JACKSON et al. (1983) também afirmam que os tipos de solos influenciam de maneiras distintas as variáveis espectrais de dosséis agrícolas. Ou seja, os solos altamente refletivos e claros influenciam os índices de vegetação, por exemplo, muito mais do que os solos muito pouco refletivos e escuros. A

magnitude dos efeitos causados pelo solo (como painel de fundo do dossel agrícola, quando este é visado por um sensor) será diferente para os vários índices e transformações espectrais em função, também, das condições em que se encontrar este solo no momento das medições espectrais. Por exemplo, para muitos solos a reflectância quando eles estão úmidos terá um valor correspondente à metade do valor que teriam se estivessem secos.

HUETE et al. (1984, 1985) e EZRA et al. (1984) estudaram a efetividade dos índices espectrais de vegetação das categorias Razão (ex.: Razão Simples e Diferença Normalizada) e Ortogonais (ex.: a "Greenness" de KAUTH e THOMAS, 1976 e o "PVI" de RICHARDSON e WIEGAND, 1977) na discriminação entre solos expostos e densidades de vegetação. Eles concluíram que os índices Ortogonais e os de Razão são sensíveis tanto aos tipos de solos quanto às condições de umidade. A fim de minimizar as influências do solo, "linhas-de-solo" distintas devem ser usadas, particularmente para baixas densidades de vegetação. Assim, há as implicações de que modelos de área foliar, por exemplo, desenvolvidos para um determinado tipo de solo e certo conteúdo de umidade, não serão precisos sobre outros tipos de solos e em outras condições de umidade.

Entretanto, com relação à influência da umidade do solo sobre os valores de Razão das reflectâncias em duas bandas espectrais, CLEVERS (1988) discorda do que se afirmou acima, com base nos trabalhos de Bowers e Hanks (1965), Condit (1970), Stoner et al. (1980) e Janse e Bunnik (1974). BOWERS e HANKS (1965), por exemplo, observaram que a reflectância de um solo diminui à medida em que se vai aumentando o conteúdo de umidade, mas o efeito relativo da umidade do solo sobre a sua reflectância, nos diferentes comprimentos de onda, é semelhante. Janse e Bunnik (1974), conforme explica CLEVERS (1988), também verificaram que o decréscimo de reflectância em função do aumento de umidade é praticamente independente dos comprimentos de onda na região entre 400 e 1000 nm, para um solo arenoso. Assim sendo, CLEVERS (1988) considera confirmado que a razão das reflectâncias em duas bandas espectrais é independente do conteúdo de umidade do solo para um dado tipo de solo.

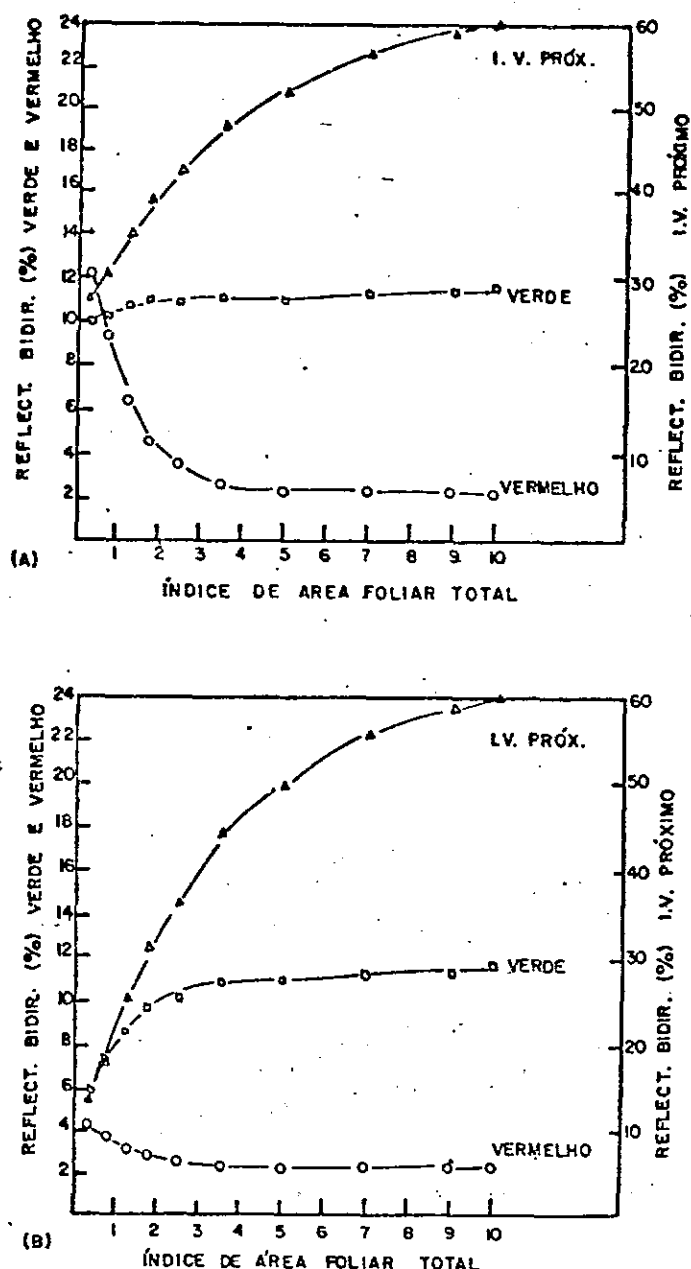


Figura 2.7- Reflectância bidirecional de dosséis vegetais simulados para um solo claro (a), e para um solo escuro (b), para as bandas verde, vermelha e infravermelha (COLWELL, 1974b).

Ainda com referência aos solos e levando também em consideração aspectos de geometria de iluminação da cena visada por um sensor, se os ângulos de elevação solar estiverem baixos durante as medições espectrais, provavelmente a superfície do solo entre as fileiras da cultura estará sombreada. E este sombreamento será maior (ou seja, a sombra será mais escura) para o visível do que para o infravermelho próximo - é que os comprimentos de onda do infravermelho próximo têm maior

transmitância através do dossel de folhas, além de permitir maior quantidade de luz difusa devido ao espalhamento múltiplo, ao passo que no visível há maior absorção da energia incidente por parte dos pigmentos (COLWELL, 1974b; KOLLENKARK et al., 1982a).

No que se refere aos fatores de dossel que influenciam de modo significativo a reflectância das lavouras agrícolas, aqueles relacionados com a estrutura do dossel estão entre os mais citados.

KIMES e KIRCHNER (1983) afirmam que a estrutura do dossel vegetal é um dos principais determinantes do comportamento eletromagnético (propriedades absorptivas, refletivas, transmissivas e emissivas) deste dossel vegetal.

Assinalam ainda que a estrutura do dossel pode ser matematicamente descrita por parâmetros físicos, tais como: a distribuição das plantas no terreno, o índice de área foliar, a densidade espacial foliar e a distribuição dos ângulos azimutal/inclinação das folhas.

Em estudos de sensoriamento remoto, a estrutura do dossel é importante porque descreve como as unidades individuais de espalhamento e/ou de emissão (folhas) estão posicionadas no dossel; assim, é um fator determinante das transferências radiativas para dentro e acima do dossel.

Todos estes parâmetros estruturais, como expõem KIMES e KIRCHNER (1983), variam espacialmente e temporalmente com o tipo de vegetação, o estágio de desenvolvimento e as condições da cultura. É preciso salientar que, para um determinado dossel vegetal, somente a distribuição de ângulos de inclinação/azimutal das folhas pode mudar significativamente no decorrer do dia. Esta variação diurna pode ser devida ao tipo de vegetação, a movimentos heliotrópicos das folhas, a condições ambientais (ex.: ventos), e a estresses da vegetação (ex.: estresse de água).

JACKSON e PINTER JR. (1986) afirmam que a arquitetura das plantas determina as propriedades não-lambertianas de reflexão eletromagnética dos dosséis vegetais. Evidentemente, passam,

então, a ser fundamentais os aspectos geométricos relacionados com os ângulos de elevação/azimute do Sol e do sensor.

KIMES (1984) considera em seu trabalho quatro tipos de dosséis teóricos, com diferentes distribuições de orientações foliares: (a) erectófilo (em que as folhas são predominantemente verticais); (b) esférico ou cônico (em que há igual probabilidade para todas as orientações foliares); (c) planófilo (em que as folhas são predominantemente horizontais); e (d) heliotrópico (em que as folhas faceiam o Sol).

Conforme explicam JACKSON e PINTER Jr. (1986), os elementos verticais de um dossel erectófilo captam a radiação refletida para dentro do dossel, com uma correspondente redução na quantidade de radiação refletida verticalmente em direção a um radiômetro orientado para o nadir.

O oposto é verdadeiro para um dossel planófilo, em que as folhas horizontalmente dispostas refletem mais na direção vertical e menor quantidade de radiação é captada para dentro do dossel. Assim, um sensor apontado para o nadir pode receber 20 a 30% mais radiação de um dossel planófilo do que de um outro erectófilo.

Como assinalam PINTER Jr. et al. (1985), mesmo para um sensor com um ângulo de visada constante, variações nos ângulos de iluminação solar causam variações na resposta espectral provinda de arquiteturas diferentes.

Assim sendo, JACKSON e PINTER Jr. (1986) investigaram, durante um ciclo de crescimento, a resposta espectral de duas variedades de trigo de dosséis arquiteturalmente diferentes, porém apresentando-se semelhantes quanto à reflectância de folhas individuais, índice de área foliar verde e fitomassa total seca. Observaram, por exemplo, que, durante o período de pico do índice de área foliar verde, a Razão IVP/V das planófilas foi 20% a 30% maior do que para as erectófilas. Alertam os autores para o fato de que dosséis arquiteturalmente diferentes, que têm, essencialmente, fitomassa e índice de área foliar verde

semelhantes, podem produzir índices de vegetação bem diferentes; sendo, portanto, necessário considerar-se adequadamente as diferenças de arquitetura.

KIRCHNER et al. (1982) obtiveram os fatores de reflectância direcional de dosséis de alfafa e os relacionaram com a estrutura do dossel, com variáveis agronômicas e com condições de irradiância em quatro fases do ciclo de corte da forrageira. Ressaltam os autores que selecionaram a alfafa em função de sua ampla variação quanto à estrutura geométrica de dossel durante um ciclo de corte (ela passa de erectófila após a ceifa, para cônica durante o desenvolvimento vegetativo e para quase-planófila na maturidade antes da ceifa) e também por não apresentar uma pronunciada estrutura de fileiras. Na banda TM3 (630-690 nm), a magnitude do fator de reflectância, para o sensor a nadir, diminui à medida em que a forrageira amadurece (Figura 2.8a), devido aos aumentos de área foliar que, por sua vez, incrementam a absorção de radiação pela clorofila; desta forma, menor quantidade de radiação atinge a superfície de fundo composta por solo e restos vegetais, que são mais refletivos que as folhas verdes de alfafa nesta banda espectral.

Com relação à trajetória da reflectância em função do ângulo zenital solar, aumentando-se este ângulo ocorrem decréscimos nas reflectâncias (banda TM3) dos dosséis mais erectófilos ou cônicos (característicos dos dosséis em desenvolvimento pós-ceifa) e elas tornam-se relativamente constantes à medida em que a alfafa amadurece e torna-se cada vez mais planófila.

Na banda TM4 (760 a 900 nm), a magnitude do fator de reflectância geralmente aumenta à medida em que a alfafa amadurece (Figura 8b), em função de que quanto maior a área foliar, mais a reflectância foliar domina a superfície do solo, bem como aumentam as reflexões múltiplas do infravermelho próximo. Quanto à trajetória da reflectância em função do ângulo zenital solar, a mesma tendência geral observada para a banda TM3 ocorre para a banda TM4, porém de maneira menos pronunciada. Ou seja, as reflectâncias diminuem levemente na banda TM4 com os

aumentos nos ângulos zenitais nos estágios em que os dosséis são mais erectófilos e eles tornam-se mais constantes naqueles estágios mais planófilos (fase madura após ceifa).

Este exemplo da alfafa pode ser considerado bastante ilustrativo, uma vez que demonstra com bastante clareza o que ocorre com a reflectância, em duas das bandas de maior utilidade na avaliação de parâmetros biofísicos de culturas (vermelho e infravermelho próximo), quando o sensor está posicionado a nadir (ou seja, a mais comum direção de visada para medições e coleta de dados de sensoriamento remoto). Isto porque a alfafa simula razoavelmente as estruturas de dosséis agrícolas ao longo do seu ciclo de corte passando de erectófila, para cônica e para quase-planófila.

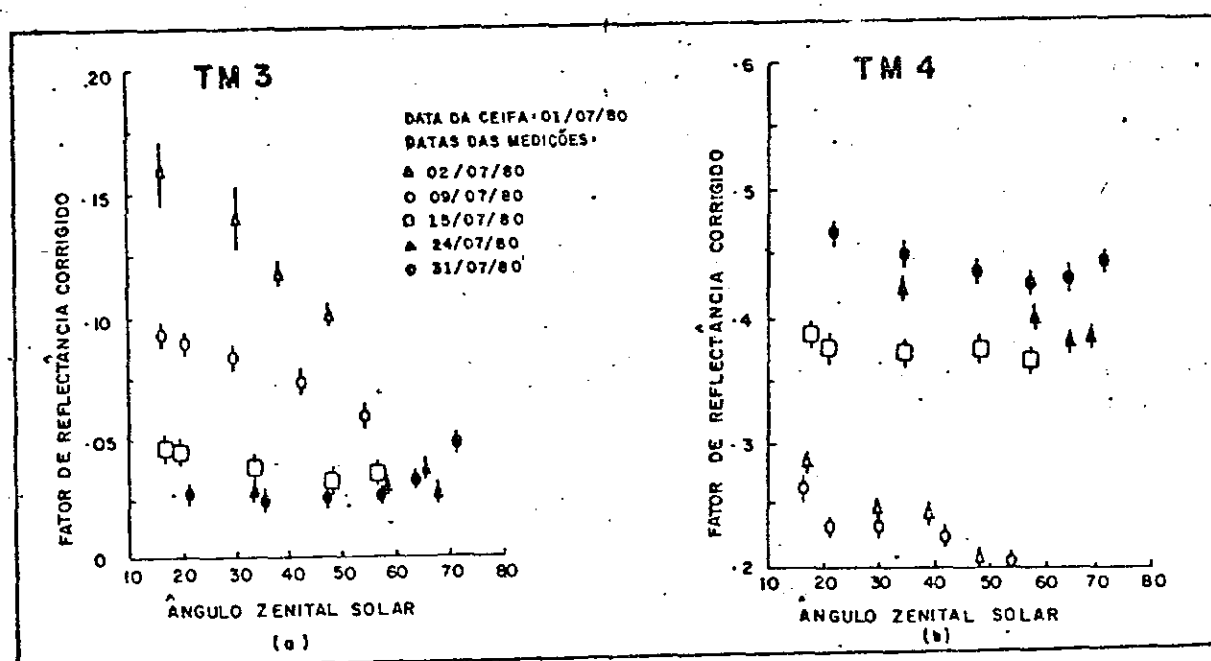


Figura 2.8- Fatores de reflectância para a alfafa, obtidos a nadir nas bandas TM3 (a) e TM4 (b), como função do ângulo zenital solar. Os erros de estimativa (2 desvios-padrão) são indicados pelas barras em cada ponto plotado (Adaptado de KIRCHNER et al., 1982).

Dentro das considerações sobre o parâmetro estrutura do dossel, é conveniente destacar as distinções que são feitas nos artigos científicos relacionados com reflectância espectral de

culturas. Ou seja, há os dosséis agrícolas completos (aqueles que são homogêneos e que recobrem totalmente a superfície do solo) e há os incompletos (aqueles em que se podem notar claramente as fileiras de plantas e as superfícies de solos expostos entre fileiras em função de o dossel não revestir totalmente o solo).

Considera-se que o aspecto de dosséis incompletos em que há forte evidenciação das estruturas em fileiras seja um fator complicador na reflectância de culturas agrícolas, uma vez que parâmetros de geometria de cena (ângulos zenital/azimutal do Sol e do sensor) adquirem importância especial dado o comportamento não-lambertiano destes dosséis incompletos (RANSON et al., 1981).

Neste sentido, RANSON et al. (1985) expõem que culturas em fileiras apresentam-se espectralmente complexas, uma vez que a cena visada por um sensor compõe-se de vegetação e de solo exposto em proporções que variam no decorrer do ciclo. Complicando ainda mais, há a presença das sombras lançadas pelas fileiras de plantas sobre as porções de solo exposto entre fileiras ou sobre as fileiras adjacentes. A quantidade e a distribuição das sombras variam com a posição do Sol.

Além desses, outros fatores que também devem ser considerados quanto a influências nas reflectâncias de dosséis agrícolas incompletos são a direção das fileiras (JACKSON et al., 1979; RANSON et al., 1981; VANDERBILT et al., 1981); e os comprimentos de onda (KOLLENKARK et al., 1982a; KIRCHNER et al., 1982; RANSON et al., 1985). JACKSON et al. (1979) citam também o espaçamento, a altura das plantas, a porcentagem de cobertura do solo e a variedade, entre outros.

Neste contexto, bastante ilustrativa é a pesquisa de JACKSON et al. (1979), onde os autores observaram que as mudanças de reflectância nas bandas visíveis com a elevação solar podem ser explicadas com base na alta absorção pelas folhas verdes e também nas diferentes proporções de sombreamento do solo e de outras plantas dependendo da elevação solar, da direção das fileiras de plantio e da altura das plantas.

Para fileiras orientadas na direção norte-sul, o solo entre elas é sombreado logo de manhã, sendo quase totalmente iluminado por volta do meio-dia - assim, a reflectância nas bandas espectrais do visível aumentam até um máximo neste horário.

Para as fileiras leste-oeste, JACKSON et al. (1979) indicam que a fração iluminada de solo entre fileiras muda menos do que para o caso das fileiras norte-sul (dependendo do espaçamento e da altura das plantas), com a reflectância mostrando uma variação correspondentemente menor.

Com relação ao infravermelho próximo (740-1300 nm), há uma transmitância maior através das folhas verdes, sendo necessária uma quantidade três a quatro vezes maior de camadas de folhas para atingir a reflectância máxima do que no visível. Para baixos ângulos de elevação solar a luz entra no dossel em ângulos tais que numerosas folhas são encontradas e a reflectância é alta. Próximo ao meio-dia, o número de folhas diretamente encontradas é menor, causando uma menor reflectância no infravermelho próximo. A orientação de fileiras, conforme JACKSON et al. (1979), tem um efeito na reflectância do infravermelho próximo menor do que na reflectância visível, em função de que o infravermelho próximo, tendo muito maior transmitância entre as folhas, produz efeito de sombreadamento menor do que o visível. Neste ponto é oportuno citar uma conclusão de COLWELL (1974b), que afirma que as sombras no infravermelho próximo podem não ser tão escuras como aquelas observadas na região espectral do visível, devido à menor absorção dos pigmentos e ao espalhamento múltiplo no dossel.

CURRAN (1981) acrescenta que, na medida em que a escuridão da sombra é uma função da transmitância foliar, ela não afeta todos os comprimentos de onda igualmente; portanto, complica a comparação de dados de reflectância bidirecional coletados em diferentes fases do ciclo da cultura.

A diminuição da reflectância no infravermelho próximo e o aumento da reflectância no visível com a elevação solar indica que as transformações Razão (IVP/V) mudarão de forma

significativa, conforme concluem JACKSON et al. (1979), em função do ângulo solar. As Razões (IVP/V), para a cultura plantada sem padrão de fileiras, segundo estes autores, variaram pouco com o ângulo solar, a não ser próximo ao meio-dia. Para fileiras leste-oeste houve um decréscimo relativamente pequeno das Razões à medida em que aumentava o ângulo solar; entretanto, para as fileiras norte-sul, houve um decréscimo considerável das Razões IVP/V.

JACKSON et al. (1979) assinalam ainda que, para solo exposto e para dosséis densos, a mudança nas reflectâncias em função do ângulo solar foi pequena. Para dosséis incompletos com estrutura em fileiras, típica da maior parte dos campos de trigo, entretanto, a reflectância pode ser altamente dependente da elevação solar e da diferença entre azimuth solar e direção de fileiras. Considerando as grandes variações nos fatores de reflectância e nas Razões IVP/V observadas para uma mesma variedade num único estágio de crescimento, os autores concluíram que a configuração da lavoura (estrutura do dossel) é um dos fatores determinantes da reflectância espectral do trigo; possivelmente suficiente para obscurecer diferenças de reflectância devidas a variedades. Salientam que isto não deveria ser negligenciado na interpretação de imagens multi-datas que abrangem um período significativo de tempo.

A partir deste ponto, passa-se a discorrer sobre as relações propriamente ditas entre as variáveis espectrais e as variáveis agronômicas, conforme têm sido abordadas pela literatura selecionada sobre este assunto.

Convém, inicialmente, esclarecer que as variáveis espectrais de interesse neste trabalho foram as seis bandas individuais refletivas do TM/Landsat-5, bem como três índices espectrais de vegetação derivados das bandas TM3 e TM4, ou sejam: a Razão IVP/V, a Diferença Normalizada e o índice de Vegetação Transformado. Quanto às variáveis agronômicas, foram utilizadas as variáveis índice de Área Foliar (IAF), Fitomassa (FIT) e Porcentagem de Cobertura do Solo por Vegetação (COV). Estas três variáveis agronômicas estão entre as mais utilizadas para

estimativas de condições de dosséis agrícolas a partir do sensoriamento remoto multiespectral.

Com relação ao índice de Área Foliar (IAF), pode-se dizer que é um dos indicadores de dossel mais utilizados em trabalhos relacionados com o sensoriamento remoto multiespectral de culturas.

O IAF, segundo LOOMIS e WILLIAMS (1969), é o melhor parâmetro que tem sido usado para a mensuração da densidade de cobertura vegetal.

MAGALHÃES (1985) pondera que o IAF corresponde à área foliar existente em relação à superfície ocupada pela planta ou comunidade vegetal. A capacidade de ocupação do terreno, ou da água, pelas partes aéreas das plantas, pode ser estimada através da determinação da área foliar existente em uma dada superfície de terreno, ou de água.

Ainda de acordo com MAGALHÃES (1985), o IAF descreve a dimensão do sistema assimilador de uma comunidade vegetal. Em alguns casos, em que outras partes da planta, além das folhas, contribuem de maneira substancial para a fotossíntese, como caules, pecíolos, brácteas, etc, estas devem ser adicionadas à área foliar no cálculo dos parâmetros da análise do crescimento.

Segundo ASRAR et al. (1985), o IAF é um importante parâmetro do dossel vegetal. A magnitude e a duração do IAF estão fortemente relacionadas com a capacidade do dossel em interceptar radiação fotossinteticamente ativa; portanto, o IAF está correlacionado com a fotossíntese do dossel e com a acumulação de matéria seca, em situações onde não predomina o estresse (água, doenças, pragas, etc). As medições diretas da área foliar, como explicam os autores, são extremamente tediosas e o desenvolvimento de uma técnica rápida e simples para avaliar a área foliar seria, sem dúvida, uma grande contribuição.

AASE (1978) considera que as medições de área foliar são freqüentemente necessárias como um índice de crescimento e para determinações de assimilação e de transpiração em estudos

agronômicos e fisiológicos, incluindo modelagem de crescimento de plantas e modelagem de evapotranspiração.

Como consideram também HATFIELD et al. (1985), as estimativas de área foliar são necessárias a fim de estender modelos de evapotranspiração e de produtividade agrícola de pequenos canteiros experimentais para grandes áreas. Entretanto, a medição de área foliar em campos individuais é difícil, se não impossível, em função de problemas de amostragem espacial e do grande número de amostras necessárias.

Assim, já na década de setenta, pesquisadores em sensoriamento remoto agrícola estudavam a possibilidade de se obter estimativas do IAF a partir de dados multiespectrais de satélite, entre eles WIEGAND et al. (1979) e POLLOCK e KANEMASU (1979), com o objetivo de avaliar grandes áreas.

RICHARDSON et al. (1982) assinalam que o IAF é usado em modelos de crescimento a fim de particionar a energia entre plantas e solo na subrotina da evapotranspiração e para estimar a intercepção de luz na subrotina da fotossíntese. Assim, as estimativas de IAF a partir de dados LANDSAT propiciam estas informações para uso ou como (a) dados de entrada, ou como (b) dados de "feedback" para checar as predições dos modelos de crescimento e redirecionar o modelo, se necessário.

Neste ponto é oportuno mostrar como é, em geral, o comportamento temporal do IAF durante o ciclo das culturas anuais, como o trigo, por exemplo.

O comportamento do IAF durante o ciclo de uma cultura anual pode ser considerado de tendência parabólica, com valores baixos no início, atingindo-se um pico e em seguida valores baixos novamente, como é mostrado nas Figuras 2.9(a) e (b).

Evidentemente, fatores como datas de plantio, cultivares, densidades de plantio, espaçamentos, precipitação pluviométrica (ou irrigação artificial), pragas, doenças, adubação e outros interferem de forma marcada no desenvolvimento das culturas e esta influência geralmente é bem evidenciada através do IAF, o

que torna este um dos principais indicadores do vigor da vegetação agrícola.

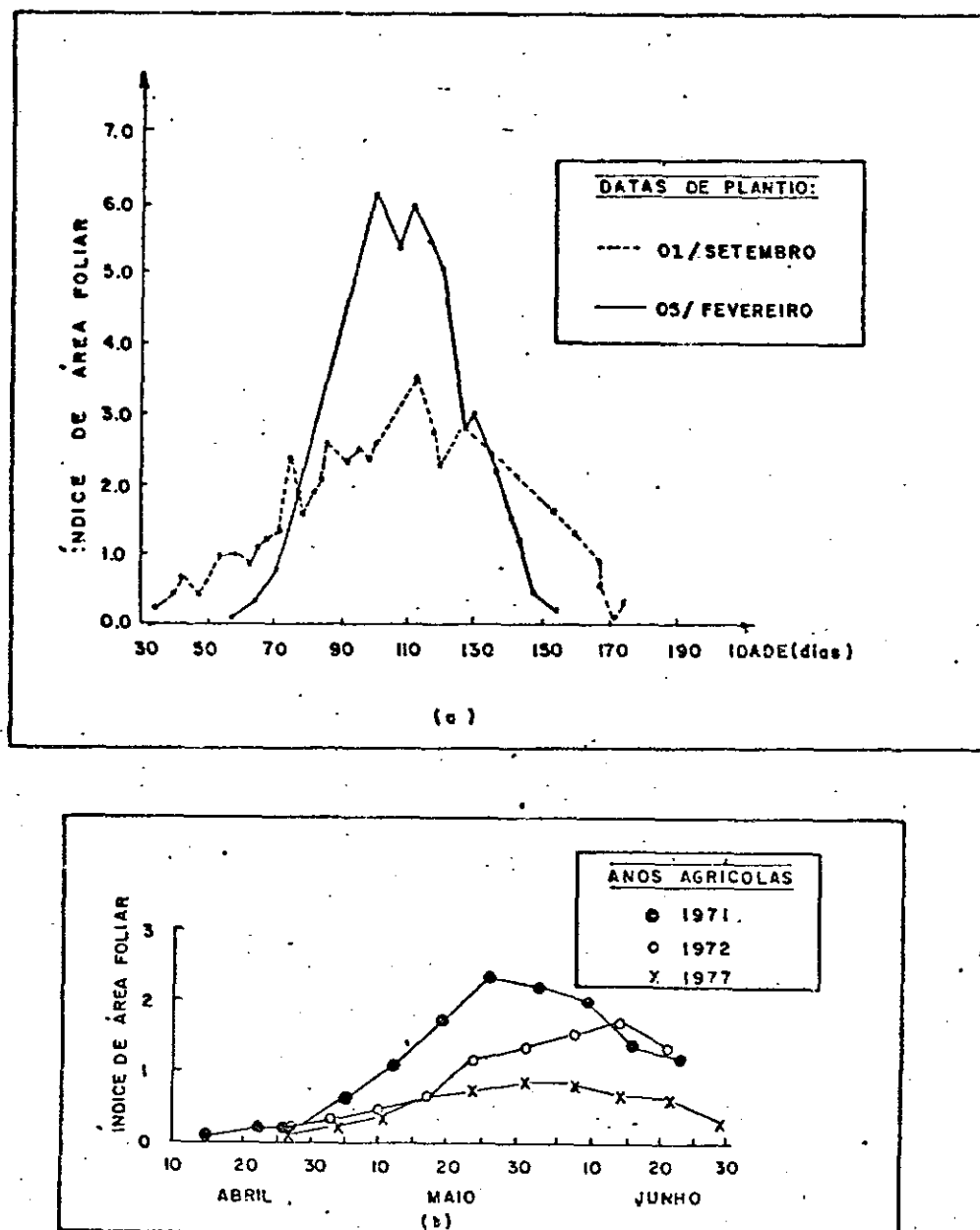


Figura 2.9- Perfis temporais do IAF para a cultura do trigo em (a) duas datas de plantio diferentes (adaptado de ASRAR et al., 1985); (b) três diferentes anos agrícolas, cultivares e densidades de plantio (Adaptado de AASE, 1978).

Quando se defronta o IAF com variáveis espectrais, como as reflectâncias nas bandas individuais refletivas TM/Landsat ou como os índices de vegetação delas derivados, é possível compreender-se melhor as relações entre estas variáveis.

GARDNER (1983), por exemplo, com a cultura de milho, registrou as tendências das relações entre o IAF e as reflectâncias nas seis bandas refletivas do TM/Landsat como estão mostradas na Figura 2.10.

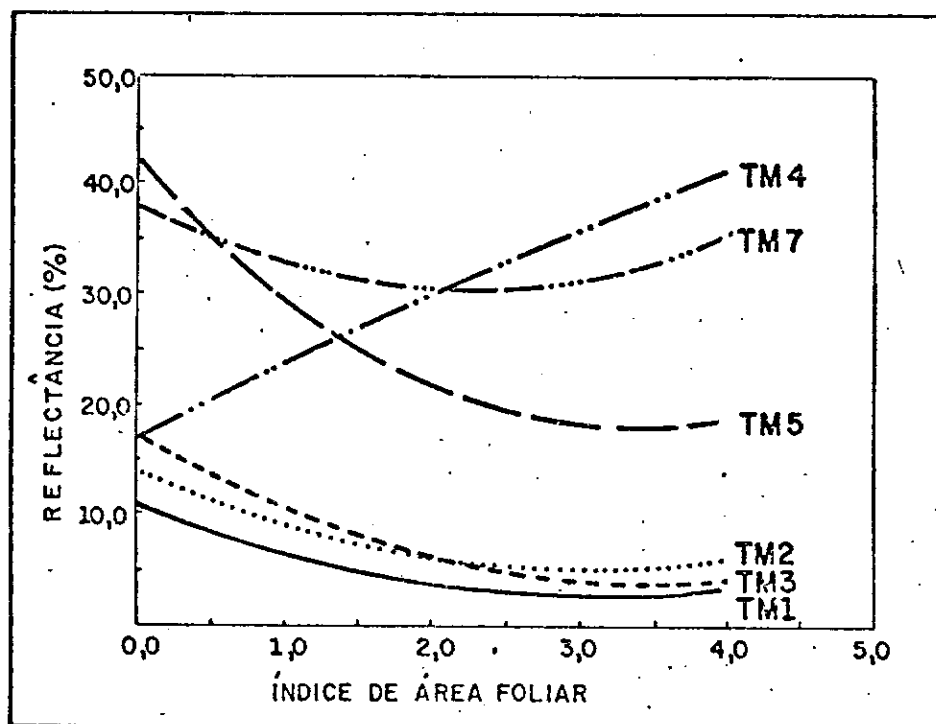


Figura 2.10- Relações entre a reflectância de dossel (cultura do milho e o índice de área foliar, para as seis bandas refletivas do TM/Landsat-5 (Adaptado de GARDNER, 1983).

O que há a destacar nesta Figura 10 é a resposta ascendente da banda TM4 em função dos aumentos de IAF. Isto é causado por um aumento no número de camadas verticais de folhas no dossel (ALLEN e RICHARDSON, 1968); ou seja, à medida em que aumenta o número de camadas foliares, aumenta também a reflectância no infravermelho próximo, por efeitos da reflectância múltipla, como está ilustrado na Figura 2.11.

Isto, como explica GARDNER (1983), expresso de maneira diferente, significa que os padrões de reflectância de dossel na banda TM4 respondem à densidade vertical da fitomassa.

Vários trabalhos têm relatado que combinações lineares de dados espectrais no vermelho e no infravermelho próximo são significativamente correlacionadas com as porções verdes fotossinteticamente ativas dos dosséis de plantas (TUCKER, 1979; WIEGAND et al., 1979; HOLBEN et al., 1980; KIMES et al., 1981; HATFIELD et al., 1985).

Quanto aos efeitos não-simétricos, a data de plantio e a época de irrigação em relação ao estágio de crescimento apresentaram efeitos significativos sobre o desenvolvimento das folhas de trigo. Uma redução na umidade do solo afetou tanto a duração como a magnitude do IAF máximo nas últimas datas de plantio. Em geral, um estresse de umidade durante os estágios vegetativos resultou numa redução no IAF máximo, enquanto que o estresse de água durante o período reprodutivo diminuiu a duração do IAF verde. Estes tratamentos de manejo afetaram a tendência cíclica da resposta espectral dos dosséis de trigo. O efeito destes tratamentos foi notado nos valores de IAF estimados a partir de medições de reflectância de dossel.

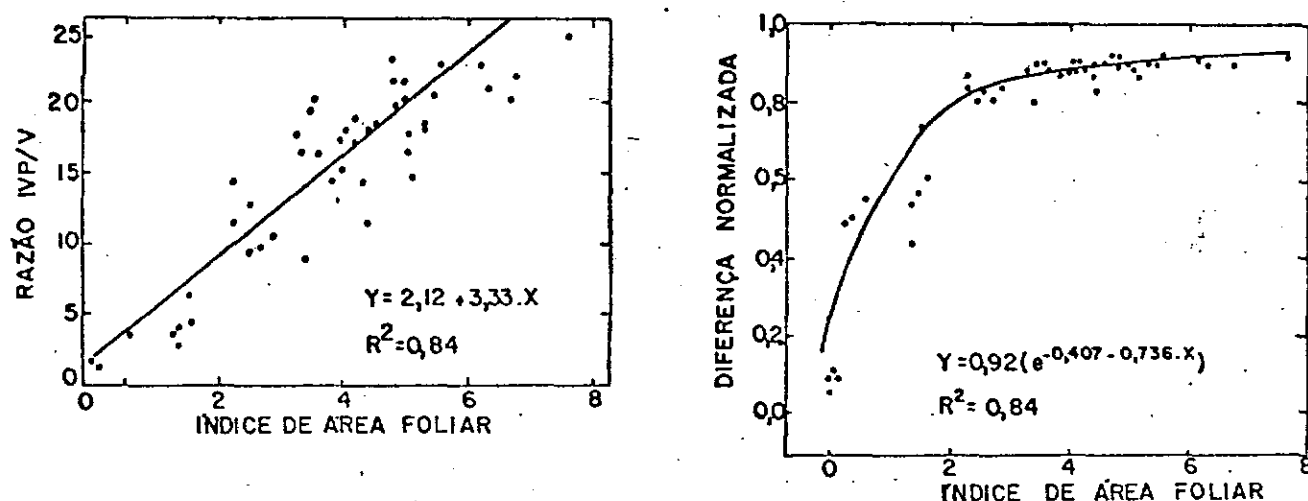


Figura 2.12- Relações entre o IAF e as combinações espectrais Razão IVP/V e Diferença Normalizada para a soja (HOLBEN et al., 1980).

Com relação aos efeitos simétricos, a geometria de dossel e os ângulos solares também afetaram as propriedades espectrais dos dosséis e, portanto, o IAF estimado. Um aumento nos ângulos zenitais solares resultou em aumento geral no IAF estimado obtido

por ambos os métodos (Razão IVP/V e Diferença Normalizada). Isto foi atribuído à forte dependência da reflectância vermelha do dossel quanto ao ângulo de iluminação solar, uma vez que a reflectância no infravermelho é menos sensível às mudanças diurnas.

ASRAR et al. (1985), indicaram ainda que as influências simétricas do ângulo de iluminação solar sobre o IAF estimado (a partir de dados espectrais) não foram tão significativas quanto as dos efeitos não-simétricos causados pelas práticas de manejo e/ou pelas variabilidades intra-lavouras. Entretanto, os efeitos de ambos os fatores (simétricos e não-simétricos) foram integrados no IAF estimado através de medições de reflectância espectral de dossel.

Utilizando o modelo de reflectância de SUITS (1972), CHANCE e LEMASTER (1977) calcularam que, para o algodão, a reflectância do dossel é insensível a mudanças de IAF, quando o IAF excede a 2,2 (para a região visível) e a 6,2 (para o infravermelho). Houve concordância qualitativa com os dados experimentais para a reflectância espectral, porém, o modelo superestima a reflectância em todos os comprimentos de onda.

Para o trigo, ASRAR et al. (1984) encontraram que, na ausência de folhas (IAF aproximadamente 0), no início do ciclo, a Diferença Normalizada apresentou valor equivalente ao da Razão IVP/V para os solos. À medida em que as folhas cresceram em tamanho e em número, a Diferença Normalizada aumentou rapidamente com o IAF; entretanto, atingiu um platô para valores de IAF maiores que 6,0 (Figura 2.13).

Neste platô assintótico ocorrem mudanças muito pequenas da DN em função de se ter mudanças ainda menores na radiação refletida pelo dossel das plantas para valores altos do IAF.

ALLEN e RICHARDSON (1968) referiram-se a este limite como "reflectância infinita de dossel (R_{∞})" e indicaram que ela é atingida quando a adição de mais folhas no dossel não muda a reflectância deste dossel.

ASRAR et al. (1984) indicaram também que as mudanças na Diferença Normalizada estavam principalmente relacionadas com o IAF. Para valores de IAF menores que 3, a Diferença Normalizada foi influenciada principalmente pela reflectância do solo; mas para valores de IAF maiores que 3, a DN tornou-se mais dependente da reflectância da vegetação no infravermelho próximo; entretanto, achou-se que esta dependência é limitada para valores de IAF maiores que 6. Assim sendo, a metodologia proposta por estes autores permite estimar o IAF (aproximadamente 0,8 unidades) a partir de medições espectrais de dosséis de trigo, mas a sua sensibilidade decai consideravelmente para valores de IAF maiores do que 6,0.

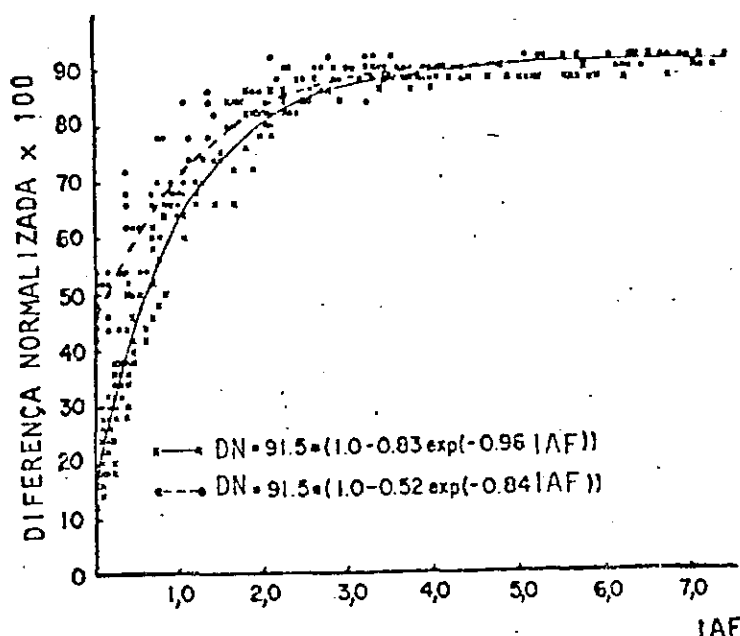


Figura 2.13- Relações entre a DN e o IAF para as fases de crescimento (x---x) e de senescência (●----●) do trigo (ASRAR et al., 1984).

Em função do que se encontra na literatura específica sobre as relações entre as variáveis agronômicas de dosséis agrícolas e as variáveis espectrais, pode-se dizer que existe uma grande redundância (até certo ponto do ciclo) entre algumas variáveis agronômicas da cultura em questão (TUCKER et al., 1979; KOLLENKARK et al., 1982b), de tal modo que não seria correto

afirmar-se que uma determinada variável espectral, sozinha, está correlacionada com apenas certa variável agrônômica num determinado momento.

Assim, por exemplo, considerando-se uma cultura qualquer, à medida em que vão aumentando os valores de IAF, aumentam também os de COV (Porcentagem de Cobertura Vegetal do Solo) e os de FIT (Fitomassa), até um determinado momento em que IAF e FIT continuam a aumentar, porém COV atingiu o seu valor máximo (100% de cobertura do terreno).

A este propósito, HOLBEN et al. (1980) relatam que a porcentagem de cobertura vegetal (COV) tem sido considerada um indicador das condições de dossel. Avaliaram as relações de variáveis espectrais com a COV numa configuração de alta densidade foliar de uma plantação de soja, encontrando um relacionamento baixo, tanto para a Razão IVP/V, como para o IAF (Figura 2.14). Uma vez ocorrido o fechamento do dossel (i.é, 100% de cobertura foliar), a COV não poderia, por definição, continuar aumentando, embora as plantas de soja continuassem a produzir folhas verdes. Entretanto, o IAF quantificou o aumento na produção foliar e a Razão IVP/V foi sensível a isto. Portanto, concluem os autores, fica evidenciado que a COV é uma escolha pouco adequada para quantificar as condições de dossel "in situ" para a cultura da soja.

Como se pode notar nas Figuras 14 (a), (c) e (d), e conforme assinalam TUCKER et al. (1979), as relações da DN com COV exibem um nítido "fenômeno de trajetória" da variável com o tempo no decorrer do ciclo agrícola, mas os padrões são geralmente similares.

TUCKER et al. (1979) assinalam que as plantações de soja tornam-se espectralmente aparentes quando a COV atinge entre 30 e 35% para a soja e entre 20 e 25% para o milho. Destes pontos em diante, os valores cresceram até que os respectivos dosséis atingissem a cobertura máxima. A porcentagem máxima de cobertura corresponde aos máximos valores das variáveis espectrais. Quando

se inicia o processo de senescência, os valores espectrais e a COV também começam a decrescer.

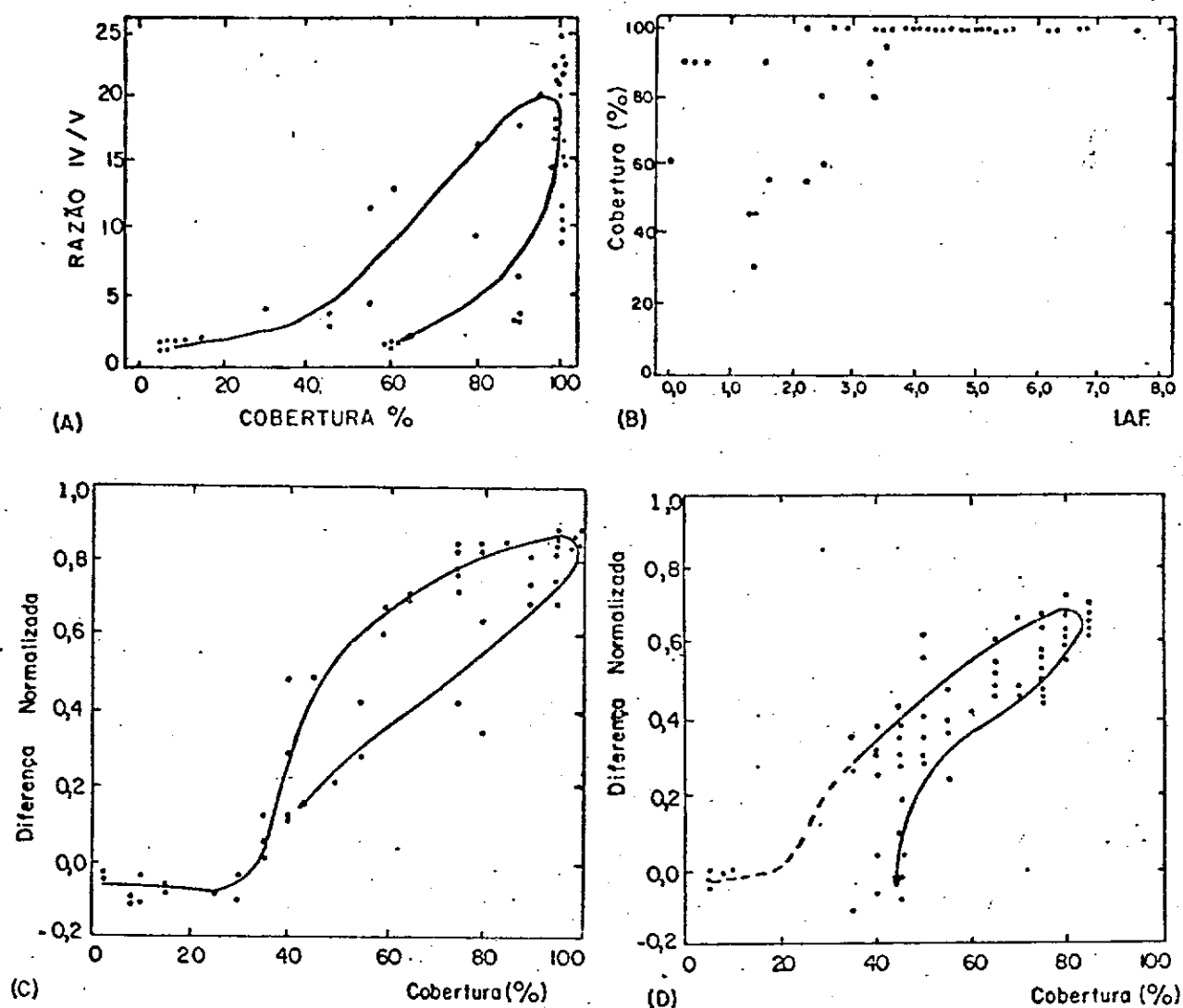


Figura 2.14- Relações entre as variáveis COV, para a soja, e (a) a Razão IVP/V; e (b) o índice de Área Foliar (Adaptado de HOLBEN et al., 1980). Relações entre a COV e a Diferença Normalizada para (c) soja e (d) milho (Adaptado de TUCKER et al., 1979). As setas em (a), (c) e (d) indicam o "fenômeno de trajetória" dos dados ao longo dos respectivos ciclos agrícolas.

KOLLENKARK et al. (1982b) reportam que fatores como espaçamento, data de plantio e cultivar, para a soja, foram responsáveis por influências na Porcentagem de Cobertura, no índice de Área Foliar, na Fitomassa e no estágio de desenvolvimento da cultura. Entretanto, variações nestes parâmetros agrônômicos foram manifestadas na reflectância do

dossel. A Tabela 2.1 mostra que as variáveis COV e IAF tiveram maiores correlações com as variáveis espectrais (tanto para as bandas individuais como para a transformação Razão IVP/V) do que a Biomassa Fresca ou Seca.

É interessante verificar como se comportam as variáveis espectrais em relação à variável COV, o que será feito através das Figuras 2.15 e 2.16, a seguir.

Conforme concluem KOLLENKARK et al. (1982b), além dos outros fatores já citados, a cor e a umidade do solo influenciam muito na reflectância no visível e no infravermelho. Isto é corroborado por HUETE et al. (1985) que constataram, para a cultura do algodão, que a reflectância composta (vegetação + solo), no vermelho (Figura 2.16a) convergiu para um valor constante quando a COV era de 90%, após o que houve um leve aumento e tornou-se independente da influência dos solos como superfície de fundo.

Tabela 2.1- Coeficientes de determinação (r^2) para algumas variáveis agrônômicas em função das reflectâncias no vermelho (600-700 nm) e no infravermelho (800-1100 nm) e da Razão IVP/V, para um solo escuro ("Chalmers") e para um solo claro ("Russell") (Adaptado de KOLLENKARK et al., 1982b).

TIPO DE SOLO	VARIÁVEL AGRÔNÔM.	VARIÁVEIS ESPECTRAIS			AMPLITUDES DOS DADOS
		Vermelho	I.V.P.	IVP/V	
Chalmers (solo es- curo)	COV	0,94	0,93	0,95	0 - 100%
	IAF	0,65	0,80	0,85	0 - 8,9
	Biom.Fresca	0,61	0,71	0,81	0-9120(g/m ²)
	Biom.Seca	0,53	0,64	0,73	0-2489(g/m ²)
Russell (solo cla- ro)	COV	0,98	0,93	0,92	0 - 100%
	IAF	0,73	0,69	0,83	0 - 8,8
	Biom.Fresca	0,59	0,49	0,71	0-9633(g/m ²)
	Biom.Seca	0,47	0,36	0,57	0-3027(g/m ²)

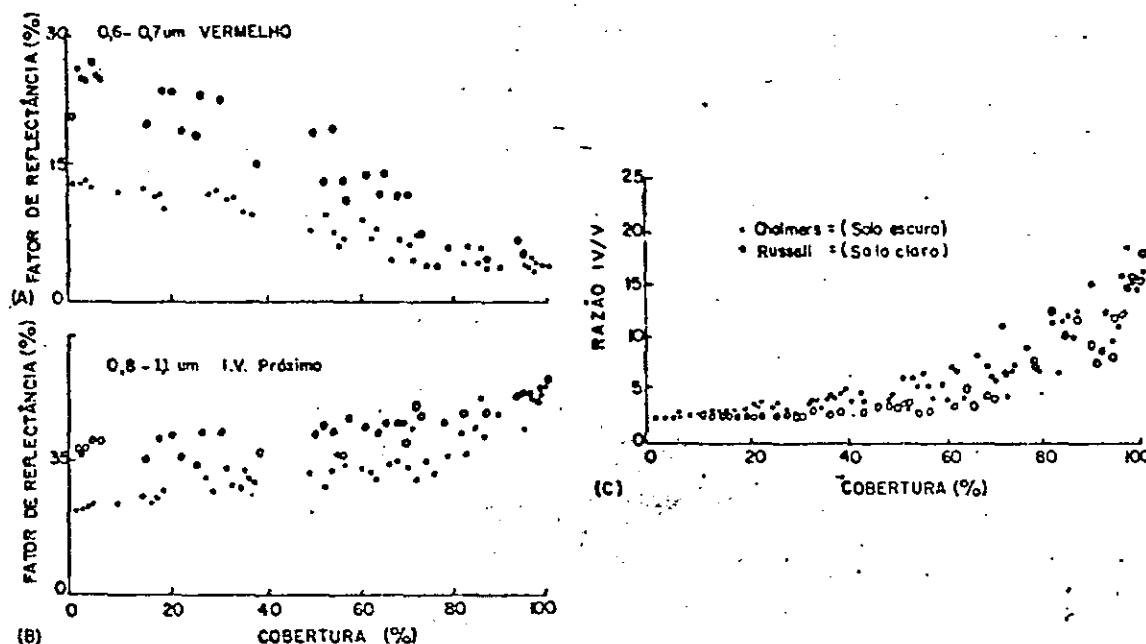


Figura 2.15- Efeitos do solo, como superfície de fundo da cultura de soja, nas relações da Porcentagem de Cobertura (COV) com três variáveis espectrais: (a) fator de reflectância no vermelho; (b) fator de reflectância no infravermelho próximo; e (c) razão IVP/V (Adaptado de KOLLENKARK et al., 1982b).

No caso do infravermelho próximo (Figura 2.16b), com o desenvolvimento e o aumento da vegetação, houve um aumento francamente linear dos valores de reflectância desde o solo exposto até cerca de COV igual a 90%. A seguir, houve um aumento súbito na reflectância IVP para valores de COV acima de 90%, o que foi atribuído a um rápido acúmulo de biomassa verde, a despeito de aumentos pequenos da porcentagem de cobertura verde lateralmente. É interessante visualizar também que, mesmo para COV de 100%, a reflectância IVP foi consistentemente mais alta para o solo mais refletivo ("Superstition sand"), devido à penetração do IVP no dossel totalmente fechado.

Pelas indicações de HUETE et al. (1985), portanto, vislumbra-se que, a despeito do raciocínio lógico que se possa ter inicialmente, os solos são fatores importantíssimos na

resposta espectral das culturas agrícolas, não só nas fases iniciais e nas fases finais de baixa porcentagem de cobertura vegetal da superfície, mas até um ponto relativamente avançado do seu ciclo biológico, principalmente para os comprimentos de onda infravermelhos que têm maior capacidade de penetração no dossel cultural.

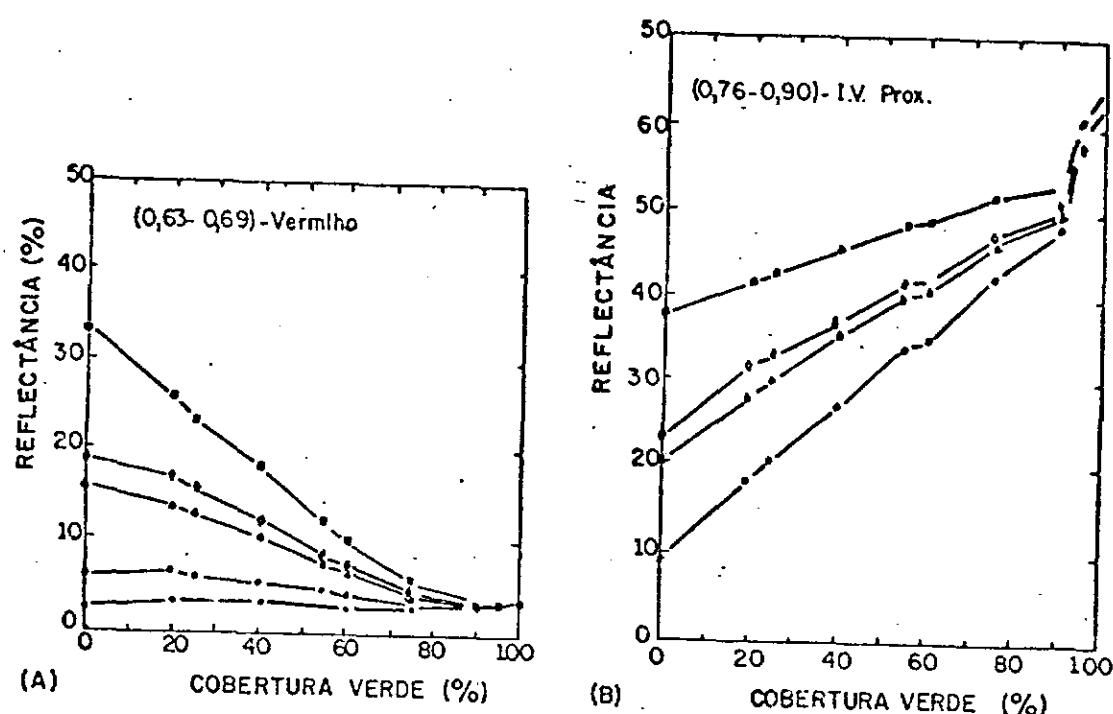


Figura 2.16- Relações entre a Porcentagem de Cobertura (algodão) e a reflectância no vermelho (a) e no infravermelho próximo (b) para cinco solos diferentes: (o) "Superstition sand" (seco); (◊) "Avondale loam" (seco); (Δ) "Whitehouse-B SCL" (seco); (◻) "Cloversprings loam" (seco); (.) "Cloversprings loam" (úmido) (HUETE et al., 1985).

O parâmetro agrônômico Fitomassa (FIT) também tem sido citado como um dos principais envolvidos na influência sobre a reflectância dos dosséis vegetais agrícolas.

Como afirmam KIMES et al. (1981), vem crescendo o interesse de se utilizar a radiometria portátil como uma ferramenta de pesquisa não-destrutiva em substituição ou em

suporte a medições mais trabalhosas de vegetação, sendo a Fitomassa um dos parâmetros que se tem desejado estimar via variáveis espectrais. Isto devido à potencialidade de a Fitomassa servir como importante dado de entrada para modelos de crescimento e de produtividade de culturas (WIEGAND et al., 1979; TUCKER et al., 1980).

AASE e SIDDOWAY (1981) citam também a importância da Fitomassa para se fazer estimativas corretas do rendimento de resíduos agrícolas, a fim de se poder predizer o potencial de riscos de erosão e para um manejo mais efetivo de resíduos, incluindo o potencial de excessos de resíduos para uso como energia térmica.

Os padrões de comportamento da variável Fitomassa ao longo do ciclo da soja e do milho são mostrados nas Figuras 2.17 (a) e (b), respectivamente.

AASE e SIDDOWAY (1981) fizeram o relacionamento entre a Diferença Normalizada (DN) e a Matéria Seca Total para o trigo, considerando seis diferentes densidades de plantio e encontraram as tendências mostradas na Figura 2.18.

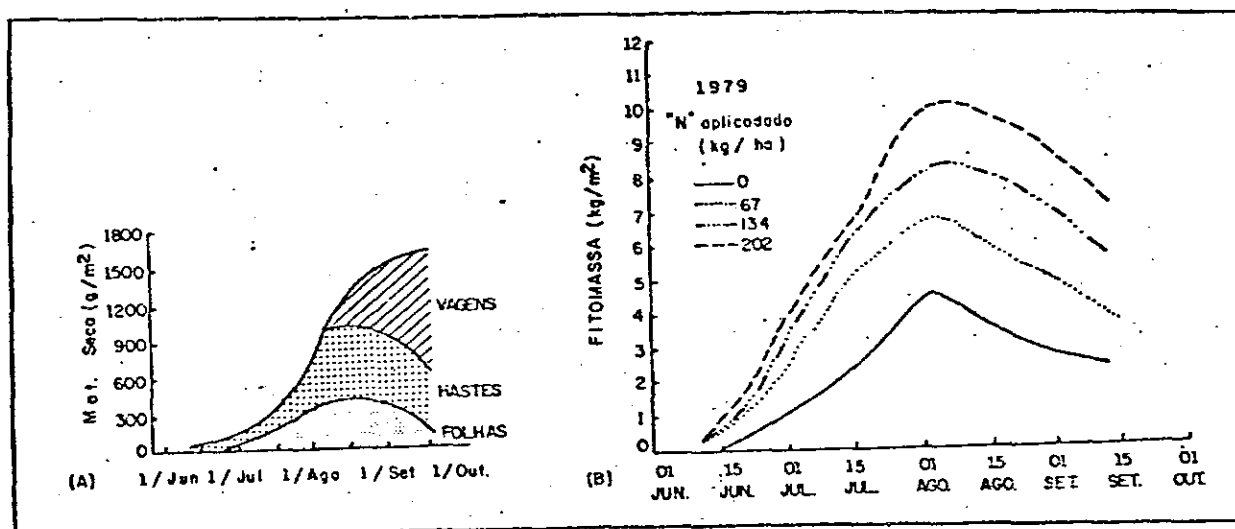


Figura 2.17- Padrões de comportamento da Fitomassa ao longo do ciclo agrícola para: (a) soja (KOLLENKARK et al., 1982b); e para (b) milho sob diferentes tratamentos de adubação N (WALBURG et al., 1982).

Os autores assinalam que nenhuma relação geral poderia ser estabelecida entre a Diferença Normalizada e a Matéria Seca Total, exceto para um determinado período, que corresponde aos estágios de crescimento durante o perfilhamento.

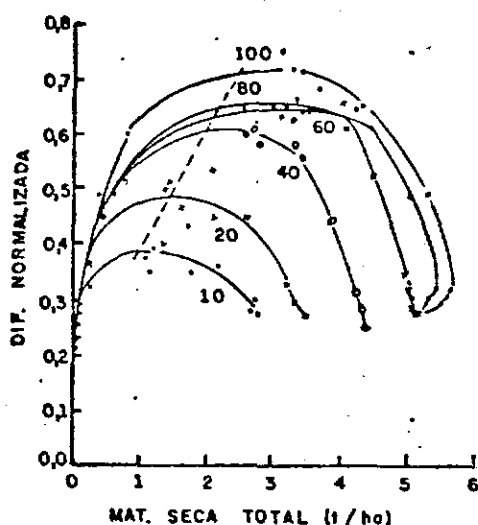


Figura 2.18- índice de Vegetação Diferença Normalizada versus Matéria Seca Total para seis densidades de plantio do trigo. A linha tracejada mostra o momento em que se atingiu a máxima Porcentagem de Cobertura do terreno em cada densidade de plantio (AASE e SIDDOWAY, 1981).

Conforme indicam AASE e SIDDOWAY (1981), durante o estágio de perfilhamento do trigo, as plantas são compostas principalmente de material foliar e existe, então, um forte relacionamento entre área foliar e Matéria Seca Total acima da superfície; porém, subseqüentemente, esta tendência se desfaz.

TUCKER et al. (1979) obtiveram as relações entre a combinação espectral linear Diferença Normalizada e as Biomassas fresca e seca para o milho e para a soja (Figuras 19a,b,c e d).

Conforme indicam estes autores, os valores iniciais, tanto para a Diferença Normalizada como para a Biomassa, foram baixos para ambas as culturas (milho e soja). Dentro de quatro semanas para a soja e de seis semanas para o milho, os valores da

Diferença Normalizada atingiram um máximo, porém a biomassa continuou a aumentar.

Nas Figuras 2.19 (a) e (c), quando a curva inicia a se tornar assintótica (Biomassas Fresca e Seca de cerca de 12000 kg/ha e 2500 kg/ha, respectivamente), o dossel da soja atingiu a máxima Porcentagem de Cobertura vegetal sobre o terreno (COV); isto é evidenciado justamente pela natureza assintótica da Diferença Normalizada versus Biomassa. Após este ponto de início da tendência assintótica (Figura 2.19c), a COV permaneceu constante e continuou, com o tempo, a produzir os fotossintetizados que aumentaram a Biomassa Seca acima da superfície. Esta relação permaneceu constante até que a soja atingiu a senescência (cerca de 9000 kg/ha de Biomassa Seca) e os valores da DN começaram a diminuir, juntamente com uma diminuição nas Biomassas Seca e Fresca. Conforme ressaltam TUCKER et al. (1979), a redução da Biomassa Fresca resultou da maturação das plantas e conseqüente perda de umidade devido à senescência; a redução da Biomassa Seca resultou de perdas de folhas secas e de pecíolos das plantas senescentes.

Com relação ao milho, as relações temporais entre a Diferença Normalizada e a Biomassa foram menos evidentes (Figuras 2.19b e d), possivelmente devido às dificuldades encontradas nas medições, conforme assinalam os autores. A diminuição nos valores da Diferença Normalizada ocorreu devido à clorose (amarelecimento) das folhas e à associada queda de folhas; a redução na densidade de clorofila resultou no decréscimo da Diferença Normalizada.

Finalizando, os autores afirmam que o "fenômeno de trajetória" (indicado pelas setas nas Figuras 2.19a, b, c e d), nas relações entre a Diferença Normalizada e a Biomassa com o tempo, mostra a íntima relação das variáveis de reflectância no vermelho e no infravermelho próximo com o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

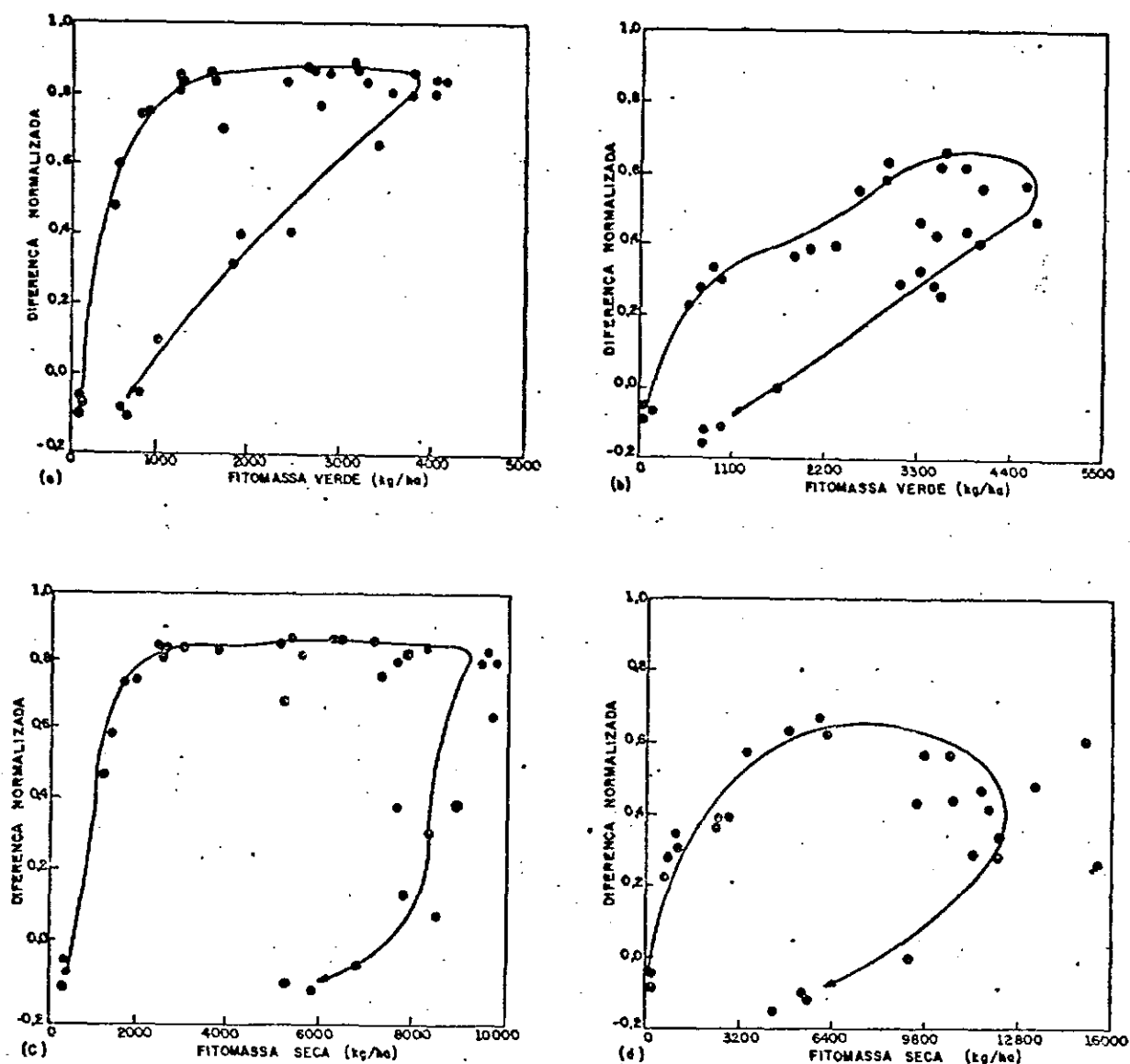


Figura 2.19- Relações entre a Diferença Normalizada e (a) Biomassa Fresca de soja; (b) Biomassa Fresca de milho; (c) Biomassa Seca de soja; e (d) Biomassa Seca de milho. As setas indicam o "fenômeno de trajetória" dos dados (Adaptado de TUCKER et al., 1979).

KIMES et al. (1981) encontraram tendências muito similares às encontradas por TUCKER et al. (1979) para as relações entre a Diferença Normalizada e as Biomassas Fresca e Seca, corroborando-lhes as indicações e concluindo que o sensoriamento remoto "in situ" pode ser aplicado como técnica não-destrutiva para se estimar variáveis agrônômicas do milho altamente relacionadas com o "status" fisiológico do dossel desta cultura.

2.4. Modelos de reflectância de dossel

Neste subcapítulo, dados os objetivos da presente pesquisa, pretende-se fornecer alguns conceitos sobre modelos de reflectância, bem como uma breve revisão de sua evolução. Isto visando contextualizar a importância da modelagem como forma de integrar os conhecimentos sobre as interações entre as propriedades refletivas e os parâmetros biofísicos descritores dos dosséis agrícolas.

Desde os primórdios do Sensoriamento Remoto em Agricultura, pode-se dizer que muitos programas de pesquisa têm sido encetados com o objetivo de obter um entendimento cada vez melhor sobre as complexas interações entre a radiação solar na porção espectral do visível e do infravermelho próximo e os vários parâmetros dos dosséis de culturas.

Isto porque o entendimento científico do sensoriamento remoto multiespectral aplicado ao inventário e ao monitoramento do crescimento de culturas agrícolas é baseado nos fundamentos físicos das interações da radiação solar com a atmosfera terrestre e com os dosséis daquelas culturas.

A reflectância espectral de um dossel, como se sabe, depende não só de sua estrutura e de seu conteúdo biológico, mas também dos ângulos de iluminação e de visada, dado que superfícies vegetadas não têm comportamento perfeitamente lambertiano.

Visando integrar todos estes aspectos, bem como os seus interrelacionamentos, vêm sendo muito utilizados, principalmente a partir de fins da década de 60, os modelos de reflectância de dosséis vegetais.

GOEL (1988) faz uma interessante e completa revisão sobre os modelos de reflectância de dosséis vegetais, com relação ao seu uso na estimação de parâmetros biofísicos destes dosséis a partir de dados de reflectância.

Como explica o autor, todo o sistema envolvido no sensoriamento remoto de vegetação é constituído pelos seguintes subsistemas: a fonte de radiação (normalmente é o Sol), a atmosfera, o dossel vegetal, o solo e o detector.

O sistema completo é mostrado na Figura 2.20. A radiação solar incide no topo da atmosfera e parte desta radiação é espalhada/refletida pelas partículas e outra parte atravessa e é refletida pelo dossel e pelo solo. A radiação espalhada/refletida é detectada por um detector colocado num veículo, num helicóptero, num avião ou num satélite.

Cada um dos cinco subsistemas é caracterizado por um conjunto de propriedades/parâmetros, representados na Figura 20 por $\{a_i\} \dots \{e_i\}$, de tal modo que o conjunto $\{R_i\}$ de atributos da radiação recebida pelo detector é dependente de comprimento-de-onda, tempo e detalhes espaciais introduzidos pela atmosfera, pelo dossel e pelo solo. Em geral, ter-se-á, então:

$$R_i = f(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i) \quad (\text{Eq. 3})$$

onde a função f compreende os processos de transferência radiativa que produzem o conjunto $\{R_i\}$.

GOEL (1988) salienta ainda que há dois aspectos da equação (3) entre a radiação detectada e os parâmetros do sistema, aspectos estes bastante relevantes para o sensoriamento remoto:

(a) um aspecto envolve a definição ou a derivação de uma função ou de um algoritmo que produzirá o conjunto $\{R_i\}$, dadas as características do sistema $\{a_i, b_i, c_i, d_i, e_i\}$. Este pode ser referido como um problema direto ou o problema da modelagem da reflectância de dossel;

(b) o segundo aspecto envolve a definição ou a derivação de uma função, relação ou algoritmo g que gerará o conjunto $\{c_i\}$ de parâmetros que caracterizam o dossel a partir do conjunto medido $\{R_i\}$. Simbolicamente, g é especificado por:

$$\{c_i\} = g(R_i, a_i, b_i, d_i, e_i) \quad (\text{Eq.4})$$

Este pode ser referido como o problema inverso, ou seja, o problema de se estimar parâmetros de dossel a partir de dados de reflectância.

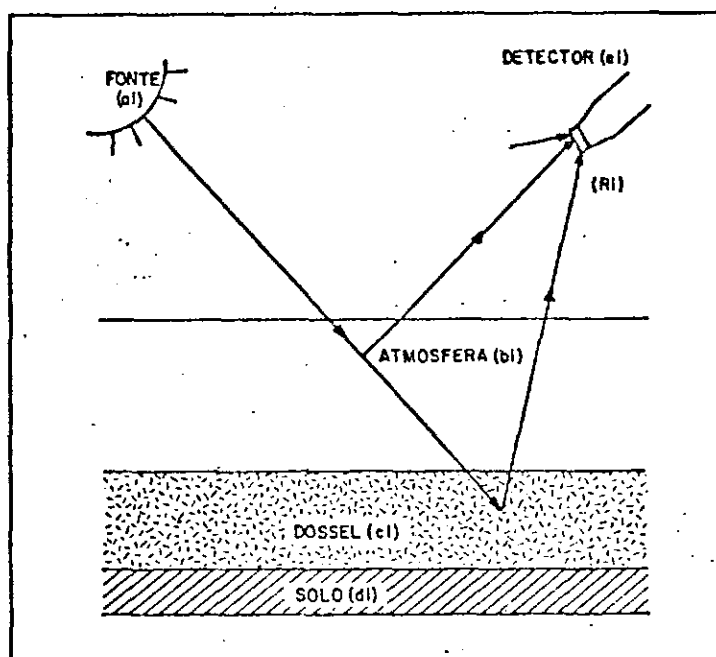


Figura 2.20- Configuração do sistema completo de Sensoriamento Remoto (Adaptado de GOEL, 1988).

Na Figura 2.21 apresenta-se esquematicamente o relacionamento entre o problema direto, as medições e o problema inverso.

Como ressalta o autor, a solução do problema direto é um pré-requisito para resolver o problema inverso. Desta maneira, os primeiros anos dedicados à modelagem da reflectância dos dosséis foram devotados ao problema direto. Devido ao fato de que o número de medições de reflectâncias usualmente é menor do que o número de parâmetros que as determina, o problema inverso é mais difícil de resolver, contudo tem maior relevância prática.

BUNNIK (1984), que faz uma boa revisão sobre os modelos de reflectância de dosséis vegetais, reporta que, nas últimas décadas, têm sido desenvolvidos modelos matemáticos para estudos de fotossíntese, de crescimento de plantas e, também, para aplicações em Sensoriamento Remoto.

Em Sensoriamento Remoto, os modelos matemáticos são usados como uma ferramenta a fim de melhorar o entendimento da relação entre a radiação refletida (e medida) num determinado conjunto de

bandas espectrais (posicionadas dentro das janelas de transmitância atmosférica) e a geometria de irradiação e de visada, a estrutura do dossel e as propriedades ópticas dos componentes do dossel, em particular as folhas das plantas.

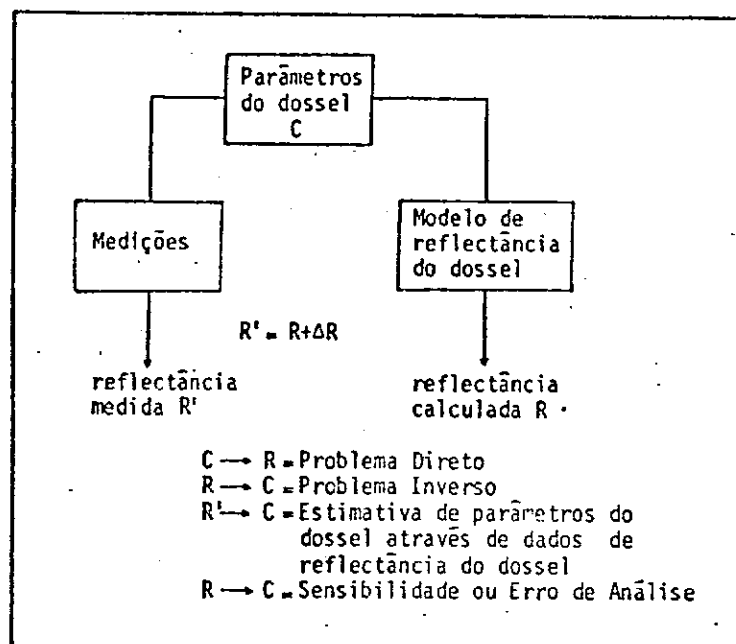


Figura 2.21- Representação esquemática do problema direto, do problema inverso e da estimativa de parâmetros de dossel a partir de dados de reflectância (GOEL, 1988).

Em todos os trabalhos relacionados com o assunto, constata-se que os esforços de modelagem iniciaram-se considerando-se a interação da radiação com folhas individuais; sendo que uma das primeiras tentativas foi o método do raio traçador usado por WILLSTÄTER e STOLL (1918). Assim, modelos de secção transversal foliar foram usados para calcular a reflexão e a refração de raios de luz nas interfaces entre paredes celulares e cavidades de ar. Após a ocorrência de espalhamento múltiplo, são estimadas os totais de radiações refletidas e transmitidas.

Outra abordagem bastante citada é a escolhida por ALLEN et al. (1969) em que são calculadas as reflexões múltiplas do fluxo difundido entre duas interfaces, para o caso de uma folha compacta sem cavidades de ar.

Em seguida GAUSMAN et al. (1970) estenderam aquele, assim denominado, "modelo das placas" de ALLEN et al. (1969) para folhas com cavidades de ar entre as paredes celulares.

O primeiro modelo abordando reflectância difundida por um dossel de plantas foi desenvolvido por ALLEN e RICHARDSON (1968). Trata-se de modelo de transferência isotrópica uni-dimensional, o qual foi baseado na teoria de Kubelka e Munk sobre estudos ópticos de superfícies pintadas.

ALLEN e RICHARDSON (1968) aplicaram o seu modelo para determinar a influência do número de camadas foliares do dossel na reflectância difundida para cima. O modelo explicou satisfatoriamente o espalhamento múltiplo no infravermelho, o qual faz com que a reflectância aumente, mesmo depois que a cobertura do solo esteja completa, enquanto o índice de área foliar tiver aumentos adicionais. O modelo também explicou o comportamento assintótico da reflectância do dossel para altos valores do IAF.

A partir do início da década de 1970, foram surgindo outros modelos de reflectância de dossel, os quais introduziam modificações e melhoramentos em relação aos modelos anteriores, podendo ser citados os seguintes: IDSO e DeWIT (1970), SUITS (1972), VERHOEF e BUNNIK (1976) e VERHOEF (1984).

A limitação atribuída à maioria dos modelos até aqui citados é o seu caráter uni ou bi-dimensional; ou seja, obtém-se uma reflectância média, independente da localização, uma vez que se assume que os dosséis estendem-se infinitamente na direção horizontal.

Em função disto, KIMES e KIRCHNER (1982) desenvolveram um modelo tridimensional, que permite o cálculo da distribuição espacial da reflectância direcional a partir de módulos. O processo de interação dentro de cada célula é suposto como espalhamento isotrópico.

Como afirma BUNNIK (1984), quando o caráter estocástico das propriedades geométricas e ópticas dos dosséis de plantas é

considerado, tais modelos tridimensionais também poderiam ser aplicados para simular a difusão espacial da reflectância direcional, ao invés do valor médio.

Um modelo baseado numa abordagem estocástica é o modelo de reflectância de dossel de SMITH e OLIVER (1972). O método de Monte Carlo de escolhas aleatórias é aplicado para o traçado dos fluxos penetrante e espalhado dentro do dossel. Dentro de cada camada estratificada horizontalmente os elementos do dossel são distribuídos aleatoriamente. As funções de distribuição da inclinação e do azimute foliar são subdivididas em intervalos de igual probabilidade. A radiação incidente está originando-se de 20 setores do hemisfério celeste. A penetração do fluxo vindo de uma fonte é determinada pela geração aleatória de um número entre 0 e 1 e pela probabilidade de um buraco em cada camada. Na camada onde o choque ocorre, um componente do dossel com uma determinada orientação e propriedades ópticas é selecionado ao acaso. O fluxo secundário devido ao espalhamento é adicionado ao campo interno de fluxo dividido segundo os 20 setores mencionados. A penetração do fluxo secundário é também determinada pelo processo de Monte Carlo para escolha do traçado. Finalmente, após o traçado repetitivo do fluxo gerado, dentro de cada camada e para cada setor, o fluxo radiante é determinado após a convergência. Dado que o valor de convergência para cada ciclo de cálculo é dependente da seleção aleatória da penetração de fluxo e de espalhamento anisotrópico, cálculos sucessivos mostrarão uma variação estocástica da reflectância direcional. Desta maneira, o caráter estocástico da reflectância de dossel pode ser estudado a partir de um ponto de vista do modelamento.

Para um maior detalhamento sobre os modelos de reflectância de dossel, podem ser selecionados excelentes trabalhos de revisão como o de BUNNIK (1984) e o de GOEL (1988).

Em termos de pesquisas brasileiras relacionadas com modelagem de dossel, muito poucas investigações foram realizadas.

Pode-se, inicialmente, citar o trabalho de RUDORFF (1985), em que, utilizando dados MSS/Landsat da cana-de-açúcar, o autor

obteve os índices de vegetação Razão Simples (IVP/V) e índice de Vegetação Transformado $((\sqrt{(IVP-V)/(IVP+V)}+0,5))$. Em seguida, através destes índices e dos valores de rendimento da referida cultura, foram obtidas equações de regressão, ou seja, modelos que explicaram, no caso da Razão Simples, até cerca de 56% da variação na produtividade da cana-de-açúcar.

Para a cultura de trigo, RUDORFF e BATISTA (1988, 1989a,b) utilizaram dados TM/Landsat em forma de índices de vegetação conjuntamente com dados agrometeorológicos. Concluíram que o uso dos dois tipos de dados de maneira integrada melhorou significativamente o modelo para obtenção da produtividade daquela cultura, quando comparado ao uso de índices de vegetação ou de dados agrometeorológicos, separadamente.

Além destes trabalhos mais diretamente envolvidos com modelagem/produtividade, há ainda alguns outros em que os objetivos estão mais voltados para o entendimento das relações entre variáveis agronômicas e variáveis espectrais, visando-se fornecer subsídios a futuros esforços de modelagem de produtividade de culturas/reflectância de dosséis, tais como as pesquisas de FORMAGGIO e EPIPHANIO (1988), BATISTA e RUDORFF (1988), EPIPHANIO e FORMAGGIO (1987 e 1988) e BATISTA et al. (1988).

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Introdução

Grande parte do desenvolvimento científico é conseguido através da realização e análise de experimentos.

Em termos de sensoriamento remoto em nível orbital, a caracterização do que seja um experimento tem de ser levada em consideração em qualquer pesquisa que tenha essa característica. Tradicionalmente, em pesquisas agronômicas ao se tratar com experimentos, o que vem à mente são pequenas parcelas, vasos, grupos de animais, e todos com elevado grau de controle e rígida subordinação de tratamentos ao pesquisador. Os tratamentos e o delineamento são estabelecidos e o pesquisador implanta exatamente aquilo que foi planejado. Entretanto, à medida que as dimensões do experimento se acentuam, a variabilidade de condições externas ao experimento aumentam em prejuízo do controle do experimento e da uniformidade de determinado tratamento.

Quando se parte para a realização de um experimento agrícola de campo compatível com dados de satélite, a variabilidade da natureza exerce-se na sua plenitude, de tal modo que o enfoque a ser adotado pelo pesquisador passa a ser o de delinear seu experimento e sair à procura de situações que mais se aproximem daquele modelo de experimento idealizado. Isso ocorre

devido às grandes dimensões físicas dos objetos necessárias à obtenção de medidas por sensoriamento remoto e à impossibilidade de se implantar um experimento rigidamente controlado onde as parcelas individuais tenham suas dimensões medidas em hectares.

Outro aspecto a ser levado em consideração nesse tipo de pesquisa é o da dificuldade de se estabelecerem as variáveis serem estudadas. É importante ter o discernimento para procurar as variáveis que possam alterar um sinal eletromagnético captado no nível orbital, ou seja, tais variáveis devem ter extensão espacial suficiente para serem percebidas, devem provocar alterações espectrais passíveis de serem detectadas ou devem ser temporalmente variáveis para poderem ser distinguíveis em abordagens multitemporais.

3.2. Descrição geral das áreas de estudo

As áreas de estudo estão situadas na região noroeste do Estado de São Paulo, principalmente nos municípios de Barretos, Guairá e Colômbia (Figura 3.1).

Segundo a compartimentação geomorfológica regional proposta por IPT(1981a), as áreas correspondentes aos três módulos de estudo situam-se nas Áreas Indivisas do Planalto Ocidental. Nelas ocorre a presença de relevos de colinas amplas, com densidades de drenagem pouco maiores nas áreas sedimentares do que naquelas áreas desenvolvidas sobre rochas basálticas. Nas áreas basálticas, a marcante persistência de formas colinosas do tipo colinas médias e principalmente de colinas amplas é uma condição que parece estar ligada a uma espessura e permeabilidade dos solos, favorecendo a percolação de água em subsuperfície, e o aparecimento de lagos perenes ou temporários, além de resultar num maior espaçamento dos cursos d'água.

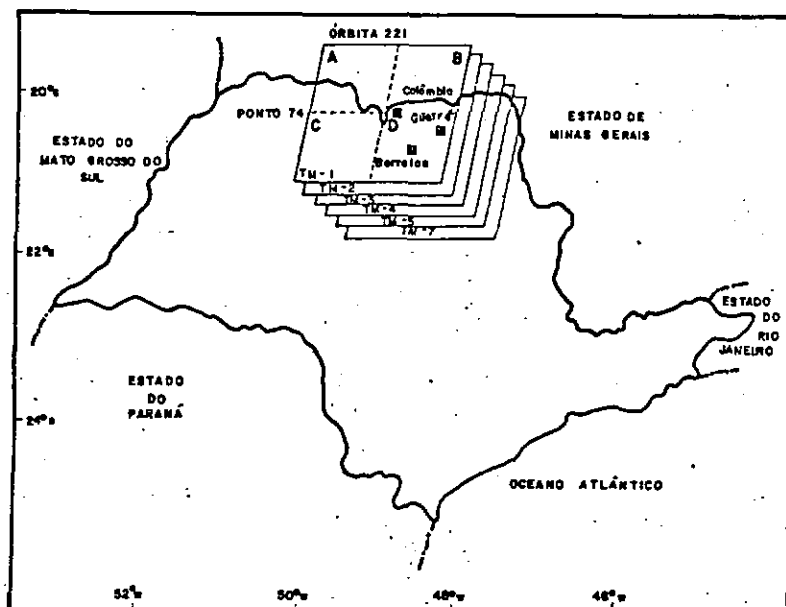


Figura 3.1- Localização da área de estudo a NW do Estado de São Paulo, e ilustração da imagem TM/Landsat da órbita 221/ponto 74.

O detalhamento descritivo das unidades litoestratigráficas é feito com base em IPT (1981b), conforme segue:

- JKsg - Formação Serra Geral (Grupo São Bento), constituída de rochas vulcânicas toleíticas em derrames basálticos de coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos, finos a médios, e esparsos níveis vitrofíricos não individualizados;
- Ka - Formação Adamantina (Grupo Bauru), constituída de depósitos fluviais com predominância de arenitos finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltitos arenosos e argilitos, ocorrendo em bancos maciços;
- Qi - Sedimentos Continentais Indiferenciados, que são depósitos continentais incluindo sedimentos elúvio-coluvionares de natureza areno-argilosa e depósito de calha e/ou terraço.

Os materiais geológicos acima descritos originaram solos com horizontes B - latossólicos, de maneira absolutamente predominante, sendo que os limites pedológicos geralmente confundem-se com os limites litoestratigráficos. Desta maneira, segundo CNEPA (1960), ocorrem os solos: Latossolo Roxo (LR)

(principalmente nos módulos de Guaira e Barretos); Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (pequena mancha no município de Guaira); e Latossolo Vermelho Escuro (nos municípios de Barretos e Colômbia).

Na região predomina o tipo climático Aw de Köppen, clima tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (maio a setembro), sendo julho o mês em que a seca atinge a maior intensidade, um dos fatores limitantes para culturas não irrigadas de inverno. O índice pluviométrico varia entre 1100 e 1300mm anuais (CNEPA, 1960).

De maneira geral, a região pode ser considerada de ocupação agro-pastoril, ocorrendo extensas e contínuas áreas de pastagens, pouca vegetação natural primitiva e uma grande quantidade de áreas utilizadas com culturas anuais de sequeiro e, principalmente, por grandes sistemas de aspersão do tipo "pivô central". Sistema este que começou a ser utilizado na década de 70, vem passando por um grande incremento e faz do município de Guaira, por exemplo, o que apresenta uma das maiores quantidades de áreas irrigadas por aspersão do Brasil.

As culturas de maior interesse são o feijão, o trigo, o milho, a cana-de-açúcar, o sorgo, o tomale, a soja, vindo os citros numa posição secundária.

3.3. Seleção de áreas/acompanhamento das culturas

A região de Barretos/Guaira/Colômbia possui excelentes condições sob o ponto de vista do sensoriamento remoto de culturas, dadas algumas características como:

- predominância de relevo suave ondulado a plano: condição que minimiza o efeito topográfico sobre o ângulo de incidência de luz solar, concorrendo para uma iluminação uniforme do terreno, como afirma Koffler (1982);

- ocorrência de áreas agrícolas irrigadas por pivôs centrais, com grandes dimensões (60 a 100ha), compatíveis com as especificações dos sensores orbitais existentes;

- ocorrência de culturas de inverno, época do ano em que há melhores probabilidades de obtenção de imagens de satélite livres de cobertura de nuvens;

- predominância de três tipos de solos de grande importância e representatividade agrícola em termos de Estado de São Paulo: Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Vermelho - Amarelo; e,

- dominância de bom nível cultural dos proprietários, os quais facilitam o acesso às suas fazendas e mantêm bons registros de controles agronômicos das suas plantações.

Assim, de posse de uma imagem TM/Landsat-5 de 1985, bem como de informações advindas de contatos efetuados com técnicos da região foram selecionadas várias áreas de trigo (Triticum aestivum, L.) e de feijão (Phaseolus vulgaris, L.), dentro dos três municípios.

Selecionadas as áreas e efetuados os devidos contatos com os respectivos proprietários foram iniciadas missões de coleta de dados "in situ" para vários parâmetros agronômicos, visando fazer o acompanhamento das condições das culturas do trigo e do feijão durante os seus respectivos ciclos biológicos.

A fim de facilitar e ordenar os trabalhos em cada local, elaborou-se uma ficha de campo onde os seguintes itens deviam ser preenchidos para cada área em cada missão de campo: código da área, módulo, missão, data, observadores, cultura, variedade, data de plantio, orientação das fileiras, espaçamento, altura média, número de plantas/metro linear, número de folhas verdes/planta, número de folhas secas/planta, peso de matéria verde/"n"plantas, área foliar, uniformidade de cultura, porcentagem de cobertura do solo pelas plantas (estimativa visual), umidade do solo, estágio vegetativo, número do

filme/número da foto, observações gerais, croqui dos pontos de coleta.

Cabe ressaltar aqui que cada missão de acompanhamento das culturas/coleta de dados agronômicos e espectrais foi levada a efeito em datas praticamente simultâneas com as passagens do satélite Landsat sobre a região de estudo (quadrante E da imagem da órbita 221 ponto 74). Como o número de áreas era grande e eram muitos os procedimentos em cada área, foram necessários, em média, três dias antes e três depois de trabalho ao redor das datas de passagem do satélite.

Para a campanha de coleta de dados de 1986, foram utilizadas imagens obtidas pelo satélite Landsat-5, gravadas em fitas magnéticas compatíveis com computador (CCT's), e referentes às passagens de 01/06/86, 17/06/86, 19/07/86, 04/08/86, e 21/09/86. Para a gravação em fitas CCT foram utilizadas as bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, e TM7 referentes ao quadrante D+3 segundos. Para tanto foram necessárias duas fitas magnéticas por data de passagem, já que cada fita magnética de 2.400' comporta a gravação de três bandas de um quadrante.

É importante ressaltar que, embora se tenha optado pela realização deste trabalho na estação seca do ano, tendo como um dos motivos a minimização do problema de cobertura de nuvens, das nove passagens ocorridas entre meados de maio e fins de setembro de 1986 apenas cinco puderam ser aproveitadas. E dessas cinco, uma (21/09/86) ocorreu quando a maioria das áreas já havia sido colhida, e outra (01/06/86) quando grande parte das áreas estava apenas recém-plantada; além disso, ambas apresentavam-se parcialmente cobertas por nuvens, prejudicando seu uso. Assim, apenas três passagens (17/06/86), 19/07/86, e 04/08/86) puderam ser plenamente aproveitadas.

Na Tabela 3.1 são apresentados os dados referentes à campanha de 1987.

Além das fitas magnéticas e do sistema de processamento de imagens do INPE (I-100) foram utilizados equipamentos de

laboratório como balança, espectrofotômetro, planímetro eletrônico. Os equipamentos de campo foram os necessários ao acondicionamento de amostras, às medidas métricas, além de bússola e equipamento fotográfico. Para os cálculos estatísticos foi utilizado o computador central do INPE, além de microcomputadores.

Tabela 3.1- Datas das passagens Landsat, datas das campanhas de campo e % de cobertura de nuvens (1987).

DATAS DAS IMAGENS	DATAS DAS CAM- PANHAS DE CAMPO	Nº DA MISSÃO	% COB. NUVENS
19/maio/87	19 a 23/maio/87	(a)	60%
04/jun./87	31/maio-06/jun./87	1ª	90%
20/jun./87	17 a 23/junho/87	2ª	10%
06/jul./87	04 a 10/julho/87	3ª	0%
22/jul./87	20 a 25/julho/87	4ª	(b)
07/ago./87	03 a 08/agosto/87	5ª	90%
23/ago./87	18 a 23/agosto/87	6ª	(c)
08/set./87	04 a 10/set./87	7ª	100%

(a) Missão efetuada para localização das áreas e contatos com os respectivos proprietários.

(b) Imagem não gravada devido a manutenção automática no próprio satélite.

(c) Imagem não gravada devido a problemas técnicos na Estação de Recepção de Cuiabá (MT).

Por este quadro percebe-se que só foi possível utilizar duas das sete passagens disponíveis, ou sejam, as referentes à 2ª e 3ª missões de campo, para os dados de 1987.

3.4. Coleta de parâmetros agronômicos

Muitos parâmetros de culturas têm sido estudados visando verificar-se a existência de relações com o comportamento

espectral destas culturas. Estes parâmetros devem ser indicadores do grau de desenvolvimento, do vigor e das condições gerais das culturas em questão. Os parâmetros e os respectivos métodos de coleta são descritos a seguir:

a) Peso da Matéria Verde (PV) - obtido pela pesagem direta de várias amostras de plantas coletadas ao acaso dentro de cada área, em balança portátil (capacidade para 1,610Kg) com precisão de 0,1g. Os valores finais são dados em unidades de g/planta.

b) Peso da Matéria Seca (PS) - uma parte das amostras de peso da matéria verde era acondicionada em sacos de papel identificados para cada área. Estas amostras eram, então, levadas para estufa com ventilação forçada, onde permaneciam por 24 a 48 horas a uma temperatura média de 75°C. Os valores finais são dados em unidades de g/planta.

c) Teor de Umidade (TUX) - tendo-se os valores de PV e de PS, a porcentagem de umidade era obtida através de cálculos, conforme a Equação (5).

$$TUX = \frac{PV - PS}{PV} \times 100 \quad (Eq.5)$$

Notar que os TUX não eram correspondentes aos do momento da passagem do satélite e, sim aos do momento da coleta das amostras para PV, podendo então ter havido modificações em função de irrigação ocorrida entre o momento da coleta e o da passagem Landsat.

d) Área Foliar (AF) - este parâmetro era obtido de maneira diferente para cada cultura. No caso do trigo, assumiu-se a forma da folha retangular, obtendo-se a área a partir de medidas de comprimento e largura foliar. Desta maneira, através de várias amostras, obtinha-se a área foliar por planta, dada em cm²/pl.

Quanto à área foliar para o feijão, inicialmente foi obtido um grande número de amostras de folhas de feijão, as quais foram pesadas; em seguida, as folhas de cada amostra pesada eram decalcadas em papel e, posteriormente, a área era medida através de mesa digitalizadora acoplada em microcomputador PC, conforme "software" adequado para medição de áreas. Assim, de posse de vários pares de peso x área aplicou-se procedimento estatístico de regressão linear, em que a área foi mantida como variável dependente. Na Figura 3.2 são apresentados o diagrama de dispersão e a equação de reta obtidos.

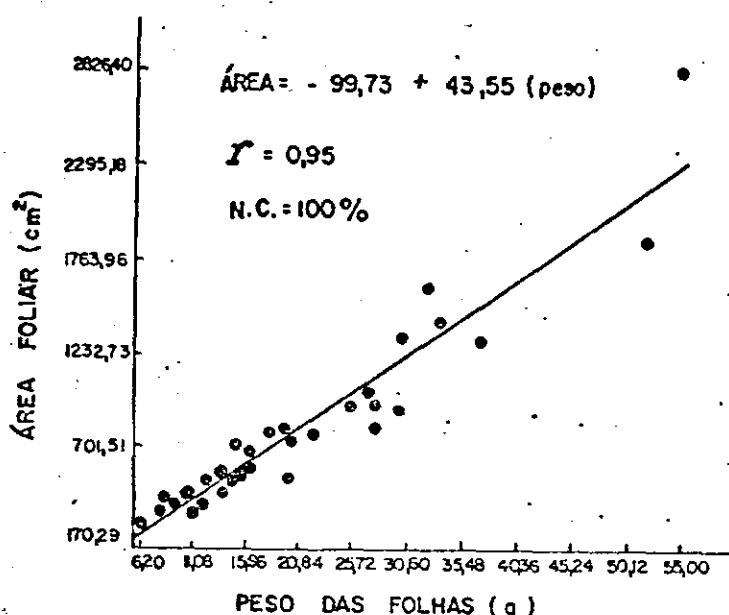


Figura 3.2- Diagrama de dispersão e equação de regressão para as variáveis peso das folhas versus área foliar para o feijão (para os dados de 1987).

Assim, por questões de maior simplicidade, no campo as amostras de folhas eram pesadas e, posteriormente, através da

equação já referida, obtinham-se as áreas foliares. Os valores finais para esta variável são dados em área foliar média por planta, em unidades de cm^2/pl .

e) índice de Área Foliar (IAF) - este parâmetro é definido como a relação entre a área foliar total e a área de solo disponível para a planta. Assim, de posse da área foliar média por planta, do espaçamento médio e do número médio de plantas por metro linear, calculou-se o parâmetro IAF, conforme a Equação (6).

$$\text{IAF} = (\text{NPM} \times \text{AF})/\text{EF} \quad (\text{Eq.6})$$

onde:

NPM = número médio de plantas por metro linear
(plantas/m);

AF = área foliar média por planta (m^2/planta);

EF = espaçamento médio entre fileiras (m).

Este procedimento para o cálculo do parâmetro IAF já fora utilizado por EPIPHANIO (1988).

f) Fitomassa (FIT) - os valores para este parâmetro foram obtidos por simples cálculos, envolvendo os dados de peso da matéria verde e de número médio de plantas por metro linear, conforme a Equação (7).

$$\text{FIT} = \text{PV} \times \text{NPM} \text{ (g/m)} \quad (\text{Eq.7})$$

onde:

PV = peso médio da matéria verde por planta (g/planta);

NPM= número médio de plantas por metro linear
(plantas/m).

g) Porcentagem de Cobertura Vegetal (COV) - este parâmetro visa avaliar, numa visada vertical, a quantidade de material vegetal verde da cultura que está cobrindo a superfície do terreno na data de obtenção da imagem de satélite (ou em data a mais próxima possível). Para isso, em cada área, foi obtida uma fotografia vertical com câmara manual erguida a cerca de dois

metros de altura, procurando-se tomar uma amostra que representasse as condições de cobertura vegetal da área. Sobre a fotografia é feita, então, a determinação da quantidade de cobertura vegetal dada pela cultura através de uma grade de pontos compatível com a fotografia, fazendo-se, em seguida, o cálculo da porcentagem. Método semelhante já fora utilizado por HEILMAN et al. (1981) e por EPIPHANIO (1988).

h) Rendimento Estimado (RE) - nas últimas missões de campo (mais especificamente na 6ª e na 7ª missões), muitas áreas de trigo e de feijão já estavam praticamente maduras e em ponto de colheita. Dados os objetivos deste projeto de se investigar também as relações das variáveis espectrais com a produtividade, foram coletados dados para o RE. Para isso, em cada área considerada em ponto de colheita, eram delimitadas três amostras de 1m², ao acaso, nas quais todas as vagens (no caso do feijão) ou todas as espiguetas (para o trigo) eram colhidas e embaladas em sacos previamente identificados. Em seguida, os grãos eram separados da palha e pesados obtendo-se o peso de grão por m². Com a média das três amostras, por expansão direta, calcula-se o rendimento esperado em Kg/ha.

Cabe salientar que, no caso do feijão, muitas amostras de vagens estavam com um teor de umidade muito elevado e foram deixadas em estufa por 24 horas a cerca de 70°C, antes da pesagem dos grãos.

i) Rendimento Declarado (RD) - quando se chegava numa determinada área para a respectiva coleta de seus parâmetros agronômicos e a cultura já havia sido colhida, procurava-se o proprietário que fornecia o rendimento encontrado na colheita, em Kg/ha, mesmo nos casos de se ter RE, quando possível também se obteve RD.

Os parâmetros: Número de Folhas Verdes/Planta, Número de Folhas Secas/Planta, Altura Média das Plantas, Espaçamento e Número de Plantas/Metro Linear foram obtidos por medições ou por contagem diretas, conforme o caso.

3.5. Aquisição dos parâmetros espectrais

Os parâmetros espectrais, sobre os quais se fundamentaram as diversas análises do presente trabalho, provieram de sensores colocados em dois níveis de coleta: ou seja, no nível orbital (dados TM/Landsat-5) e no nível de campo (radiometria). A seguir são fornecidos subsídios a respeito das metodologias de aquisição dos dados espectrais nos dois níveis.

3.5.1 - Dados do TM/Landsat-5

Inicialmente convém descrever, ainda que de forma resumida, alguns detalhes operacionais do sistema LANDSAT, a fim de propiciar melhor entendimento sobre vários procedimentos adotados neste trabalho.

O primeiro satélite Landsat era, originariamente denominado ERTS ("Earth Resources Technology Satellite") e foi lançado em 23 de julho de 1972 pela NASA.

Dois outros satélites praticamente iguais foram lançados em anos posteriores, sempre tendo a bordo como principal sistema sensor o "Multispectral Scanner Subsystem" (MSS). A repetitividade de obtenção de imagens do mesmo ponto terrestre (cobrindo 185Km x 185Km cada imagem) era de 18 dias, sempre à mesma hora solar local. A resolução espacial era de 79 metros, com quatro bandas espectrais (entre 400 e 1100nm).

Incorporando avanços e melhorias tecnológicas em relação ao MSS, em julho de 1982 foi colocado em órbita, a bordo do Landsat-4, o sensor "Thematic Mapper" (TM). Esses avanços incluem melhor resolução espacial (30m x 30m para as bandas do visível e do infravermelho refletido), maior número de faixas

espectrais (6 bandas no espectro refletido e 1 banda no termal) e localizadas em novas regiões do espectro eletromagnético em um maior número de níveis de quantização dos dados (256 níveis no TM e 64 no MSS) levando a uma maior sensibilidade radiométrica .

Em março de 1984 foi lançado o Landsat-5, também portando os sensores MSS e TM, os quais ainda atualmente encontram-se em operação; o TM/Landsat-4 já foi desativado. A repetitividade dos dados do Landsat-5 é de 16 dias.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as sete bandas do TM/Landsat-5 e as principais aplicações potenciais que foram consideradas para a seleção de cada banda.

Tabela 3.2- Bandas do sensor TM/Landsat-5 e suas principais aplicações potenciais

BANDA	INTERVALO ESPECTRAL (μm)	APLICAÇÕES POTENCIAIS
1	0,45 - 0,52	Estudos batimétricos em regiões de águas limpas. Sensitividade à concentração de carotenos e clorofila.
2	0,52 - 0,60	Mapeamento de vegetação sadia pela reflectância verde, cujo pico se situa em 0,55 μm .
3	0,63 - 0,69	Banda de absorção da clorofila; significativa na diferenciação de espécies vegetais.
4	0,76 - 0,90	Estudos de volume da biomassa e delineação de corpos d'água.
5	1,55 - 1,75	Estresses de vegetação por desequilíbrio de água na cobertura foliar.
6	10,4 - 12,5	Propriedades termais do solo, rocha vegetação e água. Estudos de contraste térmico entre litologias silicáticas.
7	2,08 - 2,35	Considerada estritamente para fins geológicos; selecionada para identificar minerais com íons hidroxilas.

FONTE: NASA (1984a).

Descrições mais detalhadas sobre vários aspectos operacionais do sistema TM/Landsat podem ser encontradas em USGS (1984), NASA (1984b), MENEZES (1986) e EIPHANIO (1988).

Convém ainda assinalar que os produtos gerados pelo sensor TM podem ser armazenados em fitas compatíveis com o computador (ou "computer compatible tapes", CCT's), ou seja, podem ser manipulados automaticamente, constituindo-se, então, em imagens digitais.

Uma imagem digital é uma representação numérica de um produto qualquer, obtido através de sensores. A imagem analógica tem a sua área particionada em um número finito de sub-áreas minúsculas (também denominadas "células de resolução" ou "pixels"); a cada sub-área é atribuído um valor de nível de cinza (que pode variar de 0 a 255) proporcional à sua radiância. Desta maneira, uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz bi-dimensional de pixels, cujos níveis de cinza podem variar entre 0 e 255, onde os pixels com valores menores aparecerão com tonalidades mais escuras e vice-versa (Figura 3.3).

As imagens digitais apresentam a grande vantagem (sobre as imagens analógicas) de poderem ser armazenadas em fitas magnéticas compatíveis com o computador ("compatible computer tapes" ou CCT's), para posteriores processamentos em computadores.

Cada pixel está associado a um nível de cinza, que é uma representação numérica quantizada dos valores de radiância correspondentes a cada pequena área unitária imageada no terreno (30m x 30m, para o TM). Somente valores discretos ou inteiros de níveis de cinza são associados aos pixels.

Assinale-se que, além da dimensão espacial ou geométrica (tamanho e disposição dos pixels em formato de matriz bi-dimensional) da imagem digital, há ainda a dimensão espectral (no caso do TM, sete bandas) e a dimensão temporal (a cada 16 dias se tem uma imagem do mesmo local terrestre, para o TM/Landsat).

Assim, uma imagem digital obtida por satélite pode ser considerada como uma matriz multidimensional de níveis de cinza referentes a uma cena terrestre.

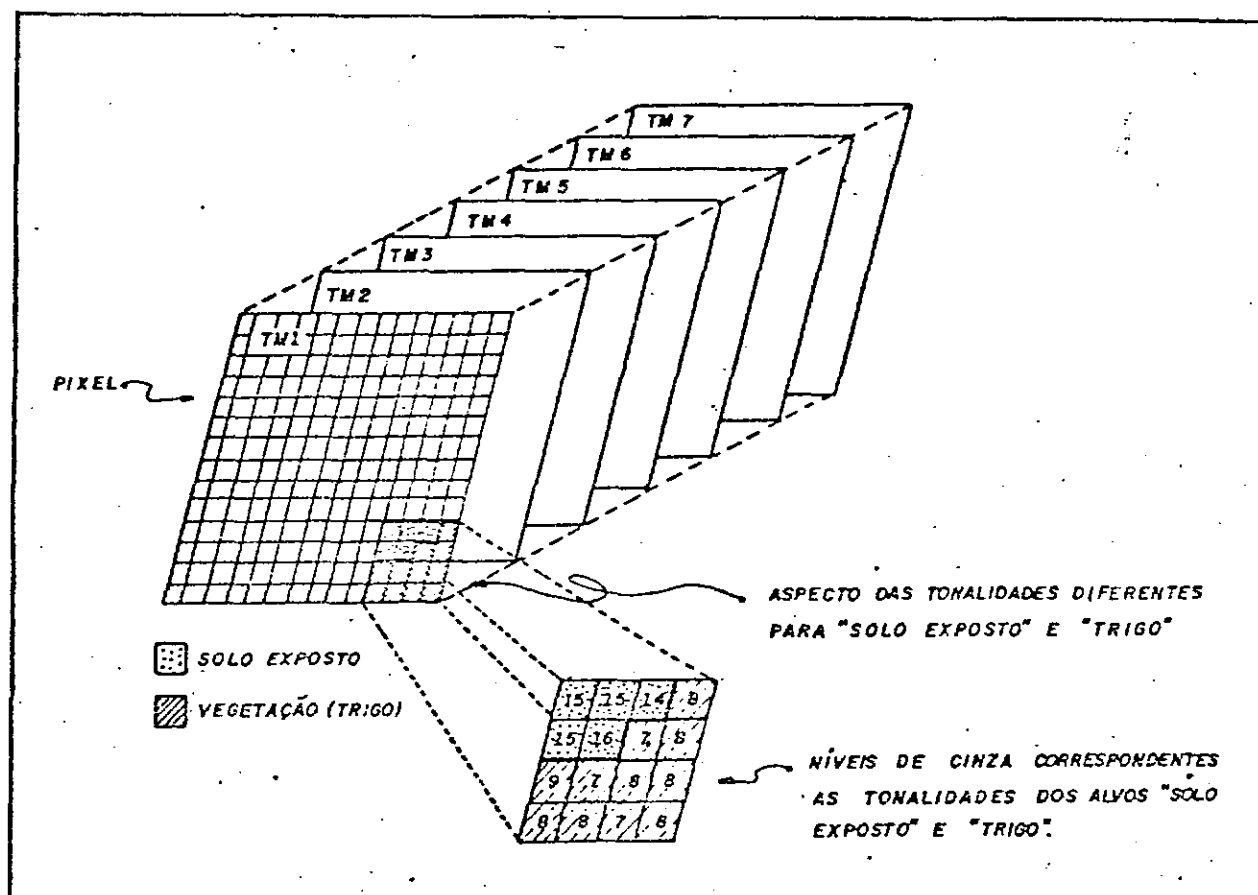


Figura 3.3- Representação esquemática de uma imagem digital, das diferentes bandas TM, dos pixels, das tonalidades para os alvos solo/vegetação e dos correspondentes níveis de cinza.

Torna-se fácil inferir que, quanto maior o número de pixels da matriz, melhor deverá ser a resolução espacial da

imagem e que, quanto maior for o intervalo total dos valores de níveis de cinza, melhor será a resolução radiométrica. O número de subdivisões do espectro eletromagnético, em que a radiância é medida, determina a resolução espectral (7 bandas para o TM).

Dados os problemas já esclarecidos no item 3.3 deste trabalho, foi possível trabalhar com apenas duas datas de passagem do TM/Landsat-5, ou seja, as dos dias 20/06/87 e 06/07/87, correspondendo à 2ª e 3ª missões de campo, respectivamente.

Teria sido ideal que, para as sete missões de coleta de dados agronômicos, houvesse as sete correspondentes imagens isentas de nuvens, a fim de se poder acompanhar todas as áreas de trigo e de soja nas várias etapas de seus ciclos.

Contudo, dado que as datas de plantio das diversas áreas estenderam-se por um período bastante longo, numa mesma data de passagem do satélite foi possível obter-se grupos de áreas que estavam em diferentes fases de seus ciclos, como é mostrado na Tabela 3.3, com base em quinzenas dentro das quais havia sido feito o plantio de cada área. Desta forma, as áreas foram compartimentadas em 4 grupos para o trigo e em 6 grupos para o feijão.

Os valores de radiância das culturas de trigo e de feijão imageadas pelo TM/Landsat nas datas de passagens já citadas são os valores espectrais a nível orbital, básicos para o presente estudo.

Estes valores estão armazenados em fitas CCT na forma de pixels associados a níveis de cinza (proporcionais às radiâncias dos alvos), os quais devem ser recuperados a fim de se poder fazer as análises de suas relações com as variáveis agronômicas, coletadas no campo, naquelas duas datas.

Para se recuperar os níveis de cinza das fitas CCT foi utilizado o Sistema Analisador de Imagens Digital denominado "Image-100" (GENERAL ELECTRIC, 1975). As características detalhadas de funcionamento e os "softwares" de processamento e

de classificações automáticas do Image-100 podem ser encontrados em RIBEIRO et al. (1982).

Tabela 3.3 - Agrupamento das áreas de trigo e de feijão por grupos de idade e dados gerais sobre cada área, para a campanha de 1987.

CULTURAS	QUINZENAS DE PLANTIO	GRUPOS	Nº DE ORDEM	ÁREAS	DATAS DE PLANTIO	DATAS DE COLHEITA	DURAÇÃO CICLO CULTURAS(DIAS)	IDADE EM 20/JUN	IDADE EM 06/JUL
TRIGO	15 a 30/abr	T ₁	1	AD.A (B)	25/abr	24/ago	121	56	72
			2	AD.A (C)	25/abr	25/ago	122	57	73
	01 a 15/maio	T ₂	3	GA. E(A)	11/maio	01/set	113	40	56
			4	GA. E(B)	07/maio	03/set	119	44	60
			5	AD.A5	02/maio	25/ago	124	49	65
			6	SK.K ₁ (A)	14/maio	15/set	124	37	53
			7	SK.K ₂ (B)	05/maio	15/set	133	46	62
	16 a 31/maio	T ₃	8	GA.D	26/maio	-	-	25	41
			9	GA.C	22/maio	-	-	29	45
	01 a 30/jun	T ₄	10	SK.K ₁ (C)	19/jun	-	-	01	17
			11	BR.B ₁ (B)	01/jun	-	-	20	36
			12	AD.A ₃ (A)	09/jun	-	-	11	27
			13	AD.A ₃ (B)	09/jun	-	-	11	27
FEIJÃO	01 a 15/abr	F ₁	14	BU.P ₁	16/abr	23/jul	100	65	81
			15	BU.P ₂ (A)	09/abr	12/jul	94	72	88
			16	BU.P ₄ (A)	05/abr	08/jul	94	64	80
			17	BU.P ₅	08/abr	23/jul	106	73	89
			18	FU.F ₂ (A)	01/abr	05/jul	96	81	já colhido
			19	PS.P ₁ (A)	07/abr	05/jul	89	74	já colhido
			20	JS.B	13/abr	14/jul	92	68	84
			21	SK.K ₃ (A)	12/abr	20/jul	99	69	85
			22	FU.F ₂ (B)	20/abr	01/jul	102	91	já colhido
	16 a 30/abr	F ₂	23	BU.P ₃	25/abr	05/ago	102	56	72
			24	AD.A ₂ (A)	23/abr	01/ago	100	58	74
			25	PC.P ₁ (A)	29/abr	02/ago	96	52	68
			26	FU.F ₁ (B)	23/abr	01/ago	100	58	74
			27	EA.P ₁	19/abr	24/jul	96	62	78
			28	AG.A(A)	29/abr	26/ago	118	52	68
			29	PS.P ₂ (B)	28/abr	21/jul	87	53	69
			30	JS.C	29/abr	02/ago	96	52	68
			31	SK.K ₂ (A)	27/abr	11/ago	106	54	70
			32	SK.K ₃ (B)	29/abr	06/ago	100	53	69
	01 a 15/maio	F ₃	33	GA.F	01/maio	04/ago	96	51	67
			34	MU.M ₁	05/maio	10/ago	97	46	62
			35	BU.P ₂ (B)	02/maio	09/ago	99	49	65
			36	BR.B ₂ (B)	14/maio	28/ago	106	37	53
			37	PC.P ₁ (B)	10/maio	16/ago	98	41	57
			38	FU.F ₁ (A)	06/maio	13/ago	99	45	61
			39	EA.P ₂	15/maio	19/ago	96	36	52
			40	HI.P ₁ (A)	04/maio	15/ago	103	47	63
			41	JS.E	13/maio	16/ago	95	38	54
			42	AC.A ₁ (A)	15/maio	21/ago	98	36	52
			43	AC.A ₂	01/maio	06/ago	98	50	66
	16 a 31/maio	F ₄	44	GA.A	16/maio	19/ago	95	35	51
			45	MU.M ₃	19/maio	23/ago	86	32	48
			46	MU.M ₂	27/maio	10/set	107	24	40
			47	AD.A ₁	19/maio	20/ago	93	32	48
			48	AG.A(B)	18/maio	02/set	107	33	49
			49	JS.A	29/maio	31/ago	94	22	38
	01 a 15/jun	F ₅	50	AC.A ₁ (B)	15/maio	23/ago	99	35	51
			51	GA.B	02/jun	05/set	95	18	34
			52	BU.P ₄ (C)	10/jun	16/set	98	10	26
			53	PC.P ₂ (A)	10/jun	05/set	87	10	26
			54	BA.B	09/jun	17/set	101	12	28
			55	PC.P ₂ (C)	01/jun	03/set	95	19	35

Em poucas palavras, o Image-100 é um sistema iterativo (permite controle e modificação do processo de análise baseado no conhecimento prévio da imagem em estudo), "conversational" (permite diálogo com o usuário), e utiliza um "hardware" especial operando sob o controle de um minicomputador PDP-11/45 para a implementação de algoritmos de extração de informações espectrais sobre alvos de superfície terrestre contidos em imagens digitais.

A imagem a ser analisada é carregada no sistema através de fitas magnéticas digitais (CCT) aparecendo, então, num monitor de televisão. O usuário posiciona um cursor (o qual tem forma e tamanho variáveis e pode ser movido através da tela) sobre a área ou alvo de seu interesse, permitindo ao sistema adquirir a "assinatura" (comportamento espectral típico) correspondente à referida área ou alvo.

A tela do monitor comporta uma imagem de 512X512 pontos de informação. A imagem correspondente a um quadrante do TM/Landsat cobre cerca de 92Km x 92Km, com aproximadamente 3000 pixels x 3000 pixels ou pontos de informação, em cada banda espectral.

Entre os motivos que levaram a se trabalhar com três áreas modulares de 15Km x 15Km (Guaira, Barretos e Colômbia), foi considerado o de se compatibilizar escala de trabalho com a situação de 1 ponto de informação da tela corresponder a 1 ponto de informação (pixel) de imagens digitais. Este requisito é atendido, para as imagens TM, com uma área de 15Km x 15Km sendo mostrada na tela numa escala aproximada de 1:51.000; condições estas adotadas, nesta etapa do trabalho.

Antes de se proceder à extração dos valores de níveis de cinza das áreas de trigo e de feijão para as CCT's das duas datas, julgou-se importante realizar algum tipo de correção quanto aos efeitos atmosféricos, os quais costumam trazer efeitos aditivos indesejáveis sobre os níveis de cinza de imagens orbitais.

Sabe-se que a radiância medida pelo sensor TM difere da radiância intrínseca do material imageado, devido a efeitos de

absorção e de espalhamento causados pelos aerossóis, gases e moléculas d'água da atmosfera orbital, conforme já foi exposto no subcapítulo 2.1.

Assim, no Image-100, inicialmente foi utilizado o programa "SINGLE-CELL" que faz a contagem do número de pixels correspondentes a cada nível de cinza (parâmetro que pode variar de 0 a 255), ou seja, gera um histograma. Em seguida, o programa "HLIST" fornece a listagem das frequências de ocorrência de pixels em cada nível de cinza, ou seja, lista o histograma numérico. De posse desta listagem e visualizando-se o histograma de barras, pode-se verificar em quais níveis de cinza devem estar ocorrendo interferências atmosféricas. Isto é, valores de níveis de cinza muito acima de zero, numa determinada banda, para corpos d'água limpa, indicam efeitos atmosféricos.

A fim de se poder visualizar em que pontos estavam determinados níveis de cinza, utilizou-se o programa "TBUILD", também denominado "construção de assinatura". Este programa mostra no tema (ou alarme) do sistema Image-100 os filtros correspondentes a um determinado nível de cinza.

Iniciava-se sempre a alarmar na banda TM7 (onde geralmente o efeito atmosférico aditivo é bem menor e a absorção da radiação eletromagnética incidente pela água é total) os pixels de nível de cinza inferiores, verificando-se se eram correspondentes a corpos d'água ou sombras. Em caso positivo, também as outras bandas eram verificadas quanto aos seus menores níveis de cinza e, se a localização destes correspondia aos mesmos pixels alarmados para as bandas TM7, anotavam-se os valores destes níveis de cinza.

Estes valores passam agora a ser considerados como o efeito atmosférico aditivo nas diferentes bandas refletidas na data e no momento daquela passagem TM/LANSAT sobre a área de estudo. Considerando as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do TM, os valores tirados respectivamente, para a passagem de 20/junho/87 foram: 40, 14, 11, 3, 1 e 1; para a passagem de 06/julho/87, os valores foram: 41, 14, 10, 2, 1 e 1.

A etapa seguinte consistiu na amostragem dos níveis de cinza para todas as áreas de trigo e de feijão, nas duas datas de passagem TM/Landsat-5 disponíveis.

Para tanto, inicialmente foi utilizado o programa MAXVER com a finalidade de localizar as amostras de níveis de cinza para a primeira data (20/06/87) e para a sua posterior apresentação no monitor do sistema Image-100. Foram selecionadas 5 amostras de 12 pixels cada uma, para cada área de trigo e para cada área de feijão.

O programa "LIMPAR" foi utilizado para apagar todos os pixels carregados na tela que não pertencessem às amostras selecionadas, nos quatro canais do sistema Image-100.

Em seguida, o programa "IMPNIU" permitiu a impressão dos níveis de cinza correspondentes às diversas áreas amostrais selecionadas, nos 6 canais TM de energia refletida.

Todas as amostras selecionadas tinham as suas coordenadas x/y gravadas em fita de papel, para posterior recuperação e apresentação na tela do sistema.

Apresentando-se estas amostras na referida tela e mantendo-se uma banda TM da passagem de 20/junho carregada num dos canais do sistema e na sua tela, carregavam-se outros canais da passagem de 06/julho. Assim, por translação (movimentos tentativos da imagem toda nas várias direções, na tela do I-100), fez-se a sobreposição a mais exata possível da imagem de julho sobre a imagem de junho.

Desta maneira, as localizações das amostras para a passagem de julho foram praticamente as mesmas da passagem de junho, evitando-se assim a interveniência de fatores outros que não apenas as variações da dinâmica fenológica cíclica das culturas nas suas respostas espectrais, quando são consideradas ambas as passagens do satélite.

De posse das listagens de níveis de cinza fornecidas pelo uso do programa "IMPNIU", foram localizadas e identificadas as

áreas nestas listagens e, posteriormente, os dados das várias amostras foram armazenados em computador. Neste ponto, foi efetuado um programa para subtração dos efeitos atmosféricos aditivos, obtendo-se então os valores de níveis de cinza corrigidos.

Após estes procedimentos de correção atmosférica, foram efetuadas as transformações dos níveis de cinza para reflectâncias.

A conversão de valores digitais (níveis de cinza) obtidos a nível orbital para valores de radiância ou de reflectância exoatmosférica permite uma melhor comparabilidade de dados em cenas individuais, ou entre imagens obtidas em diferentes datas e/ou por diferentes sensores (MARKHAM e BARKER, 1986).

Para tal conversão utilizaram-se os procedimentos recomendados por MARKHAM e BARKER (1986), em que, inicialmente, os níveis de cinza são transformados para valores de radiância, conforme a Equação (8).

$$L_{\lambda} = L_{\min\lambda} + [(L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda})/255].ND \quad (\text{Eq. 8})$$

onde:

L_{λ} = radiância espectral;

$L_{\min\lambda}$ = radiância espectral quando $ND = 0$;

$L_{\max\lambda}$ = radiância espectral quando $ND = 255$;

ND = número digital (nível de cinza) que se deseja transformar para reflectância.

Os valores de $L_{\min\lambda}$ e de $L_{\max\lambda}$ utilizados neste trabalho foram os fornecidos pela NASA (1984), conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Valores dinâmicos de pós-calibração dos dados TM processados após 15 de janeiro de 1984.

RAD./BANDAS	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7
LMIN $_{\lambda}$	-0,15	-0,28	-0,12	-0,15	-0,04	-0,02
LMAX $_{\lambda}$	15,21	29,68	20,43	20,62	2,72	1,44

Lmin $_{\lambda}$ e Lmax $_{\lambda}$ = radiâncias espectrais mínima e máxima em $\text{mW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ (FONTE: NASA, 1984).

Obtidos os valores de L_{λ} , através da Equação (8), é possível obter-se os valores de reflectância ao nível do satélite, ou exoatmosférica, conforme segue:

$$\rho_p = (\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2) / (E_{\text{sol},\lambda} \cdot \cos \theta_s) \quad (\text{Eq. 9})$$

onde:

ρ_p = reflectância planetária efetiva ao nível do satélite (sem unidade);

π = constante (3,1416);

L_{λ} = radiância espectral ($\text{mW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$);

d = distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$E_{\text{sol},\lambda}$ = irradiâncias exoatmosféricas solares médias ($\text{mW.cm}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$);

θ_s = ângulo zenital solar (graus).

Os valores da distância Terra-Sol e os ângulos zenitais solares para as datas de passagem do satélite podem ser obtidos através do Anuário Astronômico (IAG, 1985). Os valores das irradiâncias solares foram os fornecidos por MARKHAM e BARKER (1986). Assim, para as duas passagens utilizadas no presente trabalho, foram usados os dados mostrados na Tabela 3.5.

Estes dados de reflectância TM/Landsat, desta maneira obtidos para ambas as datas de passagem (uma em junho e outra em julho) e para as várias amostras selecionadas nas áreas de trigo e de feijão, serviram de base para todas as análises gráficas e estatísticas da presente pesquisa.

Tabela 3.5- Valores de distância Terra-Sol, cosseno do ângulo de elevação solar e irradiância solar para as duas passagens TM/Landsat utilizadas.

PASSAGEM	d^{12}	$\cos\theta_s$	$E_{sol, \lambda}, (mW.cm^{-2}.\mu m^{-1})$					
			TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
17/06/86	1,032	0,5150	195,7	182,9	155,7	104,7	21,93	7,45
19/07/86	1,033	0,5299	195,7	182,9	155,7	104,7	21,93	7,45
04/08/86	1,029	0,5736	195,7	182,9	155,7	104,7	21,93	7,45
20/06/87	1,033	0,5299	195,7	182,9	155,7	104,7	21,93	7,45
06/07/87	1,034	0,5299	195,7	182,9	155,7	104,7	21,93	7,45

FONTE (para valores de Irradiância Espectral Solar Exoatmosférica para o TM): MARKHAM e BARKER (1986).

3.5.2. Dados de espectroscopia de campo

Antes de reportar sobre as metodologias e cuidados seguidos para a obtenção dos dados deste trabalho, serão fornecidos alguns tópicos considerados básicos sobre a importante ferramenta que é a espectroscopia de campo.

Como afirma MILTON (1987), a espectroscopia de campo é uma técnica de fundamental importância no sensoriamento remoto, tanto no nível de pesquisa fundamental, como para aplicações operacionais.

Entretanto, a grande gama de tipos de instrumentos disponíveis, bem como a grande variação de diferentes técnicas usadas, têm resultado em problemas de comparabilidade de dados entre estudos, o que pode comprometer seriamente o valor de longo prazo de tais dados.

Assim, é essencial que todos os dados espectrais coletados no campo sejam apoiados por informações adequadas sobre as condições de medição e por dados auxiliares apropriados. Caso estes cuidados de documentação não sejam tomados, raramente todo o potencial da espectroscopia de campo será explorado.

A espectroscopia de campo envolve o estudo das interrelações entre características espectrais de objetos e seus atributos biofísicos no ambiente de campo.

O olho humano é sensível a somente uma pequena parte do espectro eletromagnético (aproximadamente de 0,4 a 0,7 μm), enquanto que a espectroscopia como suporte ao sensoriamento remoto opera dentro de uma faixa muito mais larga.

Em geral, os alvos naturais não são refletores perfeitamente difusos, ou seja, lambertianos. Portanto, a intensidade do fluxo refletido varia com o ângulo com o qual ele deixa a superfície. Conseqüentemente, pode-se dizer que o ambiente de radiação compreende duas distribuições hemisféricas da radiação eletromagnética, uma chegando (irradiância) e outra saindo (reflectância). É a interação entre estas duas distribuições que constitui o foco de interesse da espectroscopia de campo.

Tanto a radiância (feixe refletido) quanto a irradiância (feixe incidente) variam com o zênite e com o azimuth; portanto, para especificar integralmente o campo de reflectância no alvo, a reflectância deveria ser medida em todas as possíveis posições fonte/sensor resultando na "função de distribuição da reflectância bi-direcional (FDRB)", como é sustentado por MILTON (1987). Contudo, no ambiente de campo, a medição da irradiância na superfície do alvo não é possível e uma alternativa à FDRB tem sido utilizada, ou seja, o "fator de reflectância bi-direcional" (FRB).

Conforme MILTON (1987), o uso do FRB ao invés da FDRB para representar a reflectância espectral de alvos naturais envolve várias suposições, que incluem as seguintes:

a) o campo de visada do sensor é menor que 20 graus;

b) o painel de referência deve preencher o campo-de-visada do sensor;

c) não deve haver mudança na quantidade ou na distribuição de irradiação entre as medições das radiâncias do alvo e do painel;

d) o fluxo solar direto domina o campo de irradiação. Ou seja, o sol é assumido brilhar num céu escuro e a luz difusa ("sky light") é ignorada;

e) o sensor responde numa forma linear às variações no fluxo radiante;

f) as propriedades de reflectância do painel-padrão são conhecidas e invariantes no curso das medições.

Destas suposições, aquela que é sempre violada na situação de campo é a ausência de luz difusa, que resulta em medições de campo do FRB serem feitas sob uma distribuição de irradiação que pode ser significativamente diferente do delgado cone alongado já anteriormente referido.

Uma abordagem alternativa proposta por DUGGIN (1980) consiste em se medir simultaneamente a irradiação e a radiância do alvo, a fim de se eliminar erros nos fatores de reflectância que poderiam ser causados por flutuações de irradiação que ocorrem durante ou entre medições sequenciais do alvo e do painel refletor padrão.

O termo "bi-direcional" refere-se aos dois ângulos envolvidos, ou seja, um para a posição da fonte iluminante e outro para a posição do sensor.

Considerando-se os aspectos de geometria da radiação, os feixes (incidentes/refletidos) podem ser de três tipos: direcionais, cônicos ou hemisféricos (Figura 3.4) e, deste modo, nove tipos de reflectância podem ser definidos a partir destas geometrias (NICODEMUS et al., 1977), conforme são expostos a seguir:

1. Refletância Bi-direcional - os feixes incidentes e refletidos mensurados são definidos por um ângulo sólido pequeno.

2. Reflectância direcional-cônica - o feixe incidente é definido por um ângulo sólido e pequeno e o feixe refletido mensurado é definido por um ângulo sólido grande.
3. Reflectância direcional-hemisférica - o feixe incidente ocorre num ângulo sólido pequeno e o feixe refletido, num hemisfério.
4. Reflectância cônica-direcional - é a inversa da nº. 2.
5. Reflectância bi-cônica - tanto o feixe incidente como o feixe refletido ocorrem num ângulo sólido grande.
6. Reflectância cônica-hemisférica - o feixe incidente é definido por um ângulo sólido grande e o feixe refletido, por um hemisfério.
7. Reflectância hemisférica-direcional - é a inversa da nº. 3.
8. Reflectância hemisférica-cônica - é a inversa da nº. 6.
9. Reflectância bi-hemisférica - tanto o feixe incidente quanto o feixe refletido ocorrem num hemisfério.

Em termos de radiação solar incidente (I_o) e de radiação refletida de uma superfície agrícola (I_r), conforme explica GARDNER (1983), a função de distribuição de reflectância bi-direcional (FDRB) é dada por:

$$FDRB = I_r(\theta_i, \phi_i; r, \tilde{\theta}, \tilde{\phi}) / I_o(\theta_i, \phi_i; r, \tilde{\theta}, \tilde{\phi}) \quad (\text{Eq. 10})$$

onde: θ e ϕ são os ângulos azimutais e zenitais e os subscritos i e r referem-se aos feixes de radiação incidente e refletida. O feixe refletido é mensurado com um radiômetro direcional.

A FDRB pode admitir qualquer valor desde zero até o infinito. Entretanto, como já foi dito, considera-se que não é fácil fazer medições em número suficiente para caracterizar de maneira total a FDRB de um dossel (NICODEMUS et al., 1977).

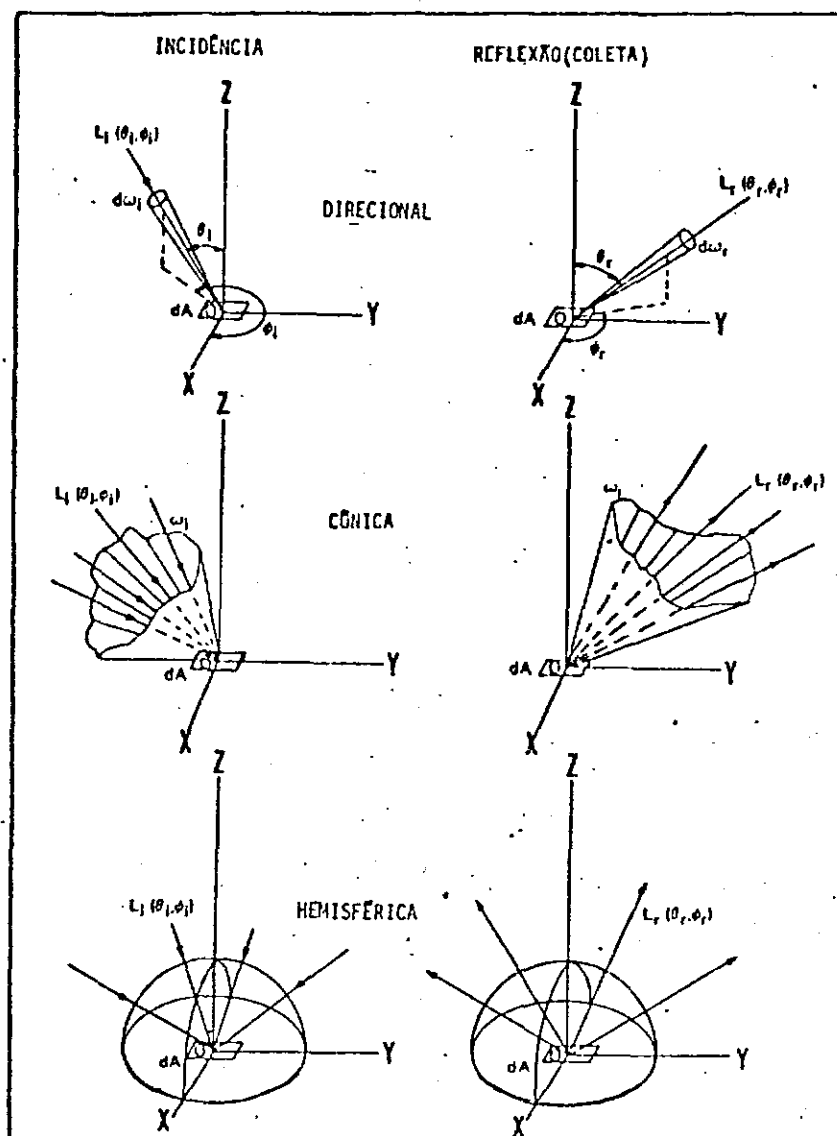


Figura 3.4- Aspectos geométricos envolvidos na medição da radiação (L). Os subscritos i e r referem-se aos feixes incidentes e refletidos, respectivamente. Os ângulos envolvidos são o azimutal (ϕ) e o zenital (θ) (NICODEMUS et al., 1977).

Assim sendo, o que se faz é definir-se uma geometria-padrão de radiação. A geometria mais freqüentemente selecionada para medir o I_r é a de ângulo zenital de 0° ; desta maneira, o feixe I_r independe de θ_r . Então, para este caso, a reflectância bidirecional (RBD) de um dossel pode ser definida por:

$$RBD = I_r(\theta_i, \phi_i) / I_o(\theta_i, \phi_i) \quad (\text{Eq. 11})$$

Deste modo, a reflectância de dossel em que se use esta geometria de medição é dependente somente dos ângulos azimutal e zenital solares.

Conforme salienta GARDNER (1983), a medição do I_r num ângulo zenital de 0° (a nadir) pode falhar em fornecer algumas informações importantes sobre a natureza de reflectância de dossel. Neste sentido, VANDERBILT et al. (1980) mostram que existem informações importantes nas direções não-nadir.

Neste ponto, é conveniente também expor alguns conceitos sobre a grandeza radiométrica "fator de reflectância" e, para tanto, toma-se por base GARDNER (1983).

Com muitos instrumentos, não é conveniente medir o feixe I_o de maneira direta. Ao invés disso, a energia refletida por uma superfície de reflectância (I') é usada como um indicador de I_o .

Um dos tipos de superfície de reflectância mais utilizadas é a composta por sulfato de bário em pó prensado (GRUM e LUCKEY, 1968). Este tipo de superfície de reflectância é altamente difusor, diferindo não mais que 3% de uma superfície lambertiana (ou seja, de uma superfície perfeitamente difusora) para ângulos zenitais de radiação entre 0° e 55° (ROBINSON e BIEHL, 1979).

Desta maneira, a razão I_r/I' é denominada "fator de reflectância" (FR).

Considerando-se que as superfícies de reflectância diferem em suas propriedades de reflectância (comparando-se uma com outra), pode-se generalizar o FR (tornando-se, então, comparáveis) incluindo-se a reflectância da superfície (R_p):

$$FR = I_r / (I' / R_p) \quad (\text{Eq. 12})$$

onde:

$R_p \rightarrow$ é função do ângulo zenital.

Tendo em vista que $I' / R_p = I_o / \pi$ para uma superfície perfeitamente difusora, tem-se:

$$FR = \pi \cdot I_r / I_o = \pi \cdot RDB \quad (\text{Eq. 13})$$

Esta equação mostra, então, a relação entre o fator de reflectância e a reflectância bi-direcional. Assim, o fator de reflectância de uma superfície perfeitamente difusora é vezes a sua reflectância bi-direcional. Na prática, os valores de reflectância e de fator de reflectância podem não diferir de um fator π , uma vez que as culturas não são perfeitamente difusoras.

Quanto aos parâmetros espectrais de campo do presente estudo, eles foram obtidos por um radiômetro portátil KIMOTO, modelo 2703-MP, com um ângulo de visada de 10° . Obtiveram-se curvas espectrais em várias datas durante os ciclos biológicos do trigo e do feijão, nos seguintes comprimentos de onda: 400, 425, 450, 475, 500, 525, 550, 575, 600, 625, 650, 675, 700, 750, 850, 950, e 1050nm. Todas as leituras tinham como meio de saída uma impressora a bateria, sendo que cada ciclo completo de leitura dos 17 comprimentos de onda necessitava de cerca de 60 segundos para ser executado. Em cada ponto amostral era feita uma curva espectral numa placa-padrão branca de sulfato de bário pintado (confeccionada no Instituto de Pesquisas Espaciais, Departamento de Pesquisa e Aplicações em Sensoriamento Remoto; São José dos Campos, SP); em seguida duas medições sobre a cultura e novamente uma medida na placa de referência. O radiômetro era colocado na posição vertical (a nadir) em relação ao alvo por um operador sobre uma escada portátil, a uma altura de cerca de 2,5m do nível do terreno cobrindo então uma área correspondente a um círculo com diâmetro de aproximadamente 45cm.

As medições radiométricas foram efetuadas sempre num período horário do dia compreendido entre 09:00 hs e 15:00 hs, tomando-se o cuidado de realizá-las sempre em dias claros, evitando-se ao máximo dias com "haze" ou com nuvens cúmulus no horizonte, fatores atmosféricos que poderiam interferir na irradiância solar sobre os alvos e a placa-padrão. Para cada ponto amostral foi obtida uma fotografia da área exata "vista" pelo radiômetro, através de câmara com objetiva "zoom", a fim de documentar com detalhes as condições do alvo e também para se obter a porcentagem de cobertura do solo com material vegetal das culturas. Os dados registrados na impressora do radiômetro foram transferidos para computador e os valores de reflectância foram devidamente determinados através do uso de média das leituras de radiância de cultura e da média das duas leituras de radiância da placa-padrão. A fórmula utilizada foi a seguinte:

$$R(\%) = [(L_a - L_p) / L_p] \cdot 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

onde:

R(%) = valor percentual de reflectância;

L_a = valor médio das duas leituras sobre o alvo;

L_p = valor médio das duas leituras sobre a placa-padrão.

3.5.3. Geração dos índices de vegetação

A partir dos dados espectrais do TM/Landsat-5 e da espectroscopia de campo, foram gerados os índices de vegetação Razão Simples (JORDAN, 1969), Diferença Normalizada (ROUSE et al., 1973) e o índice de Vegetação Transformado (DEERING et al., 1975), da maneira que se descreve a seguir.

No caso dos dados do TM/Landsat, de posse dos níveis de cinza corrigidos atmosféricamente e transformados para valores de

reflectância, foram executados os seguintes cálculos, de acordo com cada índice de vegetação:

a - Razão Simples (RS):

$$RS = TM4/TM3$$

b - Diferença Normalizada (ND):

$$ND = (TM4-TM3)/(TM4+TM3)$$

c - índice de Vegetação Transformado (TVI):

$$TVI = \sqrt{(TM4-TM3)/(TM4+TM3) + 0,5}$$

Salienta-se que foram utilizados os valores de reflectância obtidos a partir da transformação dos níveis de cinza amostrados para as áreas de trigo e de feijão.

Estes índices assim gerados passaram, então, a integrar um arquivo de computador juntamente com os valores de reflectância nas bandas TM individuais; arquivo este que, posteriormente, foi utilizado para as análises de regressão entre os dados de satélite e as variáveis agronômicas.

Em relação aos valores de fator de reflectância obtidos pela espectroscopia de campo, a partir de 46 curvas radiométricas obtidas para este estudo, foram simuladas as bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor "Thematic Mapper" do Landsat-5 da seguinte maneira:

$$RTM1 = (R_{450} + R_{475} + R_{500})/3$$

$$RTM2 = (R_{525} + R_{550} + R_{575} + R_{600})/4$$

$$RTM3 = (R_{625} + R_{650} + R_{675})/3$$

$$RTM4 = R_{650}$$

onde:

RTM 1, 2, 3, 4 = designação dada aos valores de reflectância simulando as bandas Landsat/TM-1, 2, 3 e 4, a partir dos dados de radiometria de campo;

$R_{450,475...}$ = valores de reflectância obtidas em condições de campo para os comprimentos de onda 450,475...(nm).

Os índices de vegetação foram obtidos através das seguintes equações:

a - Razão Simples (RS):

$$RS = RTM4/RTM3$$

b - Diferença Normalizada (ND):

$$ND = (RTM4-RTM3)/(RTM4+RTM3)$$

c - índice de Vegetação Transformado (TVI):

$$TVI = \sqrt{(RTM4-RTM3)/(RTM4+RTM3) + 0,5}$$

3.6. Análises dos dados

Considerando-se os dados agronômicos mensurados durante as 7 campanhas de campo (em que cada uma das 55 áreas era revisitada simultaneamente às passagens do TM/Landsat), os dados de espectroscopia de campo e os dados extraídos das fitas CCT referentes às duas passagens TM/Landsat-5, foram efetuados, basicamente, dois tipos de análises dos dados: análises gráficas e análises estatísticas, como se descreve a seguir.

Dispondo-se de todos os dados organizados, inicialmente foram feitas análises gráficas dos parâmetros agronômicos altura média, número de folhas verdes/planta, peso de matéria seca/planta, porcentagem de cobertura vegetal, teor de umidade,

índice de área foliar e fitomassa, tanto para o trigo quanto para o feijão.

Em seguida, foram feitas análises gráficas dos dados TM/Landsat-5 (para as duas passagens disponíveis) e dos dados de espectroscopia de campo, para as duas culturas de interesse.

Estas análises gráficas visam mostrar o comportamento das variáveis agronômicas e das espectrais (satélite e espectroscopia de campo), a fim de que se possa entender as possíveis relações entre estes dois tipos de variáveis. Pelos vários gráficos é possível acompanhar as tendências das variáveis durante o desenrolar dos ciclos biológicos do feijão e do trigo, facilitando assim, possíveis explicações e discussões para a existência ou não daquelas relações buscadas.

Visando-se quantificar estatisticamente as possíveis relações entre as variáveis agronômicas e as variáveis espectrais de que se dispunha, foram executadas análises de correlação e de regressão linear, exponencial e logarítmica (ZAR, 1974), através do pacote estatístico denominado BASIS (BURROUGHS, 1975), disponível no sistema computacional do INPE.

Em função de que há alguns tratamentos específicos para as pesquisas relatadas nos próximos itens, tais tratamentos serão expostos nos locais adequados.

CAPÍTULO 4

RADIOMETRIA DE CAMPO NA AVALIAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E AGRONÔMICAS

4.1. Introdução

Para os propósitos de pesquisa e para auxiliar na interpretação de dados de satélite, é necessário o entendimento das relações entre dados espectrais sensoriados remotamente e variáveis agronômicas das culturas. Os radiômetros portáteis são idealmente projetados para esses tipos de experimentos. Várias medições podem ser feitas de modo rápido em campos experimentais onde os "plots" são muito pequenos para serem incluídos nos elementos de resolução de sensores de aeronaves ou de satélites; ou mesmo em campos agrícolas comerciais onde se necessita ter maior controle de campo sobre as variáveis em estudo.

Na presente pesquisa os objetivos foram verificar os tipos e significâncias das correlações entre variáveis agronômicas de feijão+trigo (conjuntamente) e variáveis espectrais coletadas por espectroscopia de campo.

4.2. Resultados e discussão

Os resultados desta fase da pesquisa são apresentados na Tabela 4.1 e as Figuras 4.1.1 a 4.1.21, que contêm as relações entre as variáveis agronômicas e as espectrais para os dados de radiometria do trigo e do feijão conjuntamente. Os dados de radiometria de campo do trigo foram juntados aos do feijão em função de se ter uma quantidade pequena de dados, caso as análises fossem feitas em separado.

FORMAGGIO (1989) efetuou o mesmo tipo de análises gráficas e estatísticas, porém contando com dados TM/Landsat-5. Obteve análises para a cultura do trigo (1º caso) e análises para a cultura do feijão (2º caso), em separado.

Comparando estes dois casos (em que se utilizaram dados de satélite) com o caso da espectroscopia de campo apresentada neste Capítulo 4 (trigo+feijão analisados conjuntamente), ressalta com bastante clareza que, independentemente de ambos os tipos de sensores e de ambos os níveis de coleta (satélite e campo), as tendências gerais das relações corroboram-se, para cada banda individual ou índice espectral de vegetação, nos três casos em foco. Ou seja, apenas para dar um exemplo, a forma da curva de tendências que ajusta as relações entre a banda individual TM3 e a variável IAF, mostrada nos três casos, é a curvilínea logarítmica (com o parâmetro $b < 0$).

Esta constatação convalida, entre outros aspectos, a metodologia de coleta dos dados orbitais (amostragem dos níveis de cinza, correções atmosféricas e transformações para valores de reflectância), bem como a de coleta de dados de espectroscopia de campo (geometria de aquisição, utilização de placa-padrão de BaSO₄, etc).

Tabela 4.1- Coeficientes de correlação pelos modelos linear, logarítmico e exponencial para os diversos pares formados pelas variáveis agrônômicas (IAF, FIT e COV) e variáveis espectrais (4 bandas TM, simuladas a partir de dados de espectroscopia de campo, e 3 índices espectrais de vegetação, simulados com aquelas bandas), considerando os dados de trigo e feijão conjuntamente.

VAR. AGR.	VAR. ESP.	Nº DE PARES	CORRELAÇÕES			
			LINEAR	LOGARITH.	EXPONENCIAL	MELHORES MODELOS
IAF	RTM1	51	-0,1532	-0,3796**	-0,1140	LOG. b<0
	2	51	-0,0781	-0,2583NS	-0,0416	LOG. b<0
	3	51	-0,2911	-0,6640**	-0,3958	LOG. b<0
	4	51	0,5044	0,6179**	0,4982	LOG. b>0
	RRS	51	0,5545	0,7104**	0,5277	LOG. b>0
	RND	51	0,4869	0,7479**	0,4438	LOG. b>0
	RTV	51	0,4753	0,7429**	0,4655	LOG. b>0
FIT	RTM1	52	-0,3305	-0,4289**	-0,3444	LOG. b<0
	2	52	0,0031	-0,1057NS	-0,0011	LOG. b<0
	3	52	-0,2543	-0,3953**	-0,2576	LOG. b<0
	4	52	0,4065	0,5254**	0,3734	LOG. b>0
	RRS	52	0,4122	0,5160**	0,3776	LOG. b>0
	RND	52	0,3396	0,5016**	0,2925	LOG. b>0
	RTV	52	0,3245	0,4918**	0,3138	LOG. b>0
COV	RTM1	47	-0,2222	-0,2619NS	-0,1673	LOG. b<0
	2	47	-0,3114	-0,3019*	-0,2523	LOG. b<0
	3	47	-0,6549	-0,6846**	-0,6427	LOG. b<0
	4	47	0,4489	0,4906	0,5335**	EXP. b>0
	RRS	47	0,5803	0,5929	0,6850**	EXP. b>0
	RND	47	0,7255	0,7781**	0,7498	LOG. b>0
	RTV	47	0,7382	0,7930**	0,7443	LOG. b>0

* Significativo a 5%

** Significativo a 1%

Legenda:

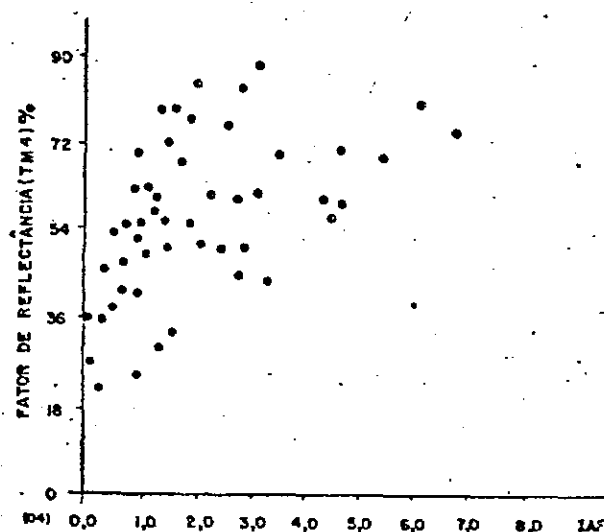
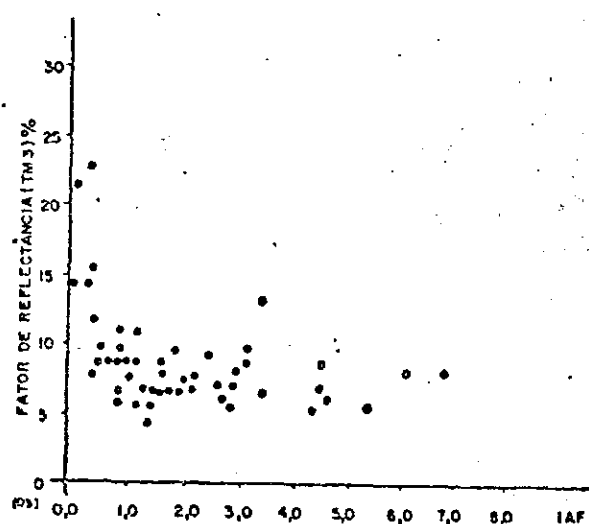
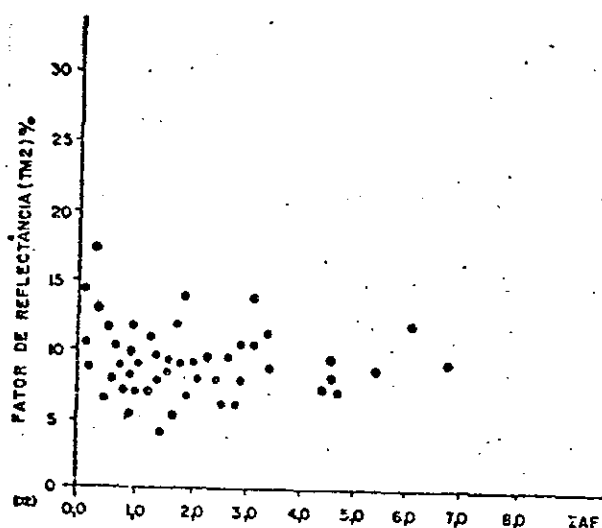
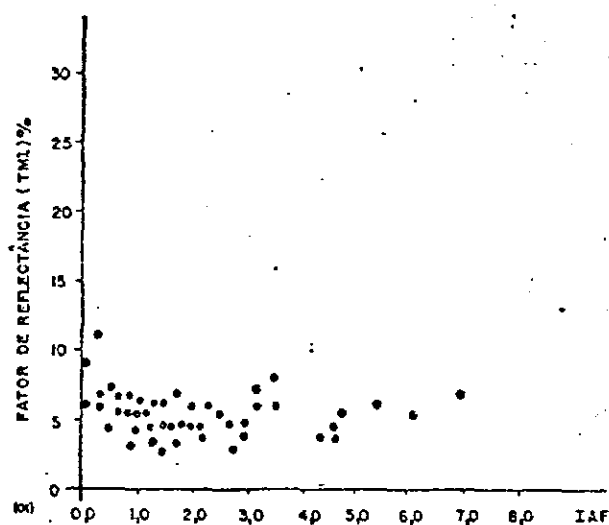
IAF = índice de Área Foliar;

FIT = Fitomassa;

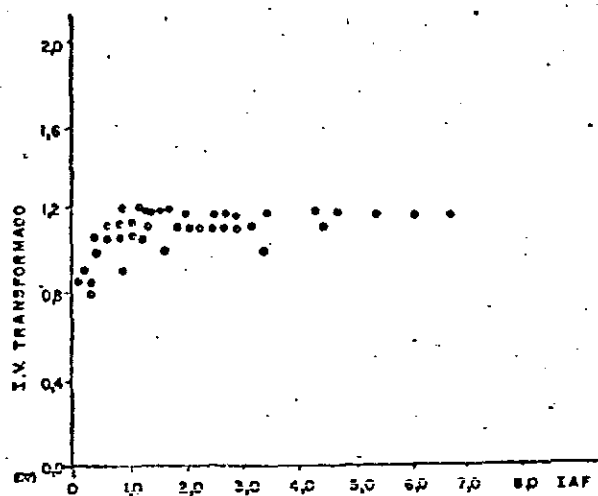
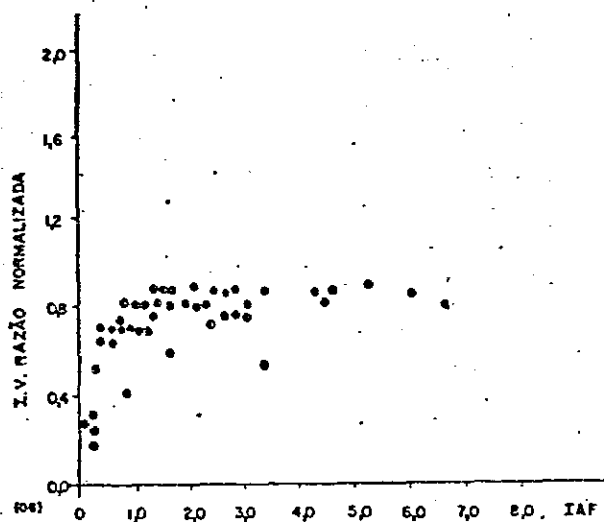
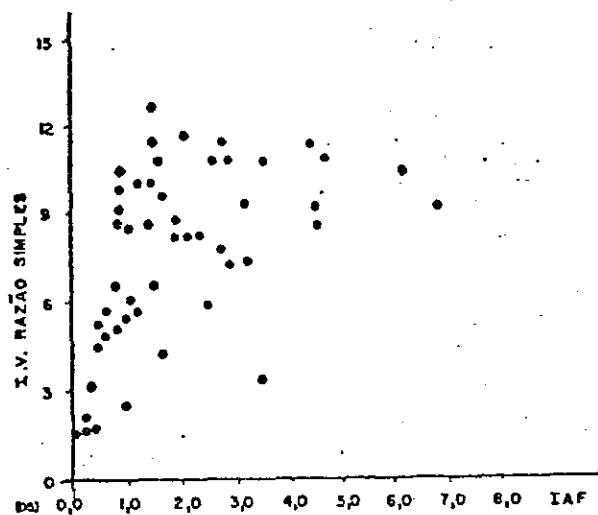
COV = Porcentagem de Cobertura Vegetal;

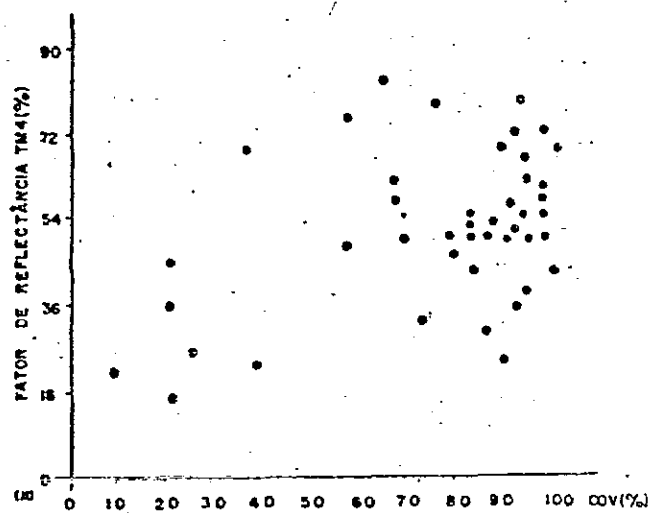
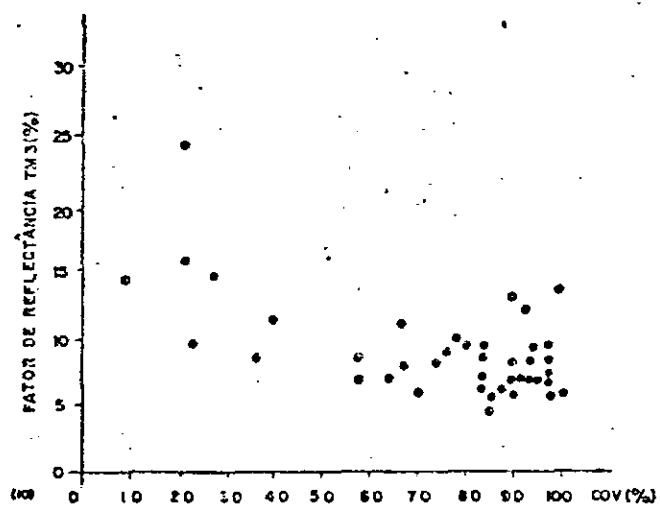
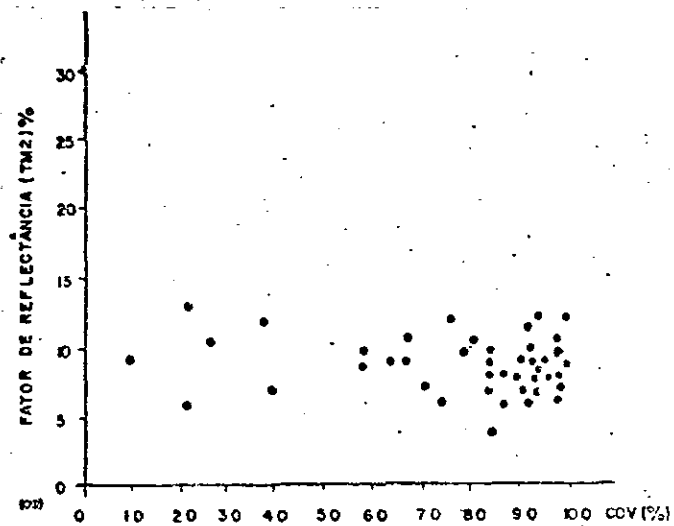
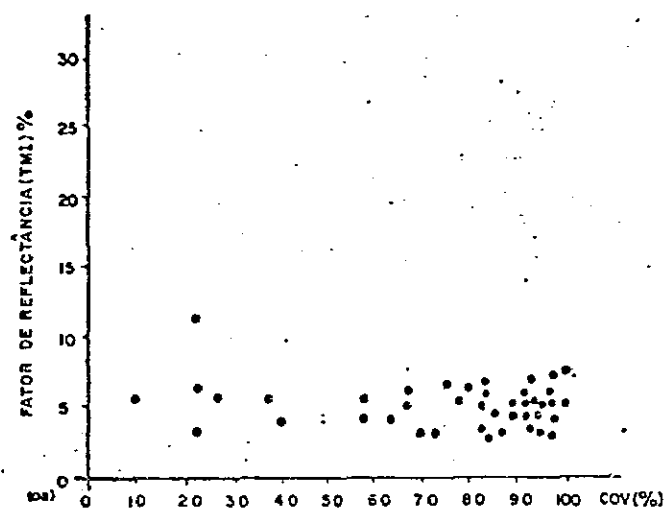
RTM1,2,3,4 = Reflectâncias obtidas por espectroscopia de campo nas respectivas faixas do TM/Landsat;

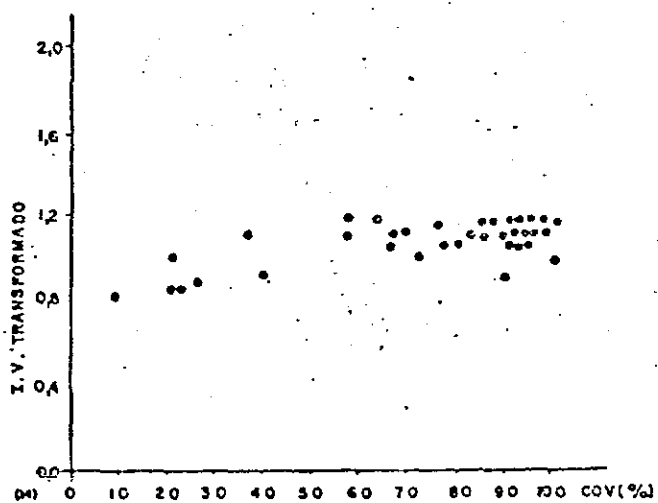
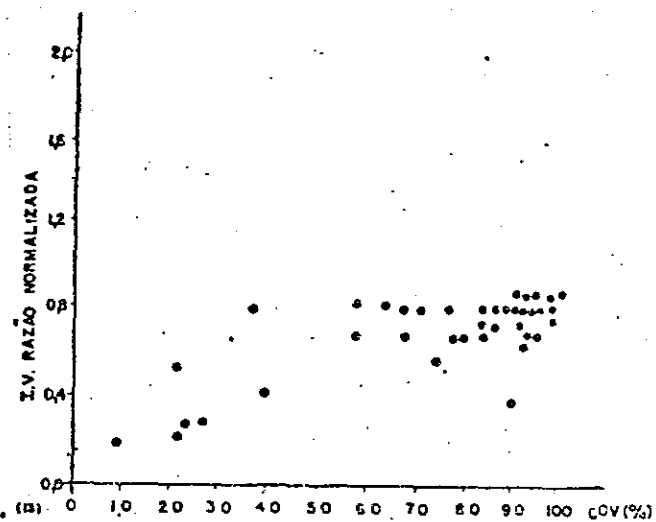
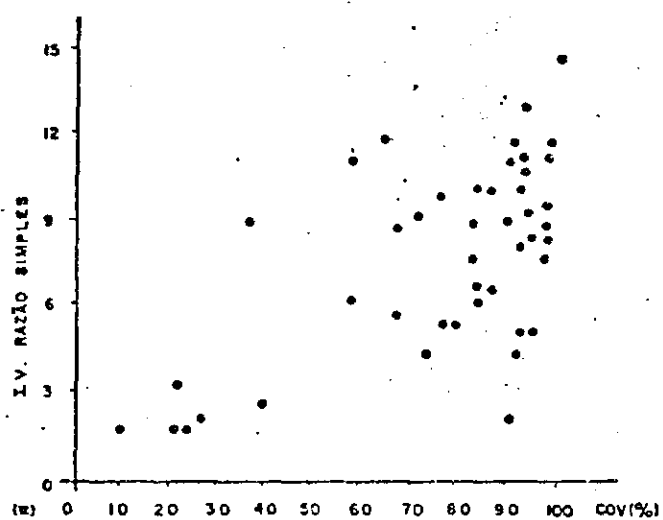
RRS, RND e RTV = índices espectrais de vegetação Razão Simples, Diferença Normalizada e I.V.Transformado, obtidos a partir dos dados de espectroscopia de campo.

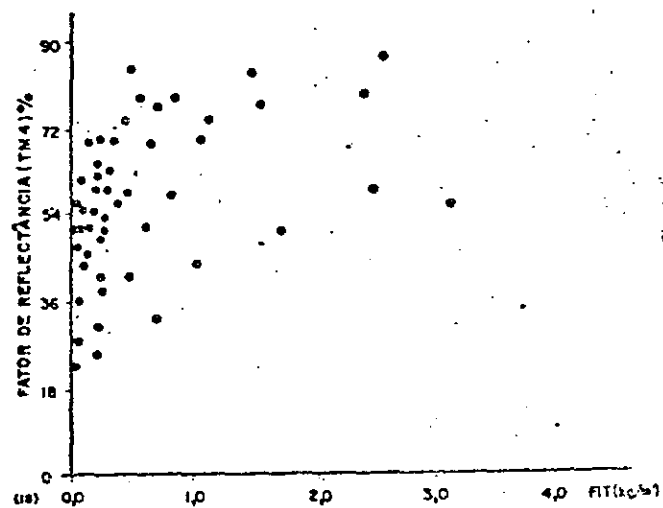
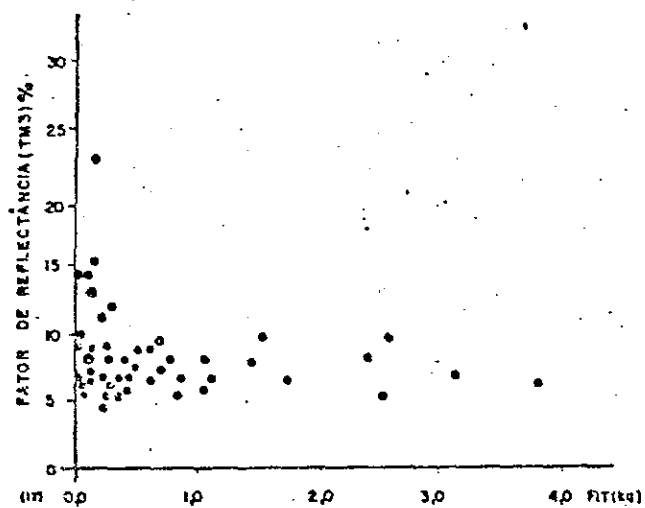
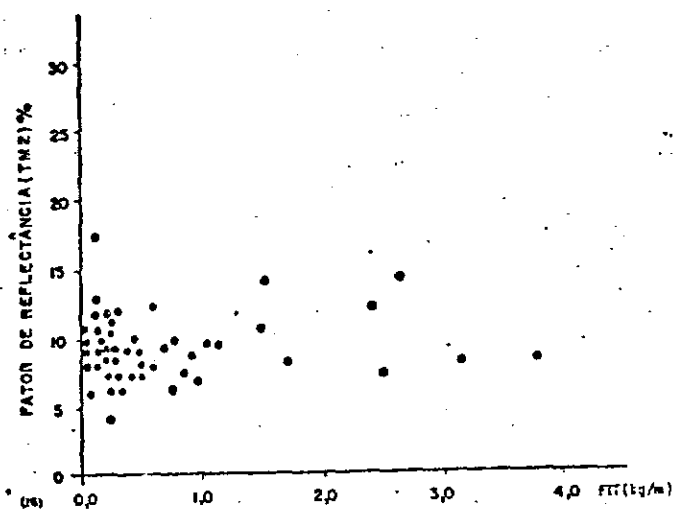
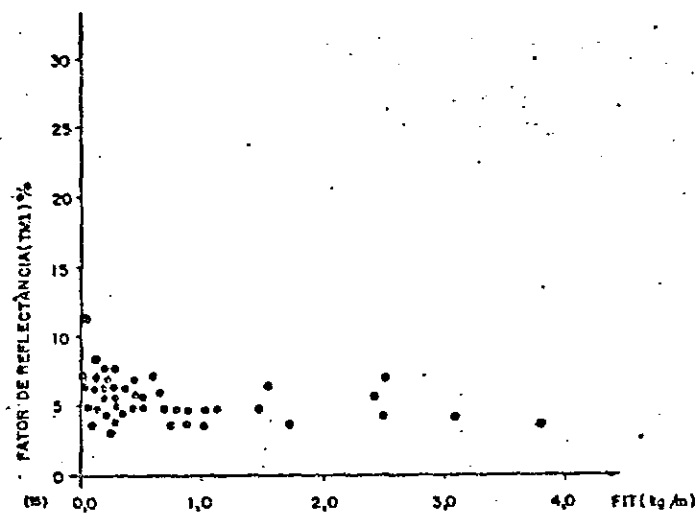


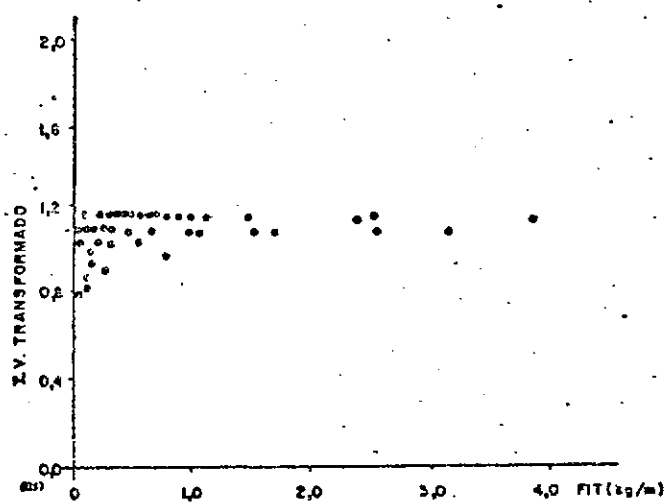
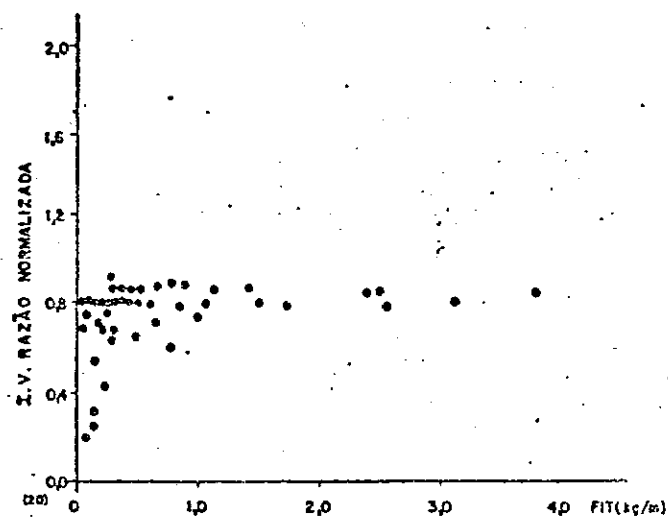
Figuras 4.1.1 a 4.1.21- Diagramas de dispersão ilustrando as tendências gerais das relações entre 7 variáveis espectrais da espectroscopia de campo (as 4 bandas simuladas TM1, TM2, TM3 e TM4 e os índices de vegetação RRS, RND e RTV) e as variáveis agrônômicas IAF, FIT e COV, para as culturas do trigo e do feijão conjuntamente.











Além deste aspecto, é interessante a constatação de que as relações variáveis espectrais versus IAF, FIT e COV apresentaram, para cada par de variável, as mesmas tendências de comportamento, tanto para o trigo como para o feijão. Quer dizer, não obstante as peculiaridades de cada cultura que poderiam interferir naquele relacionamento (como arquitetura das plantas, diferenças fenológicas, espaçamentos, etc), ainda assim a tendência geral das relações para cada par de variáveis é mantida.

Outro ponto a ser abordado refere-se à grande dispersão encontrada para os dados de espectroscopia de campo (conforme as Figuras 4.1.1 a 4.1.21). Esta dispersão deve ter sido ocasionada por vários fatores verificados durante a fase de obtenção das medições "in situ", ou sejam: diversidade das condições de medição, diferenças de horários entre as várias medições, diversidade de estágios culturais para as diversas áreas, condições gerais diferentes para as várias áreas, etc. Isto é perfeitamente justificável e até esperado quando se faz um experimento de sensoriamento remoto, como o da presente pesquisa, em que os canteiros experimentais são os próprios talhões comerciais das fazendas, utilizados como áreas de estudo. Sugere-se que, quando se tiver os objetivos de aprofundar mais os conhecimentos e entendimentos sobre as complexas interações entre variáveis espectrais e variáveis biofísicas de culturas agrícolas, sejam feitos experimentos em que se tenha a possibilidade de maior controle sobre as variáveis de interesse (solos, condições de manejo, estágios, horários de medições, etc).

Em geral, as correlações entre as variáveis biofísicas e as variáveis espectrais mostraram-se melhores para os dados orbitais TM, quando comparadas com os mesmos tipos de correlações para os dados de espectroscopia de campo; contudo, como já foi afirmado antes, as relações são similares para ambos os sensores.

Deve-se levar em conta, conforme assinalam AASE et al. (1984), as diferenças quanto aos procedimentos de amostragem de cada um dos dois tipos de sensores utilizados - enquanto o TM cobre um elemento de resolução no terreno (ERT) da ordem de

900 m², o radiômetro de campo integra a resposta radiativa de uma área de aproximadamente 0,20 m². Conseqüentemente, tornam-se muito mais representativas das áreas agrícolas as amostragens feitas pelo sensor orbital.

Por outro lado, quaisquer variações de amostragem na espectroscopia "in loco" introduzem desvios significativos nos valores medidos. Por exemplo, considerando-se uma cultura de feijão num estágio em que as plantas ainda não recobriram totalmente o solo, podem ocorrer vários tipos de amostragem, como está ilustrado na Figura 4.2.

Poder-se-ia citar vários fatores que modificariam a resposta das mensurações radiométricas de campo, entre eles destacando-se: os tipos de solos (KOLLENKARK et al., 1982b; COLWELL, 1974a,b; JACKSON et al., 1983; HUETE et al., 1984, 1985; EZRA et al., 1984; CLEVERS, 1988); o horário do dia em que são feitas as medições versus sombreamento, orientação das fileiras de plantio, fatores estes que poderiam ser denominados de "fatores geométricos" (RANSON et al., 1981, 1985; JACKSON et al., 1979; VANDERBILT et al., 1981); a altura e os ângulos de medição, que influenciam no tamanho e na composição da área de terreno amostrada, em termos de quantidade de vegetação, de solos e de sombras (JACKSON et al., 1980).

Torna-se, então, necessário um conjunto de precauções importantes a serem tomadas durante os trabalhos de espectroscopia de campo, a fim de que a validade e a precisão destas mensurações radiométricas sejam aumentadas e os dados sejam comparáveis com os de outras áreas e/ou de outras pesquisas. Para tanto, sugere-se seguir o que é recomendado por JACKSON et al. (1980).

Contudo, os dados radiométricos coletados "in situ" para a presente pesquisa corroboraram as tendências e indicações obtidas através de dados coletados pelo sensor TM/Landsat-5, aumentando amplamente a confiabilidade daquelas relações e denotando a importância da espectroscopia de campo em apoio ao sensoriamento remoto orbital.

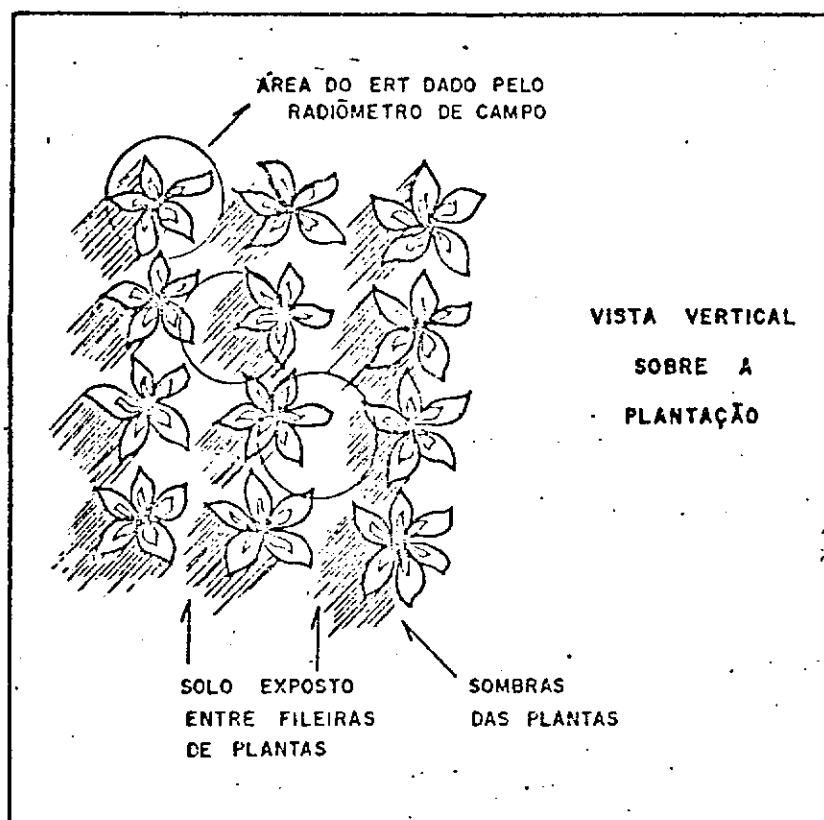


Figura 4.2- Ilustração de algumas possibilidades de amostragem quando se utiliza espectroscopia de campo.

CAPÍTULO 5

DADOS DE SATÉLITE NA AVALIAÇÃO DE RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E AGRONÔMICAS (I)

5.1. Introdução

Dentre as principais metas da pesquisa em sensoriamento remoto agrícola destaca-se a de estimar variáveis agronômicas indicadoras das condições de culturas via variáveis espectrais obtidas por sensores em níveis distintos de coleta de dados.

Atualmente, já existem modelos de crescimento/ produtividade para as principais culturas, os quais baseiam-se em dados meteorológicos (p.ex.: temperaturas máximas e mínimas, umidade do ar, etc.); contudo, são dados pontuais e de coleta trabalhosa. Além disso, não levam em consideração condições do solo, pragas, doenças, seca, granizo, nematóides, nutrientes, etc.

Os dados espectrais, segundo WIEGAND (1984), podem suprir esta carência e servir como excelentes indicadores das condições gerais de vigor das culturas agrícolas, para áreas grandes e contínuas (e não apenas de forma pontual), podendo atuar, também, como dados de entrada e guias para melhorar o desempenho dos modelos acima referidos.

Desta maneira, objetiva-se neste trabalho, trazer subsídios para questões relacionadas a se determinar como são,

efetivamente, as relações entre alguns parâmetros espectrais e algumas variáveis agronômicas da cultura de feijão; em que nível de significância elas ocorrem e quais são as faixas espectrais portadoras do maior conteúdo de informações culturais; entre outras abordagens.

Os dados agronômicos para esta pesquisa foram coletados em 42 áreas de feijão irrigadas por sistemas de pivô central durante o ciclo de inverno de 1987, na região de Guaiúba/Barretos, a noroeste Estado de São Paulo, Brasil.

Em função de serem citados como os principais indicadores das condições de vigor das culturas, os parâmetros agronômicos coletados nas referidas 42 áreas de feijão e utilizados neste trabalho foram o índice de Área Foliar (áreas das camadas de folhas por superfície de terreno ocupada pelas plantas), Fitomassa Seca (g/m) e Porcentagem de Cobertura do Terreno por Vegetação, simbolizados respectivamente por IAF, FIT E COV.

Quanto aos dados espectrais, utilizando-se a CCT ("compatible computer tape") referente à passagem TM/LANDSAT-5 do dia 20 de junho de 1987, obtiveram-se 5 amostras de níveis de cinza (nas seis bandas refletivas do TM) com 12 pixels cada amostra, para cada uma das 42 áreas de feijão estudadas. Antes de se extrair os níveis de cinza foi feita uma correção para valores aditivos dos efeitos atmosféricos conforme proposição de SCHOWENGERDT (1983).

Em seguida, os níveis de cinza foram transformados para valores de reflectâncias TM, conforme os procedimentos propostos por MARKHAM e BARKER (1986).

Com os valores das reflectâncias TM3 e TM4 foram obtidos três índices espectrais de vegetação, conforme segue:

(a) RAZÃO SIMPLES (JORDAN, 1969); designado por RRS:

$$RRS = TM4/TM3$$

(b) DIFERENÇA NORMALIZADA (ROUSE et al., 1973),
 designado por RND:

$$RND = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$$

(c) ÍNDICE DE VEGETAÇÃO TRANSFORMADO (DEERING et al., 1975), designado por RTV:

$$RTV = \sqrt{RND + 0,5}$$

Com os valores dos parâmetros agronômicos (IAF, FIT E COV) e das variáveis espectrais (reflectâncias nas 6 bandas individuais TM e 3 índices de vegetação) foram feitas análises de regressão segundo os modelos linear simples, logarítmico e exponencial (ZAR, 1974), a fim de verificar quais os tipos e as significâncias das relações entre os dois tipos de variáveis. Análises gráficas dos diagramas de dispersão das 3 variáveis agronômicas versus as 9 variáveis espectrais também mostraram-se úteis para algumas discussões.

5.2. Resultados e discussão

Os coeficientes de correlação e os melhores tipos de ajustes, segundo os modelos linear, logarítmico e exponencial, obtidos por análise de regressão entre as 3 variáveis agronômicas (IAF, FIT e COV) e as 9 variáveis espectrais utilizadas (6 bandas refletivas TM e 3 índices de vegetação), são apresentados na Tabela 5.1.

Pela Tabela 5.1, verifica-se que os modelos que melhor ajustam as relações entre as 3 variáveis agronômicas (IAF, FIT e COV) com as 9 variáveis espectrais são os curvilineares logarítmico (20 casos) e exponencial (6 casos), a não ser para um único par de variáveis (IAF x RRS), para o qual, o modelo linear mostrou-se ligeiramente melhor.

Tomando-se, por exemplo, os diagramas de dispersão entre as variáveis reflectância TM3 x IAF (Figura 5.1a) e reflectância TM4 x IAF (Figura 5.1b), torna-se mais clara a fundamentação para estes tipos de ajuste.

A diminuição dos valores de reflectância no vermelho (TM3), na Figura 5.1a, à medida em que avança o ciclo biológico do feijão, é função do aumento do IAF, que propicia aumento da

quantidade de clorofila, aumentando, em consequência, a absorção de radiação pela clorofila (HOFFER, 1978). Esta absorção aumenta até um máximo e, a partir deste ponto, fica constante, região onde a curva torna-se assintótica.

Já no caso do infravermelho próximo (TM4), na Figura 5.1b, o comportamento é inverso. Ou seja, no início do ciclo (quando o IAF e os outros parâmetros agronômicos da cultura são ainda baixos) ocorre pouca reflexão. Com o avanço do ciclo biológico, o número de folhas aumenta rapidamente (de maneira horizontal - refletindo na Porcentagem de Cobertura Vegetal sobre o terreno; e de maneira vertical - aumentando o número de camadas de folhas na mesma área de terreno e aumentando o IAF).

TABELA 5.1- Coeficientes de correlação e regressões pelos modelos linear simples, logarítmico e exponencial para os diversos pares formados pelas 3 variáveis agronômicas e 9 variáveis espectrais estudadas

VAR. AGR.	VAR. X ESP.	VALORES DE CORRELAÇÃO			MELHORES MODELOS	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SEGUNDO OS MELHORES MODELOS
		LINEAR	LOG.	EXPON.		
IAF	RTM1	0,33	0,33	0,34	EXP. b>1	LOG (RTM1) = 0,21 - 0,01.IAF
	RTM2	0,38	0,43	0,36	LOG. b>0	RTM2 = 3,58 + 0,55.LOG (IAF)
	RTM3	-0,64	-0,83**	-0,67	LOG. b<0	RTM3 = 3,57 - 1,64.LOG (IAF)
	RTM4	0,77	0,77**	0,75	LOG. b>0	RTM4 = 26,30 + 17,15.LOG (IAF)
	RTM5	0,63	0,65**	0,63	LOG. b>0	RTM5 = 14,11 + 4,16.LOG (IAF)
	RTM7	-0,27	-0,41*	-0,22	LOG. b<0	RTM7 = 5,62 - 1,10.LOG (IAF)
	RRS	0,79**	0,78	0,76	LIN. b>0	RRS = 4,42 + 2,59.IAF
	RND	0,70	0,93**	0,64	LOG. b>0	RND = 0,70 + 0,31.LOG (IAF)
	RTV	0,69	0,94**	0,67	LOG. b>0	RTV = 1,09 + 0,15.LOG (IAF)
FIT	RTM1	0,20	0,31	0,21	LOG. b>0	RTM1 = 1,79 + 0,11.LOG (FIT)
	RTM2	0,22	0,40*	0,19	LOG. b>0	RTM2 = 3,86 + 0,47.LOG (FIT)
	RTM3	-0,47	0,81**	-0,51	LOG. b<0	RTM3 = 2,81 - 1,42.LOG (FIT)
	RTM4	0,61	0,79**	0,58	LOG. b>0	RTM4 = 34,90 + 16,19.LOG (FIT)
	RTM5	0,53	0,68**	0,51	LOG. b>0	RTM5 = 16,32 + 4,03.LOG (FIT)
	RTM7	-0,14	0,38*	-0,11	LOG. b<0	RTM7 = 5,17 - 0,89.LOG (FIT)
	RRS	0,64	0,80**	0,58	LOG. b>0	RRS = 12,49 + 7,38.LOG (FIT)
	RND	0,50	0,89**	0,45	LOG. b>0	RND = 0,84 + 0,26.LOG (FIT)
	RTV	0,49	0,89**	0,47	LOG. b>0	RTV = 1,16 + 0,12.LOG (FIT)
COV	RTM1	0,29	0,30	0,32	EXP. b>0	LOG (RTM1) = 0,19 + 0,001.COV
	RTM2	0,37	0,41	0,38	LOG. b>0	RTM2 = 2,21 + 0,79.LOG (COV)
	RTM3	-0,76	-0,73	-0,78**	EXP. b<0	LOG (RTM3) = 0,75 - 0,003.COV
	RTM4	0,82	0,72	0,88**	EXP. b>0	LOG (RTM4) = 0,99 + 0,006.COV
	RTM5	0,70	0,62	0,72	EXP. b>0	LOG (RTM5) = 0,97 + 0,002.COV
	RTM7	-0,38	-0,38	-0,38	LOG. b<0	RTM7 = 8,84 - 1,85.LOG (COV)
	RRS	0,83	0,71	0,88**	EXP. b>0	LOG (RRS) = 0,23 + 0,009. (COV)
	RND	0,87	0,90	0,85	LOG. b>0	RND = 0,13 + 0,49.LOG (COV)
	RTV	0,87	0,91	0,87	LOG. b>0	RTV = 0,68 + 0,24.LOG (COV)

* significativo ao nível de 5%

** significativo ao nível de 1%

OBS.: A significância das correlações só foi verificada para o melhor dos três modelos, em cada caso.

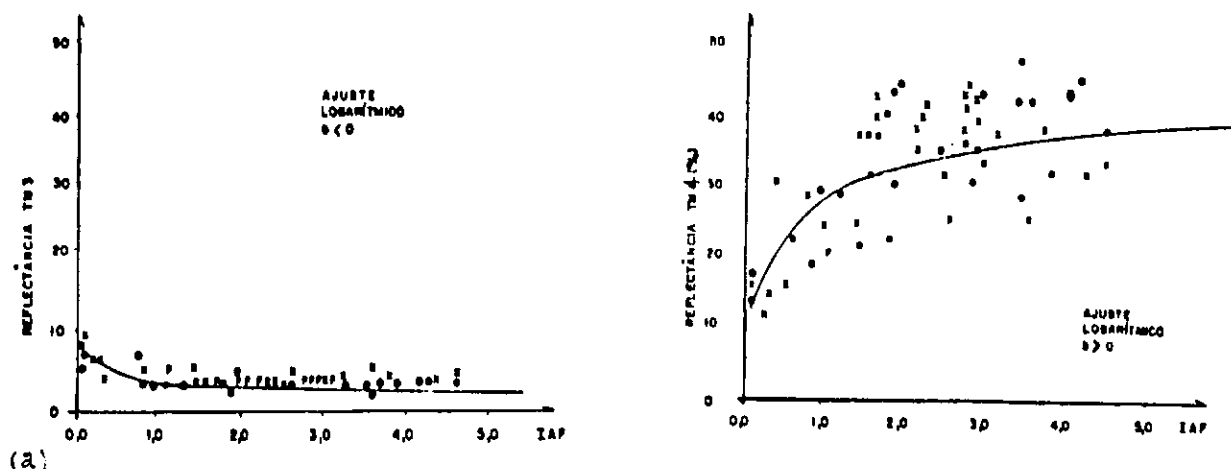


Figura 5.1- Diagramas de dispersão e ajustes entre as variáveis reflectância TM3 x IAF (a) e TM4 x IAF (b), para áreas com cultura de feijão.

Com os progressivos aumentos do IAF, crescem também os "efeitos multiplicativos" da reflexão, até o ponto em que se atinge o máximo de reflexão dado pela "reflectância infinita" (ALLEN e RICHARDSON, 1968). Deste ponto para a frente a curva IAF x TM4 passa a ser assintótica.

O ponto de início da assíntota para as reflectâncias TM3 (vermelho) é por volta de $IAF = 1,5$ (Figura 5.1a); e para as reflectâncias TM4 (infravermelho próximo), parece estar para IAF acima de 5,0 (Figura 5.1b). Isto está de acordo com CHANCE e LEMASTER (1977) os quais, utilizando o modelo de reflectância de SUITS (1972), calcularam que, para o algodão, a reflectância de dossel é insensível a mudanças de IAF, quando o IAF excede a 2,2 (para a região visível) e a 6,2 (para o infravermelho).

A dispersão dos pontos verificada nas vizinhanças da linha de ajuste entre TM4 x IAF (Figura 5.1b) pode ser explicada principalmente pelo que foi denominado de "fenômeno de trajetória" por TUCKER et al. (1979) e por HOLBEN et al. (1980). Ou seja, à medida em que avança o ciclo biológico do feijão, o IAF tem seus valores aumentando progressivamente até um platô (que provavelmente demarca o início da senescência); depois, vai

decrecendo e assumindo valores semelhantes aos IAFs anteriores ao referido platô; porém, dado que as condições fenológicas gerais da cultura são diferentes nos períodos pré e pós-platô, para mesmos valores de IAF (antes e após platô) as reflectâncias TM4 são diferentes.

Isto faz evidenciar também que há um período do ciclo (anterior ao início da senescência) em que as correlações e ajustes entre variáveis agronômicas e variáveis espectrais são melhores para a cultura de feijão.

Deve-se indicar ainda que todas as afirmações feitas até aqui para o IAF devem, muito provavelmente, ocorrer para as outras variáveis agronômicas também.

Na Figura 5.2, apresentam-se os comportamentos das variáveis agronômicas e espectrais de maior interesse, durante o ciclo do feijão.

Faz-se necessário ressaltar que as curvas da Figura 5.2a foram obtidas com os dados de algumas das áreas de feijão plantadas mais tardiamente em relação às outras; já para as curvas das Figuras 5.2b e 5.2c foram utilizadas as médias das 42 áreas para os respectivos parâmetros.

Os dados utilizados para se obter as correlações da Tabela 1 foram os da passagem TM/Landsat-5 de 20 de junho de 1987, na qual as áreas de feijão apresentavam idades variando entre 12 e 73 dias após plantio (em média); sendo que o tempo de duração das lavouras de inverno de 1987, nas 42 áreas estudadas, esteve entre 95 e 107 dias.

Assim sendo, fica claro que as áreas de feijão (com idades entre 12 e 73 dias no dia da passagem TM/Landsat-5) estavam na fase em que as variáveis agronômicas (Figura 5.2a) estavam ainda em sua dinâmica de crescimento pré-senescência. Isto deve ter sido, também, um dos motivos para os altos valores de correlação encontradas na Tabela 5.1, para as principais variáveis de interesse. Realmente, nas Figuras 5.2b e 5.2c verificam-se os comportamentos das variáveis espectrais coerentes com esta fase

de desenvolvimento vegetativo crescente anterior à pré-senescência da cultura, conforme já foi abordado no início destas discussões.

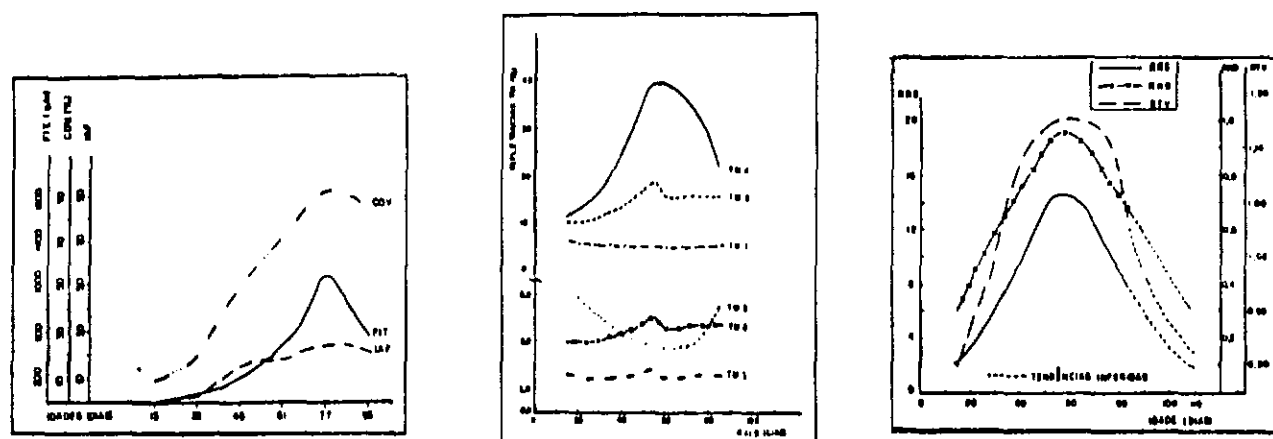


Figura 5.2- Comportamento das principais variáveis ao longo do ciclo do feijão: (a) IAF, FIT e COV; (b) reflectâncias TM3, TM4 e TM5; e (c) índices de vegetação RRS, RND e RTV.

Pela Figura 5.2c nota-se também a grande correspondência entre os comportamentos dos três índices de vegetação, havendo, portanto, equivalência funcional entre eles. Isto permite indicar que estes índices espectrais de vegetação não devem ser utilizados conjuntamente num mesmo trabalho. Provavelmente deve ser mais proveitoso se os índices lineares de vegetação (como os três I.V. utilizados nesta pesquisa) forem utilizados em conjunto com os índices ortogonais (como, p.ex., a "greenness" de KAUTH e THOMAS, 1976 OU O "PVI" de RICHARDSON e WIEGAND, 1977), uma vez que as fundamentações físicas e fisiológicas para cada tipo de índice são distintas.

5.3. Conclusões

É bem conhecido que há uma grande necessidade para um entendimento melhor das complexas interações entre variáveis biofísicas e variáveis espectrais de culturas agrícolas.

Com os materiais e os métodos usados na presente pesquisa, foi possível chegar a algumas considerações conforme seguem.

Existe um relacionamento curvilinear (logarítmico ou exponencial) entre as variáveis espectrais reflectâncias TM3 e TM4 (e índices lineares de vegetação delas derivados) com as variáveis agronômicas IAF, FIT e COV, sendo os coeficientes de correlação altos e significativos.

Os fundamentos físicos e fisiológicos para os comportamentos encontrados (relações variáveis versus variáveis agronômicas) estão inteiramente coerentes com a teoria sobre a interação da radiação eletromagnética com a vegetação.

A fase de desenvolvimento vegetativo (anterior ao início da senescência) deve ser a melhor para as correlações e ajustes entre variáveis agronômicas e variáveis espectrais.

Há grande equivalência funcional entre os três índices de vegetação utilizados: RRS, RND e RTV; principalmente entre RND e RTV.

CAPÍTULO 6

DADOS DE SATÉLITE NA AVALIAÇÃO DE RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS ESPECTRAIS E AGRONÔMICAS (II)

6.1. Introdução

A utilização de sensoriamento remoto em agricultura pode ser feita com múltiplos produtos. Normalmente o que se usa é a banda simples, ou seja o registro das informações em uma banda espectral determinada. A disponibilidade de várias bandas espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos em conjunto com os modos de operação dos vários sistemas sensores. Quanto mais bandas espectrais dispuser um sistema sensor mais possibilidades de extração de informações ele fornece. Entretanto, quando o número de bandas espectrais aumenta, há um concomitante acréscimo de dificuldade de integração dos múltiplos dados (MATHER, 1987, p.319).

Uma abordagem para reduzir a dimensionalidade dos dados e aumentar a eficiência de extração de informações tem sido o uso de índices de vegetação. Um índice de vegetação é a integração de duas ou mais bandas espectrais segundo um procedimento determinado, cuja finalidade é realçar características da vegetação como biomassa, vigor vegetativo, índice de área foliar, etc. em relação aos solos.

O índice espectral de vegetação mais comumente utilizado é o obtido pela razão entre as reflectâncias no infravermelho próximo (IV) e no vermelho (V), denominado Razão Simples.

Outro tipo de concepção de índice de vegetação é o que envolve alteração da ortogonalidade dos eixos de dispersão dos dados (conhecido como sendo do tipo "ortogonal"), gerando novos valores. Os dois exemplos mais conhecidos são o índice "Greenness" de KAUTH e THOMAS (1976) e o índice Perpendicular de Vegetação (PVI) de RICHARDSON e WIEGAND (1977).

Grande parte dos trabalhos envolvendo o uso de bandas simples e mesmo de índices (lineares ou ortogonais) para avaliação de parâmetros de interesse agrônomo foram realizados com radiômetros de campo, em condições experimentais. Entretanto, como se dispõe de imagens de satélite, é de interesse que relações entre dados espectrais e agrônômicos também sejam buscadas nesses produtos. Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar os produtos TM/Landsat-5 quando utilizados na construção de índices espectrais de vegetação.

6.2. Os índices "Razão" e "PVI"

Os índices de vegetação, como afirmam JACKSON et al. (1980), representam características dos dosséis de plantas, tais como o índice de Área Foliar, a Fitomassa, o Peso da Matéria Verde, o Peso da Matéria Seca, a Porcentagem de Cobertura do Terreno por Vegetação, etc.

A Razão Simples (IV/V) foi proposta e utilizada pela primeira vez por JORDAN (1969) como um estimador espectral da vegetação. Desde então, ela tem sido utilizada por um grande número de autores.

A sensibilidade desse índice à vegetação encontra explicação nas propriedades de reflexão das plantas. Numa vegetação verde a luz vermelha (630-670 nm) é absorvida pela clorofila, com pouca transmissão e pouca reflexão; ao passo que,

no infravermelho próximo (700-1300 nm), a absorção é quase zero e a reflectância e a transmitância são altas (KNIPLING, 1970), devido à estrutura interna das folhas, como frizam vários autores (GATES et al., 1965; BAUER et al., 1980; GAUSMAN, 1985).

Desta maneira, à medida em que aumenta a quantidade de vegetação, a reflexão na banda do infravermelho próximo (IV) aumenta e a reflexão na banda do vermelho (V) diminui, fazendo com que o aumento da Razão IV/V seja potencializado, realçando a vegetação.

Quando várias camadas de folhas vão sendo sobrepostas num dossel em desenvolvimento, concomitantemente vão ocorrendo aumentos nos níveis de reflectância nas porções espectrais do IV, em função do efeito das "reflectâncias múltiplas" descrito por ALLEN e RICHARDSON (1968), até que se atinja um valor estável máximo, denominado de "reflectância limite" (simbolizada por R_{∞}) por aqueles autores.

O índice perpendicular de vegetação (PVI) baseia-se na observação de que diferentes solos ou o mesmo solo em diferentes condições de umidade compõem uma mesma reta no plano XY de reflectância definido pelas bandas TM3 e TM4 (vermelho e infravermelho, respectivamente). A distribuição de reflectâncias de solo e vegetação nesse plano mostra que a base da distribuição dos pontos é constituída pela linha de solos e os pontos acima dessa linha são de vegetação. A maior ou menor distância do ponto de vegetação em relação à linha de solos indica maior ou menor desenvolvimento da vegetação. Essa distância é sempre medida perpendicularmente à linha de solos como ilustrado na Figura 6.1.

A linha de solo é dada pela equação [1]:

$$Y = a_0 + a_1 X \quad [1]$$

Os coeficientes a_0 e a_1 são obtidos pela regressão linear dos dados de solos. Para encontrar a distância perpendicular da linha até um determinado ponto qualquer do espaço bidimensional XY, deve-se reduzir a equação da reta à forma normal e substituir as

coordenadas do ponto na equação [2], ou seja,

$$PVI = (Y_i - a_i X_i - a_0) / [1^2 + (-a_i)^2]^{1/2} \quad [2]$$

onde o subscrito i indica que X_i e Y_i são coordenadas de um ponto fora da linha de solos e que por conveniência é chamado de ponto de vegetação. Maiores detalhes sobre o PVI podem ser obtidos em JACKSON et al. (1980).

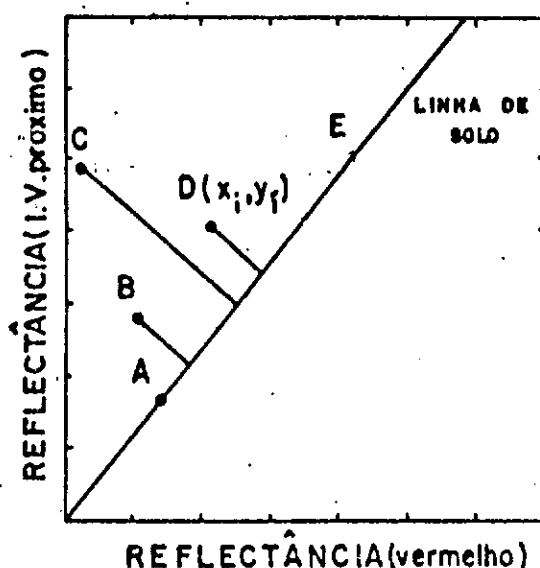


Figura 6.1- Diagrama da Linha de Solos e dos pontos de vegetação para o cálculo do PVI.

O relacionamento entre variáveis espectrais (como os índices de vegetação, p. ex.) e variáveis biofísicas dos dosséis pressupõe o conhecimento de como variam estes parâmetros, uma vez que isto é básico para o entendimento daquelas relações.

Assim, FORMAGGIO (1989) encontrou, por exemplo, que o índice de Área Foliar (IAF) e a Porcentagem de Cobertura Vegetal sobre o Terreno (COV) variam de maneiras distintas para o trigo e o feijão.

No caso do trigo, COV e IAF variam, como é mostrado na Figura 6.2(a), de modo relativamente interdependente: a variável COV cresce rapidamente no início do ciclo (em função, principalmente, do espaçamento entre plantas ser estreito), ao

passo que o IAF assume um crescimento rápido por volta dos 31 dias de idade, quando praticamente a COV atinge o máximo. Neste momento, a COV mantém-se em seu ponto de saturação máxima (100%), ao passo que o IAF continua crescendo até por volta dos 47-50 dias e depois começa a cair, enquanto a COV continua em seu patamar elevado.

No caso do feijão, a dinâmica das variáveis COV e IAF ao longo do ciclo é distinta da do trigo. Como é mostrado na Figura 6.2(b), o IAF e a COV caminham, no decorrer do ciclo, de maneira a crescerem de forma não intensa, porém, contínua, até o último quarto do ciclo.

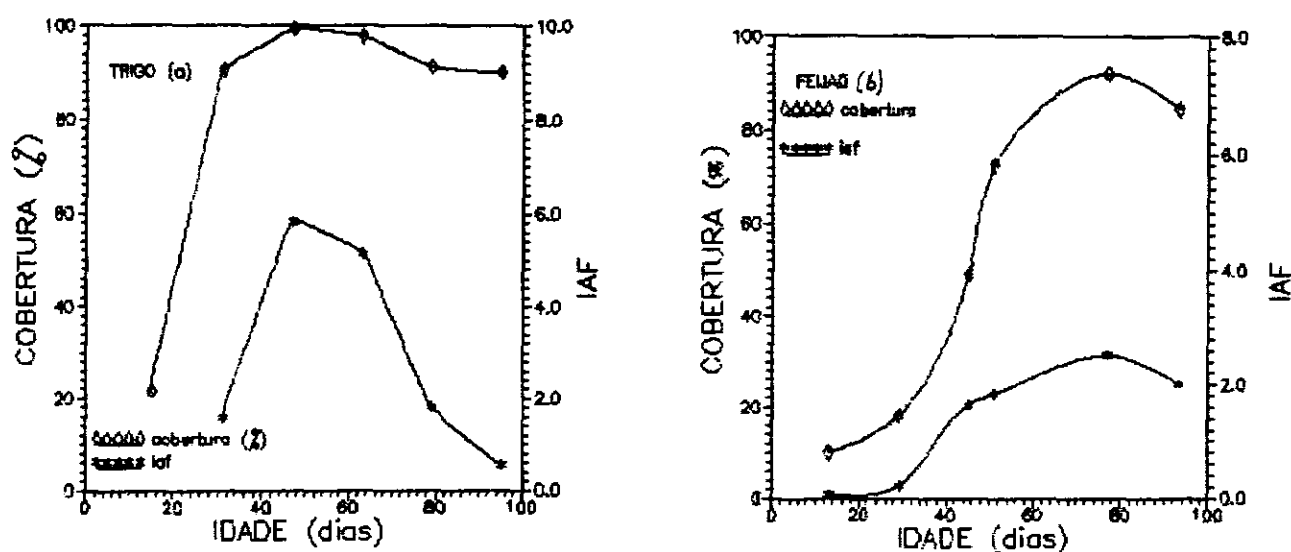


Figura 6.2- Dinâmica das variáveis IAF e COV ao longos dos ciclos das culturas de trigo (a) e de feijão (b).

FONTE: FORMAGGIO (1989)

Evidentemente, estas interrelações entre as duas variáveis biofísicas exercem papel de destaque na integração entre radiação eletromagnética e dosséis agrícolas do trigo e do feijão, devendo ser adequadamente consideradas.

Para a realização desse trabalho foram coletados dados sobre índice de Área Foliar, Percentagem de Cobertura do solo pelo método descrito em HEILMAN et al. (1981) e Teor de Clorofila (em mg/g) pelo método de ARNON (1946) de 15 campos de trigo e de 15 de feijão em condições comerciais de cultivo irrigado. Também foram obtidos os valores de densidade de clorofila, que é o valor do teor foliar de clorofila multiplicado pelo índice de área foliar. TUCKER (1978) utiliza a concentração de clorofila, definida como a multiplicação do teor foliar de clorofila pelo peso da matéria verde, para obter um valor que expresse volumetricamente a quantidade de clorofila no campo.

Os dados de satélite foram obtidos do sensor TM ("Thematic Mapper") do Landsat-5. Esse sensor fornece dados em sete bandas espectrais distribuídas pela região visível (3 bandas), infravermelho próximo (1 banda), infravermelho médio (2 bandas) e infravermelho termal (1 banda) (EPIPHANIO, 1988).

Os dados digitalizados de satélite, referentes à órbita/ponto 221/74, de 17/06/86, foram corrigidos para efeitos atmosféricos pelo método do histograma mínimo (SCHOWENGERDT, 1983), e amostras de valores digitais foram obtidas sobre os três tipos de solos predominantes na região e sobre os trinta campos de cultivo. Os valores digitais corrigidos foram utilizados para as correlações e transformações em índices espectrais. Os valores digitais das áreas de solo serviram para a construção da linha de solos e a determinação do valor do índice perpendicular de vegetação (PVI) de cada campo de cultivo.

Nesse trabalho os parâmetros espectrais utilizados serão a banda TM4 (infravermelho próximo), o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a razão entre o infravermelho e o vermelho (TM4/TM3). As análises serão baseadas nas correlações e relações gráficas entre os parâmetros espectrais e biofísicos, tendo em

vista o conhecimento teórico de comportamento espectral de alvos agrícolas.

6.3. Resultados e discussão

A observação da Figura 6.3 permite a constatação de que para os solos da região de estudo há uma grande relação entre os valores digitais das bandas TM3 e TM4, definindo a "linha de solo".

Para as áreas com culturas essa relação não é nítida, conforme pode ser observado na Figura 6.4.

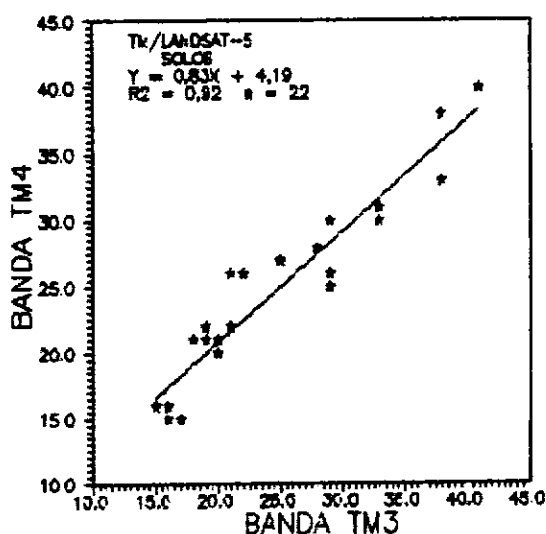


Figura 6.3- Relação entre as bandas TM3 e TM4 para os solos.

Entretanto, quando esses dados são juntados numa só figura, como na Figura 6.5, há uma dispersão característica mostrando uma "linha de solo" e uma região de dispersão das áreas vegetadas. A distância perpendicular de um ponto qualquer até a linha de solo é o índice perpendicular de vegetação (PVI), definido por RICHARDSON e WIEGAND (1977).

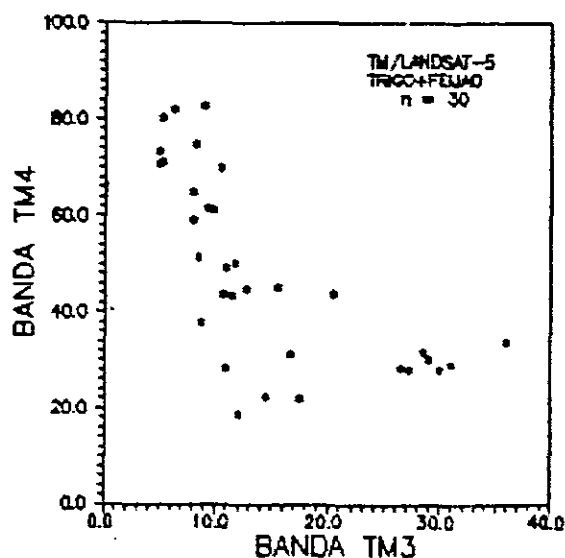


Figura 6.4- Relação entre as bandas TM3 e TM4 para as culturas.

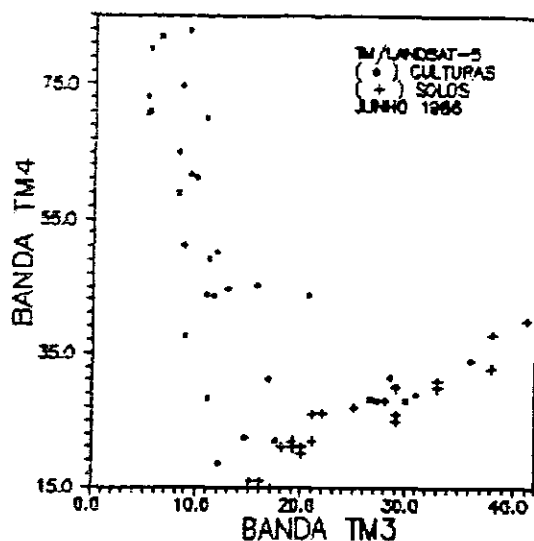


Figura 6.5- Relação entre as bandas TM3 e TM4 para os solos e as culturas conjuntamente.

Como se observam nessas figuras, os solos da região de estudo apresentam-se bem comportados no tocante à construção da "linha de solos". Da mesma forma a distribuição da vegetação agrícola segue a distribuição teoricamente prevista, conforme a proposição de RICHARDSON e WIEGAND (1977). Deve ser ressaltado que esses dados foram obtidos de imagens orbitais e referem-se a

áreas em condições naturais de cultivo envolvendo duas culturas distintas.

Como existe uma resposta dos parâmetros espectrais quanto às condições de vigor dos dosséis, é possível a busca do entendimento e do estabelecimento de relações entre parâmetros representativos dos dosséis.

Nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8 são mostradas as relações entre a porcentagem de cobertura do solo e três parâmetros espectrais (TM4, Razão Simples e PVI).

A porcentagem de cobertura do solo é um parâmetro que experimenta saturação quando atinge o valor de 100%. Isso faz com que, na região de saturação, variações na resposta espectral (devidas a aumentos de vigor) não tenham um correspondente aumento na porcentagem de cobertura do solo, conforme mostrado por FORMAGGIO (1989). As Figuras 6.6 e 6.7 (TM4 e PVI) são as que melhor exprimem esse relacionamento e se mostram menos sensíveis a tal saturação, com o PVI apresentando um coeficiente de determinação ligeiramente superior à banda TM4. A Razão (IV/V) (Figura 6.8) apresentou um relacionamento curvilíneo com fortes sinais de saturação para valores elevados de cobertura.

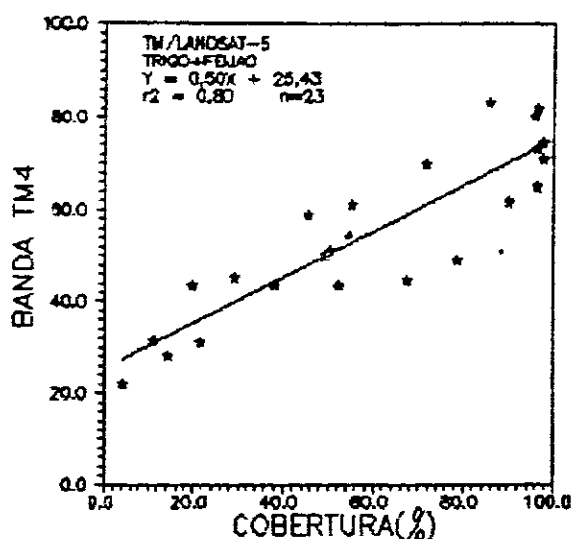


Figura 6.6- Relação entre a banda TM4 e a porcentagem de cobertura do solo.

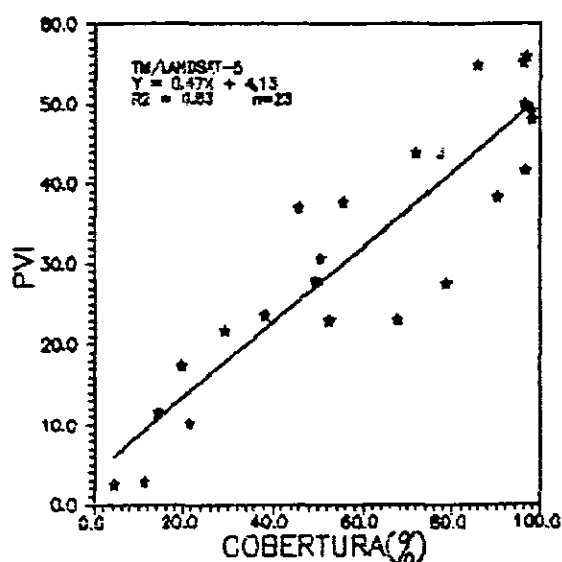


Figura 6.7- Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a porcentagem de cobertura do solo.

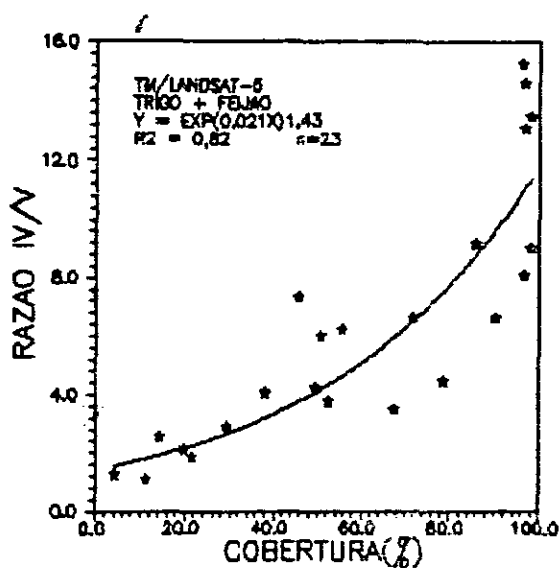


Figura 6.8- Relação entre a razão infravermelho/vermelho e a porcentagem de cobertura do solo.

Deve-se ressaltar nessas curvas o aumento de dispersão com o aumento da porcentagem de cobertura. Ou seja, acima de 50% de cobertura há maior dispersão dos dados. Isso pode ser explicado pelo fato de que até um determinado ponto do desenvolvimento da

cultura a percentagem de cobertura guarda uma estreita relação com o número de folhas e com a área foliar da cultura (Figura 6.9). A partir de tal ponto essa relação cai, pois há acréscimo da área foliar sem correspondente aumento da cobertura. Isso cria alterações na reflectância da cultura, principalmente na banda TM4, que passa a portar informações de duas variáveis (IAF e percentagem de cobertura) com taxas diferenciadas de variação.

Como pode ser observado na Figura 6.9, as áreas de trigo (T) tendo atingido o patamar de elevada cobertura experimentam grande variabilidade de índices de área foliar. É que devido ao pequeno espaçamento do trigo e sua alta densidade de plantio e poder de perfilhamento provoca rápida cobertura do solo e a partir daí continua aumentando seu índice de área foliar. Esse aumento de índice de área foliar não ocorre na mesma intensidade para os vários talhões, em função do tipo de solo, manejo, adubação e outros. Isso provoca dispersão desses dados para elevadas coberturas do terreno. Dado o caráter comercial de

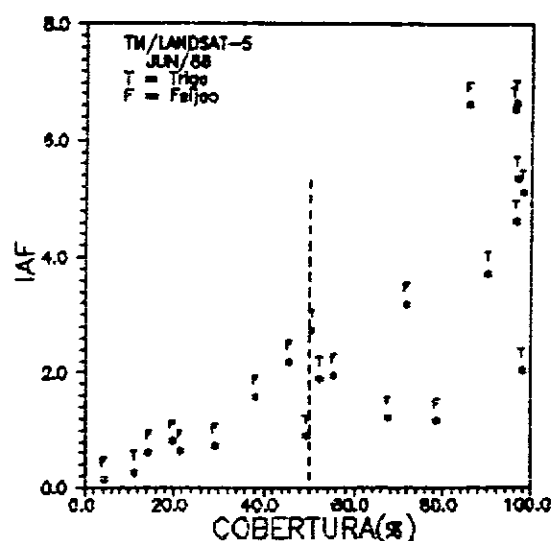


Figura 6.9- Relação entre percentagem de cobertura do solo e índice de área foliar (IAF).

exploração dos talhões de estudo, é inevitável a ocorrência de múltiplas práticas agrícolas indutoras de alterações de desenvolvimento e conseqüentemente de variações espectrais.

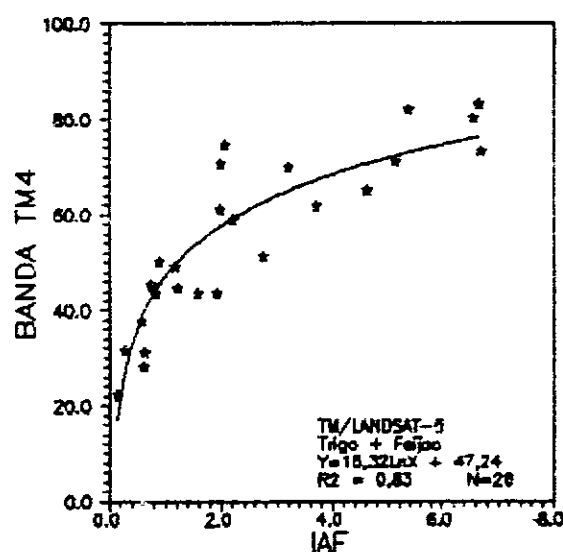


Figura 6.10- Relação entre a banda TM4 e o índice de área foliar (IAF).

Outro parâmetro agrônômico de interesse e possível de ser estudado com sensoriamento remoto é o índice de área foliar (IAF). Nesse estudo com trigo e feijão, as relações desse parâmetro com os espectrais são mostrados nas Figuras 6.10, 6.11 e 6.12. O que se observa é uma relação curvilínea do tipo exponencial entre o índice de área foliar e os parâmetros banda TM4 e PVI ($r^2=0,85$); e uma relação linear entre IAF e razão infravermelho/vermelho com razoável dispersão para valores de IAF superiores a 3,0.

Tanto para a banda TM4 quanto para o PVI (Figuras 6.10 e 6.11) observa-se que, com o acréscimo do índice de área foliar,

há uma tendência de saturação desses dois parâmetros espectrais. Isso ocorre principalmente devido ao efeito de "reflectância infinita" (R_{∞}) de ALLEN e RICHARDSON (1968). Nessa banda as folhas apresentam alta transmitância de energia, o que permite o fenômeno de reflexões múltiplas pelas diversas camadas foliares, ocasionando a expressão de tal comportamento.

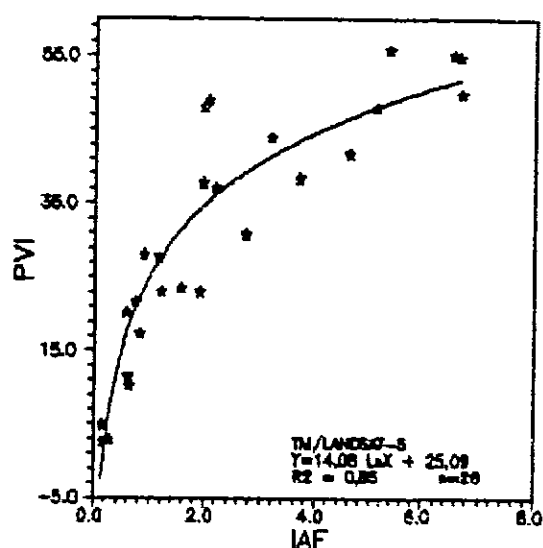


Figura 6.11- Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e o índice de área foliar (IAF).

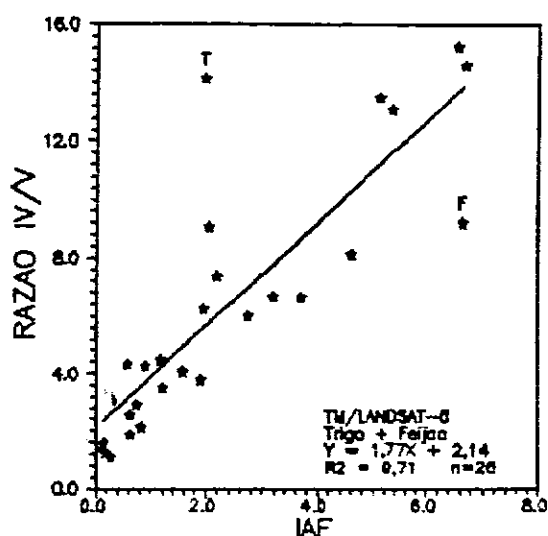


Figura 6.12- Relação entre a razão infravermelho/vermelho e o índice de área foliar (IAF).

No caso do parâmetro razão infravermelho/vermelho (Figura 6.12) observa-se que há uma boa relação com o IAF. A dispersão observada ocorre principalmente devido a variações intensas de determinados talhões quanto ao padrão esperado de valores de IAF. Nessa figura observa-se que os pontos assinalados por F e T afastam-se da reta; no campo tais pontos representam talhões com excessivo desenvolvimento vegetativo (caso do feijão, "F") ou baixo nível de perfilhamento (caso do trigo, "T"). Outros fatores que atuam sobre esse parâmetro espectral são o efeito de "reflectância máxima" (ALLEN e RICHARDSON, 1968) que afeta a banda infravermelha, e também o efeito de absorção diferenciada de energia no vermelho pelas duas culturas. O trigo possui maior teor de clorofila que o feijão, e isso influi na absorção de energia. Como a clorofila afeta principalmente uma das bandas da Razão IV/V (a do vermelho), o relacionamento da Razão com parâmetros agrônômicos pode desviar do esperado.

Um outro parâmetro agrônômico abordado neste trabalho, embora descrito com pouca ênfase na literatura, é a Densidade de Clorofila, ou seja, o teor de clorofila multiplicado pelo índice de Área Foliar. Esse parâmetro associa a massa foliar existente numa área a uma característica de fundamental importância em termos de sensoriamento remoto, que é a da capacidade de absorção de energia em dado comprimento de onda. Assim, uma cultura pode ter alta concentração foliar de clorofila, porém baixo índice de área foliar; outra pode ter características inversas. A densidade de clorofila procura expressar a integração da capacidade absorptiva desses dois componentes culturais.

Na Figura 6.13 observa-se que a banda TM4 possui uma relação curvilínea com a densidade de clorofila, o mesmo ocorrendo com o índice Perpendicular de Vegetação (Figura 6.14).

Levando em consideração que os dados espectrais foram obtidos a partir de dados de satélite, e que os dados agrônômicos foram obtidos em condições reais de cultivo em escala comercial, pode-se considerar que tais relações são relativamente bem ajustadas. A Figura 6.15 expressa uma relação linear entre a densidade de clorofila e a Razão IV/V. Este comportamento pode

indicar que a razão de bandas, por envolver bandas sensíveis a ambos os parâmetros constituintes da densidade de clorofila, apresenta-se como um bom indicador desse parâmetro agrônômico.

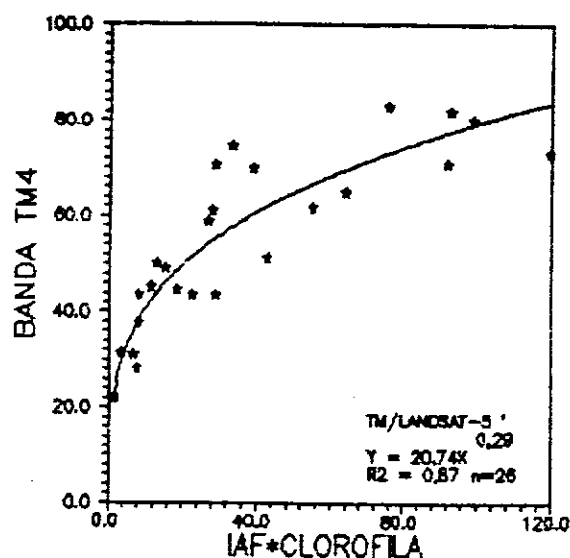


Figura 6.13- Relação entre a banda TM4 e a densidade de clorofila.

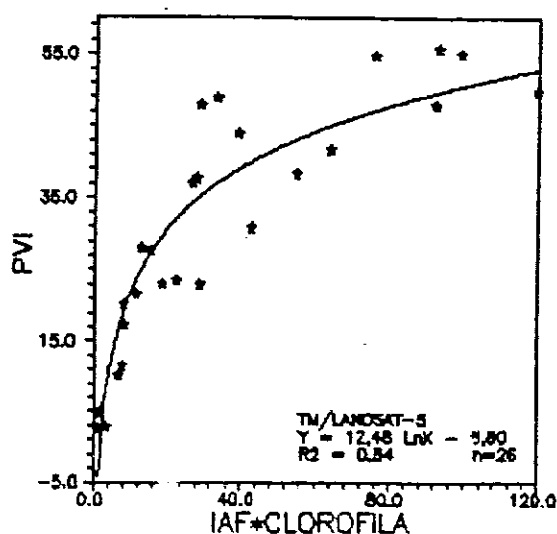


Figura 6.14- Relação entre o índice perpendicular de vegetação (PVI) e a densidade de clorofila.

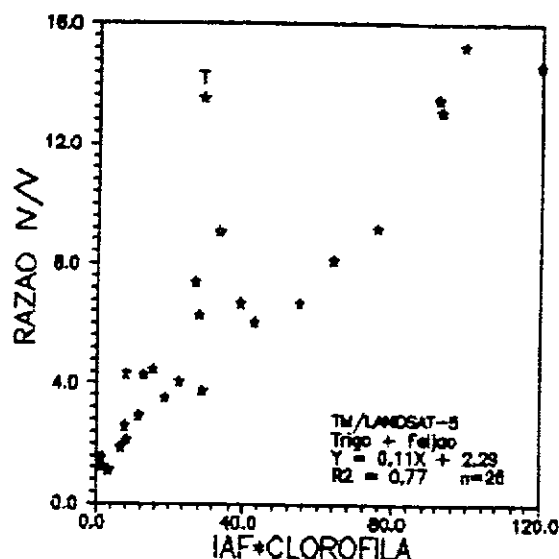


Figura 6.15- Relação entre a razão infravermelho/vermelho e a densidade de clorofila.

6.4. Conclusões

Esses resultados demonstram que para áreas irrigadas, onde foi conduzida a coleta de dados, são encontradas relações de interesse agrônomo entre parâmetros espectrais e parâmetros ligados às características das culturas.

As respostas espectrais dos solos da região mostraram-se distribuídas ao longo de uma linha reta no plano vermelho x infravermelho.

Através de procedimentos adequados de cálculos, é possível redistribuir todos os pontos tendo como referência tal linha, de modo a minimizar o efeito do solo sobre a resposta da vegetação. Com isso as respostas das culturas mostraram-se distribuídas acima dessa linha de solos, cujas localizações foram função do desenvolvimento vegetativo e do solo do talhão.

Embora o PVI tenha sido muito correlacionado com a banda TM4, a possibilidade de minimização do efeito de solo deve ser ressaltada. Sua construção deve ser testada para outros conjuntos de solos e outras culturas, particularmente as de verão não-irrigadas. Dado que características intrínsecas da espécie (p.ex. teor de clorofila) e condições de cultivo desempenham papel importante no comportamento dos parâmetros espectrais, estudos voltados ao entendimento de tais relações devem ser aprofundados.

CAPÍTULO 7

IDENTIFICAÇÃO DO SURGIMENTO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL TÍPICO DE VEGETAÇÃO EM IMAGENS DE SATÉLITE.

7.1. Introdução

O aspecto de multitemporalidade apresentado pelos satélites de recursos naturais permite que sistemas dinâmicos possam ser acompanhados e tenham suas diversas fases monitoradas pelos sensores remotos. A agricultura funciona como um sistema altamente dinâmico, prestando-se à abordagem multitemporal. Quando se trata de culturas anuais, em aspectos relacionados à avaliação de produção, as técnicas de sensoriamento remoto podem contribuir na identificação da cultura, na estimativa da área plantada e mesmo na estimativa da produtividade.

Segundo BADHWAR e HENDERSON (1981) o conhecimento da fenologia da cultura para aplicações de sensoriamento remoto é importante em a) modelagem de produção, para determinar os efeitos dos fatores meteorológicos durante cada estágio de desenvolvimento; b) avaliação da condição das culturas, para determinar fatores como estresse hídrico; e c) estimativa de área, para interpretar mudanças no comportamento espectral das culturas durante a estação de crescimento.

Dentre os diversos estágios fenológicos, um que deve ser ressaltado pela sua importância é a data de emergência. Vários modelos de simulação de crescimento e de fenologia de culturas, que são desenvolvidos como ferramentas de pesquisa e para

aplicações na medição de vários parâmetros agrônômicos, requerem a data de plantio da cultura para seu início.

BADHWAR e THOMPSON (1983) propuseram um método para determinação do que chamaram "data de emergência espectral" baseado no índice de "greenness" de KAUTH e THOMAS (1976). O método é aplicável a nível de pixel (talhão), baseia-se no comportamento espectral do alvo constituinte do pixel, e portanto independe da região em que é aplicado.

Os autores não fizeram distinção entre as diversas culturas quanto ao tempo transcorrido entre a data de plantio e a data da emergência espectral. Devido às diferenças de densidade de plantas adequadas a cada cultura, incluindo número de plantas por metro linear e espaçamento entre fileiras, e às diferenças de características de desenvolvimento de cada cultura, o tempo transcorrido entre a data de plantio ou mesmo da germinação e o surgimento do comportamento espectral típico de vegetação deve ser diferenciado entre as culturas. Além disso, como no Brasil, o calendário agrícola é muito variável, o método diferenciado apresenta restrições.

Assim, neste trabalho, busca-se a identificação do período de tempo transcorrido entre o plantio e o surgimento do que se denomina comportamento espectral típico de vegetação para as culturas do trigo e do feijão irrigados por aspersão.

7.2. Material e métodos

Foram utilizados 15 talhões de trigo e 15 de feijão irrigados por aspersão na região norte do Estado de São Paulo-Brasil (20°30'S e 48°30'W), os quais foram acompanhados durante seus ciclos de produção, conforme exposto anteriormente. No período foram obtidas três imagens TM/Landsat-5 livres de coberturas de nuvens e uma parcialmente aproveitável, denominadas P1, P2, P3 e P0, respectivamente.

Os dados TM/Landsat-5 digitalizados em fitas magnéticas foram submetidos à correção atmosférica pelo método do histograma mínimo (SCHOWENGERDT, 1983) e calculadas as reflectâncias do 12 "pixels" de cada talhão pelo método de MARKHAM e BARKER (1986). A média desses pixels foi utilizada para a confecção de gráficos de reflectância de cada talhão em cada passagem. A análise gráfica da concavidade/convexidade da curva espectral de cada talhão em cada passagem permite o estabelecimento de um critério de identificação da passagem em que fique evidente o comportamento espectral típico de vegetação, em oposição ao comportamento de solo exposto. Com esse método, pode ser verificado quando o talhão passa do padrão de solo exposto para o de vegetação e retorna ao de solo novamente.

7.3. Resultados e discussão

O comportamento espectral de um alvo pode ser considerado como o retrato radiométrico de suas propriedades num determinado momento. Isso significa que, na medida em que há alterações na constituição do alvo, pode haver alterações nas suas respostas espectrais detectadas pelo sensor. Essas alterações podem ser rápidas ou lentas (dimensão temporal) e suaves ou acentuadas (dimensão radiométrica-espectral).

No caso da agricultura as alterações espectrais são cíclicas, característica do processo agrícola. Com uma resolução temporal de 16 dias, determinadas fases da agricultura são caracterizadas por lentas mudanças espectrais, como por exemplo o período que vai da primeira gradagem após a colheita até o plantio seguinte; ou mesmo o período que vai da fase de completa cobertura do solo até a fase de pré-amadurecimento. Essas fases normalmente são caracterizadas por suaves alterações de reflectância. Por outro lado, há fases no processo agrícola que alteram rapidamente o comportamento espectral. Normalmente essas

fases são aquelas determinadas pelo aparecimento e desaparecimento da cultura numa dada área.

De maneira generalizada e da perspectiva do sensoriamento remoto um ciclo agrícola completo poderia ser visto como tendo a sequência solo exposto--> acúmulo de clorofila e aumento da cobertura do solo--> queda da quantidade de clorofila--> solo exposto. Cada uma dessas fases apresentaria comportamento espectral característico, e sem grandes alterações espectrais (dentro de cada fase), sendo que a passagem de uma fase a outra seria marcada por rápida e acentuada alteração espectral.

No caso dos solos, a Figura 7.1 apresenta o comportamento espectral dos três tipos principais ocorrentes na região de estudo, na passagem P1.

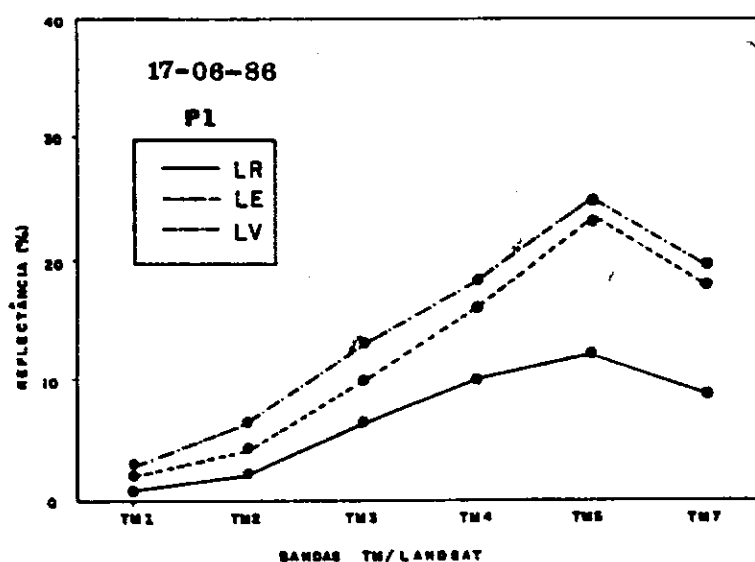


Figura 7.1- Comportamento espectral dos três principais solos da região de estudo. LR = Latossolos Roxo; LE = Latossolo Vermelho Escuro; LV = Latossolo Vermelho Amarelo.

As chuvas de comportamento espectral dos solos são caracterizadas pela reflectância ascendente até a banda TM5, havendo uma queda na banda TM7. Verifica-se que há uma concavidade entre as bandas TM1 e TM3 e uma convexidade entre as

bandas TM4 e TM7. O Latossolo Roxo apresenta-se com os menores valores de reflectância, o Latossolo Vermelho Amarelo com maiores valores, e o Latossolo Vermelho Escuro com valores intermediários de reflectância.

Para estudar o comportamento espectral das culturas durante o transcorrer do ciclo adotou-se o critério de se considerar como comportamento espectral típico de vegetação aquele em que se pode verificar uma quebra na ascensão da reflectância entre as bandas TM1 e TM3; ou seja, aquele no qual ficam caracterizadas as absorções por clorofila nas bandas TM1 e TM3, com um pequeno pico de reflexão na banda TM2 dando um aspecto de convexidade nesse trecho da curva espectral. Complementarmente, para que fique caracterizado o comportamento espectral típico de vegetação, a curva deve apresentar uma concavidade entre as bandas TM4 e TM7. A adoção desse critério para a vegetação coaduna-se bem com as curvas de comportamento espectral dos solos apresentadas na Figura 1, já que a passagem da fase de solo exposto (concavidade entre as bandas TM1 e TM3 e convexidade entre as bandas TM4 e TM7) para a de domínio da vegetação (convexidade entre TM1 e TM3 e concavidade entre TM4 e TM7) é marcada pela inversão na forma das curvas espectrais. Tais curvas assemelham-se às encontradas na literatura específica, como por exemplo, em HUETE (1987), GAUSMAN et al. (1970), KLEMAN e FAGERLUND (1985) e JACKSON e PINTER Jr. (1986). A Figura 7.2 ilustra o comportamento espectral típico de vegetação apresentado por uma área de feijão (F10).

A disponibilidade de apenas três imagens plenamente aproveitáveis durante o ciclo estudado restringiu a possibilidade de explorações mais detalhadas dos dados. Para minimizar esse fato, na análise gráfica fez-se uso dos dados de uma passagem com cobertura parcial de nuvens, onde apenas algumas áreas puderam ter suas reflectâncias medidas.

Após a verificação dos gráficos de comportamento espectral de cada talhão de trigo em cada passagem pôde ser construída a Tabela 7.1, onde está assinalado com um asterisco a passagem em

que foi observado o surgimento do comportamento espectral típico de vegetação.

Para a análise do comportamento espectral das culturas alguns aspectos devem ser levados em consideração. Há que se discutir o caráter diferenciado de desenvolvimento das duas culturas ou famílias.

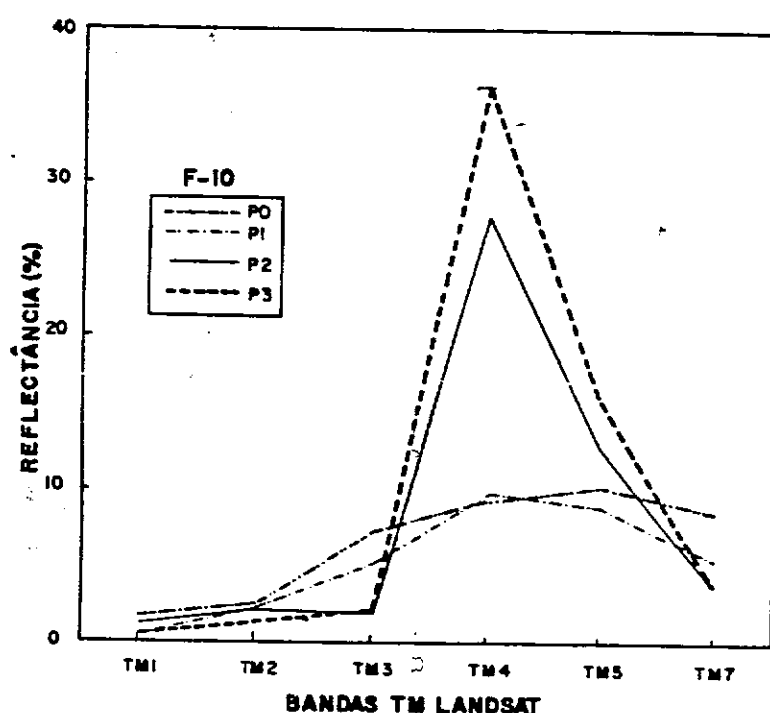


Figura 7.2- Comportamento espectral da área F10 nas seis bandas TM/Landsat-5 nas passagens disponíveis.

O trigo é plantado num espaçamento pequeno e com alta densidade de sementes por metro linear. Aliado a isso, em condições normais de desenvolvimento, seu crescimento inicial e perfilhamento são rápidos, promovendo a cobertura completa do solo em pouco tempo.

Na Tabela 7.1 observa-se que o talhão T1 apresenta comportamento espectral típico de vegetação após 43 dias do plantio, na passagem P1. Como na passagem P0 (16 dias antes e parcialmente coberta por nuvens) não se tinham informações sobre essa área por problemas de nuvens, não é possível saber exatamente qual o número de dias decorridos do plantio necessário à inversão de concavidade/convexidade da curva de comportamento espectral.

Tabela 7.1- Dias após plantio para as áreas de trigo nas diversas passagens do satélite (1986).

ÁREAS DE TRIGO															
	T1	T2	T7	T14	T15	T20	T22	T25A	T26	T28	T29A	T33	T33A	T41	T43
PASG.															
P0	-	9	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	43*	25	27*	53*	46*	46*	15	5	25*	46*	22*	46*	30*	22	45*
P2	75	57*	59	85	78	78	47*	37*	57	78	54	78	62	54*	77
P3	91	73	75	101	94	94	63	53	73	94	70	94	78	70	93

A área T2, da qual se tem informações aos 9 dias após o plantio (P0), aos 25 dias do plantio ainda não apresentava comportamento espectral típico de vegetação, o que ocorre na passagem P2, após 57 dias do plantio. Esse comportamento mostra que é no período entre 25 e 57 dias após o plantio que a área T2 passou a apresentar comportamento típico de vegetação.

A área T3, após 11 dias do plantio (passagem P0) apresenta comportamento espectral de solo exposto, mas aos 27 dias (passagem P1) o padrão já é característico de vegetação. Assim,

considerando como expressão típica de vegetação o comportamento espectral no qual se caracteriza uma convexidade da curva de reflectância entre as bandas TM1 e TM3, e que entre as bandas TM4 e TM7 há uma concavidade, pode-se dizer que, para essas três primeiras áreas de trigo, o tempo necessário à expressão do comportamento espectral de vegetação é de até 43 dias para a área T1, de 25 a 57 dias após o plantio para a área T2, e de 11 a 27 dias para a área T7.

A impressão desse tipo de análise advém do fato de que a passagem P0 é apenas parcialmente aproveitável devido à ocorrência de nuvens, e que entre as passagens P1 e P2 houve uma passagem com cobertura total de nuvens ocasionando um intervalo de 32 dias sem informação orbital. E isso ocorreu num período crucial para a avaliação do tempo necessário à transição do comportamento espectral solo/vegetação.

Pela observação da Tabela 7.1 tem-se que quatro áreas de trigo apresentam comportamento espectral típico de vegetação em períodos inferiores a um mês após o plantio. As áreas T2 e T14, que só terão comportamento típico de vegetação na passagem P2, apresentam já em P1 um comportamento muito próximo do de vegetação (gráficos não mostrados), principalmente quanto ao aumento de reflectância da banda TM4. Em P1 o tempo transcorrido após a data de plantio é de 25 e 22 dias para as áreas T2 e T14, respectivamente. Além disso, todas as áreas com tempo após plantio superiores a 30 dias apresentam comportamento de vegetação pelo critério adotado.

Essas observações sugerem que para o trigo o tempo decorrido entre a data de plantio e a expressão do comportamento espectral típico de vegetação está situado abaixo de 30 dias.

Outra análise que deve ser feita sobre esses dados refere-se ao tempo de permanência da expressão do comportamento espectral de vegetação. Em P3 todos os talhões de trigo ainda apresentam comportamento espectral típico de vegetação.

Na passagem P3 a área mais antiga (T4) possuía 101 dias após o plantio. Caso se assuma que aos 30 dias do plantio todas as áreas de trigo já apresentam a expressão típica de vegetação, supõe-se que pelo menos durante mais 81 dias haverá permanência dessa expressão espectral. Sabendo a resolução temporal dos satélites, pode ser calculado o número de passagens com probabilidade de detecção de áreas de trigo com padrão de vegetação.

Esse tipo de abordagem e de resultado pode ser aproveitado não só para a própria identificação de trigo como também para o planejamento de missões de sensoriamento remoto. Além disso, tal tipo de informação obtida pode ser usada para o cálculo da probabilidade de se ter imagens aproveitáveis para trabalhos com trigo, sabendo-se da probabilidade de ocorrência de nuvens numa determinada região e época do ano. Entretanto, como mostra CRIST (1984), fatores como data de plantio, população, fertilidade, podem alterar esse tempo de permanência.

Os resultados para a cultura do feijão estão expressos na Tabela 7.2, onde o símbolo (*) indica a passagem onde o comportamento espectral passou a ser típico de vegetação e o símbolo (●) indica a passagem em que o comportamento espectral da área já não era mais típico de vegetação.

De maneira geral o feijão apresenta maior irregularidade no comportamento espectral que o trigo, havendo diferenças de magnitude dos valores de reflectância mais acentuadas entre as passagens. Em comparação com as áreas de trigo, apenas três áreas de feijão possuem o comportamento espectral típico de vegetação nas três passagens (P1, P2 e P3). Isso é um indicativo de que o feijão demora mais tempo para expressar comportamento espectral típico de vegetação ou que deixa de expressar tal comportamento mais cedo, ou ambos.

Tabela 7.2- Dias após plantio para as áreas de feijão nas diversas passagens do satélite (1986).

ÁREAS DE FEIJÃO														
PASG.	F3A	F3B	F4	F9	F10	F17	F18	F25B	F29B	F31	F36	F36A	F40A	F40B F42
P0	17	-	40	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	33	15	56*	24	15	40*	51*	-	15	17	43*	30*	34	31 25
P2	65*	47*	88	56*	47*	72	83	32	47*	49*	75	62	66*	63* 57*
P3	81	63	104	72	63	88	99	48*	63	65	91	78	82	79 73

Ao analisar o ciclo vegetativo da cultura do feijão devem ser salientados alguns aspectos importantes do ponto de vista do sensoriamento remoto. O espaçamento do feijão é muito maior que o do trigo (cerca de 3 vezes) e o número de plantas por metro linear é baixo. O desenvolvimento em termos de emissão foliar é lento no início e cresce geometricamente até o início da maturação, sendo que há um contínuo incremento do número de folhas fotossinteticamente ativas. No trigo, ao contrário do feijão, embora haja contínua produção de folhas, há também um processo contínuo de senescimento foliar após o perfilhamento. Essa característica provoca no feijão um processo de aumento de reflectância devido ao acréscimo do número de folhas, muito conhecido e testado em experimentos de laboratório (GAUSMAN et al., 1976; SWAIN e DAVIS, 1978).

O sistema de cultivo do feijão, aliado ao seu aspecto geométrico de emissão foliar, propicia a ocorrência de variação

acentuada entre uma área e outra no tocante ao padrão de cobertura do solo e massa foliar. Isso tem reflexo direto no espaço de tempo após o plantio necessário ao aparecimento do comportamento espectral característico de vegetação. Além disso, há ainda o problema de não se dispor de uma passagem entre P1 e P2, a qual seria fundamental ao esclarecimento desse ponto. Não obstante, alguma tentativa foi feita nesse sentido com os dados de que se dispunha.

Analisando a Tabela 7.2, vê-se que há duas áreas (F4 e F15) com passagem ocorrida quando a cultura tinha entre 20 e 29 dias após o plantio e nenhuma apresentava comportamento espectral de vegetação. Com passagens entre 30 e 39 dias após o plantio houve cinco áreas, porém apenas uma (F12) apresentava comportamento espectral de vegetação. Houve oito áreas em passagens abrangendo áreas de feijão com 40 a 49 dias após o plantio e, dessas, apenas uma ainda não apresentava comportamento típico de vegetação. Houve quatro áreas que possuíam entre 50 a 59 dias após o plantio durante alguma passagem e apenas a área F15 não apresentava comportamento típico de vegetação. Essa análise sugere que o período em que o feijão passa a apresentar comportamento espectral típico de vegetação situa-se acima dos 30 dias após o plantio, provavelmente entre 40 e 50 dias.

Pela pouca disponibilidade de dados, a verificação do tempo de permanência com comportamento espectral típico de vegetação é de difícil consecução no caso do feijão. Na Tabela 7.2, o símbolo (●) indica que, na referida passagem, a área ou talhão já não apresentava mais o comportamento de vegetação. Nas 4 áreas que atingem esse ponto (F3, F11, F13 e F15) há mais de 20 dias de diferença para o período de saída do comportamento de vegetação. Essa grande variação pode estar associada ao desenvolvimento geral da cultura, ou seja, áreas que foram susceptíveis a problema fitossanitários, más condições no fornecimento de água, inadequação de sementes, têm seu desenvolvimento prejudicado e seu ciclo diminuído, ocasionando tais variações acentuadas.

Devido à própria extensão do ciclo, ao padrão de desenvolvimento vegetativo da cultura, ao espaçamento da cultura, o feijão permanece menos tempo com o comportamento espectral típico de vegetação quando comparado com a cultura do trigo. Isso leva a uma menor disponibilidade de imagens que registrem o feijão com expressão espectral de vegetação durante um ciclo vegetativo completo.

7.4. Conclusões

A abordagem de estabelecimento do comportamento espectral típico de vegetação mostrou-se satisfatória para a análise do comportamento espectral de culturas, salientando-se que, para sua execução, é necessário que os dados de níveis de cinza sejam transformados em valores de reflectância. Caso não haja tal transformação a incorrência em conclusões indevidas por ser comum.

A análise gráfica do comportamento espectral das duas culturas (trigo e feijão) representantes das famílias gramínea e leguminosa, respectivamente, permitiu que se delineassem os períodos em que cada cultura, num ambiente de irrigação, passa a apresentar comportamento espectral típico de vegetação. Para o trigo, tal período situa-se abaixo dos 30 dias após o plantio, e para o feijão acima de 30 dias, entre 40 e 50 dias após o plantio. Tal tipo de análise, aliado ao calendário agrícola, se aplicado a outras culturas de interesse pode contribuir para a identificação das culturas seja facilitada. Além disso, estes tipos de informação deverão compor a base de dados para as regras de funcionamento de Sistemas Especialistas dedicados ao Sensoriamento Remoto em Agricultura que vêm sendo desenvolvidos na atualidade.

CAPÍTULO 8

DADOS DE SATÉLITE NA DISCRIMINAÇÃO DE TRIGO E DE FEIJÃO

8.1. Introdução

As aplicações de sensoriamento remoto no campo da agricultura muitas vezes pressupõem o reconhecimento das culturas que estão implantadas na região de estudo. Em sensoriamento remoto, esse reconhecimento pode se dar de muitas formas, como por exemplo, a partir da exploração dos aspectos multitemporais e multiespectrais dos dados fornecidos por sistemas satélites (MCDONALD e HALL, 1980). Os principais critérios levados em consideração são os de forma dos talhões, dimensões, época da imagem/data de plantio, cor ou tonalidade, dentre outros, como por exemplo, tradição de cultivos da região.

Quando as culturas são plantadas na estação quente e chuvosa do ano, há grande variação de datas de plantio, dificultando a implantação de sistema de reconhecimento que explore o calendário agrícola das culturas. As formas e dimensões são diversificadas, de modo que o aspecto de cor, ou seja, o aspecto multiespectral assumam importância destacada no reconhecimento das culturas. Além disso, como durante a estação de cultivo de grande parte das áreas de produção de grãos se dá na época chuvosa, a disponibilidade de imagens é escassa e faz com que o aspecto multitemporal não possa ser explorado com eficiência.

Nesse contexto de baixa disponibilidade de dados de sensoriamento remoto na época de maior densidade de cultivo, é necessário que se façam estudos espectrais das culturas a fim de que as imagens que forem obtidas naquela época possam ser utilizadas com maior eficiência no reconhecimento das culturas. Tais estudos espectrais, na medida em que puderem ser realizados usando imagens orbitais, promoverão maior proximidade com a realidade do campo no momento da utilização efetiva das imagens para o reconhecimento das culturas.

O conhecimento do comportamento espectral de uma folha isolada é fundamental para o entendimento da reflectância do dossel de uma cultura, como expõem BAUER et al. (1981). Porém, múltiplos fatores contribuem para que a resposta espectral de uma folha isolada não seja um retrato fiel da reflectância do dossel.

Parâmetros como tipo de solo (HUETE, 1985), arquitetura foliar (JACKSON e PINTER Jr., 1986), distribuição das plantas no terreno (KIMES, 1985), índice de área foliar (EPIPHANIO e FORMAGGIO 1988, GOEL e GRIER 1986), densidade do stand (AASE e SIDDOWAY, 1980) contribuem para a diferença entre a reflectância da folha e a do dossel. O estágio fenológico da cultura também afeta a reflectância. DAUGHTRY et al. (1980), em experimento de campo com trigo, observaram maiores correlações entre reflectância e parâmetros da cultura para o período compreendido entre a germinação e o florescimento.

Muitas vezes a avaliação da interrelação entre parâmetros espectrais e agronômicos é feita utilizando modelos. Um exemplo simples e clássico de modelo de reflectância de dossel é o de ALLEN e RICHARDSON (1968), o qual faz uso da teoria de Kubelka e Munk. Nesse modelo é possível simular a reflectância de determinado dossel, com determinadas características de reflectância e transmitância foliar, em função da variação do índice de área foliar e de reflectância do substrato. A comparação de resultados desse modelo com os obtidos em condições reais de campo ou de satélite deve ser feita com cuidado, visto que há inúmeras simplificações da natureza embutidas no modelo. Para duas culturas distintas deve ser utilizado como uma

indicação de reflectância esperada ante idênticas simplificações e suposições assumidas para culturas distintas.

O presente estudo visa fazer uma avaliação das diversas bandas do sensor "Thematic Mapper" do satélite Landsat-5 (TM/Landsat-5) para a discriminação entre trigo e feijão. Paralelamente são discutidas algumas características das duas culturas e suas relações com as diversas bandas.

8.2. Material e métodos

Foram utilizados na região de Barretos/Guaíra-SP (20°30'S e 48°30'W) 15 talhões de feijão e 15 de trigo irrigados por aspersão, os quais foram acompanhados durante seus ciclos de inverno de 1986; estavam disponíveis três imagens completamente livres de nuvens, aqui denominadas P1, P2 e P3, num intervalo de 41 dias entre a primeira e a terceira.

Nos talhões foram feitas as seguintes medições: percentagem de cobertura do solo (HEILMAN et al., 1981) por meio de fotografia vertical a dois metros de altura, índice de área foliar (IAF), e dosagem de clorofila (ARNON, 1949).

Os dados TM/Landsat-5 digitalizados em fitas magnéticas foram submetidos à correção atmosférica pelo método do histograma mínimo (SCHOWENGERDT, 1983) e, pelo método de MARKHAM e BARKER (1986) foi calculada a reflectância de 12 "pixels" de cada talhão. Foram sorteados aleatoriamente quatro desses pixels que serviram de repetições para aplicação da análise de variância e do teste de Student-Newman-Keuls ou SNK (Zar, 1974) para diferenciação de médias de reflectância. Esse procedimento foi seguido para cada banda e cada passagem, e para três limiares de percentagem de cobertura do solo e índice de área foliar (IAF). Esses limiares foram: a) sem retrições, ou seja, todas as áreas; b) áreas com percentagem de cobertura do solo superior a 30% e IAF superior a 0,80; e c) áreas com percentagem de cobertura do solo superior a 70% e IAF superior a 1,0.

Para a análise das bandas, em cada caso, foi estabelecido um índice que expressa o potencial da banda para a discriminação entre as duas culturas, no nível de 5% de probabilidade, conforme EPIPHANIO (1988). Esse índice é obtido através da comparação estatística da média de cada área com a média de todas as outras áreas. Quanto mais aceitações corretas da hipótese H_0 de igualdade entre médias obtidas pelo teste SNK e menos aceitações incorretas, melhor será o índice de eficiência de aceitação correta (EAC) e maior será seu valor. Sua formulação é:

$$EAC = \frac{AC}{(n_1^{AB} + n_2^{AB})} \times \frac{(AC-AI)}{(AC+AI)} \times 100 \quad (1)$$

onde,

EAC = índice de eficiência de aceitação correta;
 AC, AI = número de aceitações corretas e incorretas da hipótese H_0 de igualdade entre talhões, respectivamente;
 n_1 , n_2 = número de talhões das culturas de trigo e de feijão, respectivamente.

8.3. Resultados e discussão

Na Tabela 8.1 são apresentados os valores de EAC para todas as bandas, passagens e limiares de análise. Deve ser observado que esse trabalho foi desenvolvido contando com áreas agrícolas em condições normais de produção. Isso faz com que não se possam exercer controles rígidos de tratamentos que seriam desejáveis e obtidos em estações experimentais. Assim, não se obtêm homogeneidades como data de plantio e condições de cultivo. Uma tentativa de obter melhor homogeneidade de condições de desenvolvimento foi através da definição de limiares de percentagem de cobertura do solo e de IAF.

De maneira geral, na passagem P1 havia alguns talhões com as culturas em estágios incipientes de desenvolvimento. A

passagem P2 foi aquela em que houve maior expressão do desenvolvimento das culturas, sendo aí a melhor oportunidade de observar a potencialidade de cada banda na diferenciação das culturas. Em P3, embora se tivessem as culturas ainda com boa cobertura do solo, a presença de diferenciação de órgãos reprodutivos era comum e por vezes bastante acentuada.

Tabela 8.1- índice de Eficiência de Aceitação Correta (EAC) para as bandas do TM/Landsat-5 nas três passagens e sob os limiares de percentagem de cobertura do solo e de índice de área foliar estabelecidos.

LIMIARES(*)	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
PASSAGEM P1						
TODAS ÁREAS (15/15)	-1,0	2,3	7,1	3,7	4,1	3,7
>30% e >0,8 (12/6)	-0,6	0,9	7,0	4,5	7,4	7,6
>70% e >1,0 (8/3)	5,9	18,8	31,6	17,0	27,6	54,3
PASSAGEM P2						
TODAS ÁREAS (15/15)	10,9	42,7	39,5	1,2	17,2	65,2
>30% e >0,8 (15/15)	10,9	42,7	39,5	1,2	17,2	65,2
>70% e >1,0 (14/8)	12,2	43,2	34,1	0,0	27,8	73,3
PASSAGEM P3						
TODAS ÁREAS (15/15)	10,1	27,0	15,9	14,0	34,8	31,6
>30% e >0,8 (14/13)	5,6	25,4	14,7	8,3	29,4	39,4
>70% e >1,0 (14/13)	5,6	25,4	14,7	8,3	29,4	39,4

(*) P1,P2,P3 = passagens do satélite. Limiares: >30%; >0,8; (15/15) = percentagem de cobertura do solo maior que 30%; índice de área foliar maior que 0,8; número de talhões de trigo e de feijão, respectivamente, que atendiam a esses limiares.

Tendo em vista esse quadro geral da situação dos talhões em cada passagem, na Tabela 1 pode ser observado o efeito sobre o valor do EAC causado pela estratificação por percentagem de cobertura do solo e IAF. Na passagem P1 a eliminação das áreas com percentagem de cobertura do solo inferior a 30% (três áreas de trigo e nove de feijão), embora tenha aumentado os valores de EAC de algumas bandas, não foi suficiente para permitir a

expressão do potencial das diversas bandas na diferenciação entre trigo e feijão. Entretanto, a eliminação das áreas com percentagem de cobertura do solo menor que 70% (sete áreas de trigo e 12 de feijão) fez com que houvessem sensíveis acréscimos dos valores de EAC e permitiu que as bandas pudessem expressar seus potenciais discriminativos. Esse aumento nos valores de EAC deveu-se principalmente à minimização do efeito do solo nas respostas espectrais, visto que nessa passagem muitos talhões estavam em estágios iniciais do ciclo.

Na passagem P2 a eliminação de talhões com percentagem de cobertura solo inferior a 70% e IAF menor que 1,0 (um talhão de trigo e sete de feijão), quando comparada com a situação em que todos os talhões foram analisados conjuntamente, trouxe melhorias do EAC em algumas bandas e pioras em outras. Não obstante, à exceção das bandas TM4 e TM5, é nessa passagem que todas as bandas apresentam os maiores valores de EAC. Isso está associado à condição de vigor vegetativo, que é máximo nessa passagem, permitindo que os parâmetros biológicos que influem na reflectância expressem-se mais claramente. Na passagem P3 observa-se que poucos talhões são eliminados (um de trigo e dois de feijão) pelos critérios de IAF e de percentagem de cobertura do solo. E as maiores variações de EAC ocorrem nas bandas TM1, TM4, e TM7. De maneira geral, em relação à passagem P2, à exceção das bandas TM4 e TM5, há diminuição do potencial das bandas em discriminar talhões de feijão dos de trigo. Essa diminuição pode estar associada a uma perda de vigor das culturas, e ao aparecimento de órgãos reprodutivos em diversos talhões, como relatam DAUGHTRY et al. (1980).

Após essa breve discussão da Tabela 1 algumas considerações de natureza teórica podem ser traçadas.

A quantidade de radiação eletromagnética refletida por cada talhão é influenciada pela composição de plantas mais substrato (solo) existente naquele talhão. A reflectância do solo influencia a resposta espectral do talhão na medida direta de sua exposição (HUETE, 1987). Aqui a minimização do efeito do solo

causou melhorias decrescentes a partir de P1, sendo que em P3 o incremento de EAC foi oscilante, dependendo da banda.

Analisando individualmente as bandas na Tabela 1, pode-se dividi-las em três grupos quanto ao potencial de discriminação entre talhões de trigo e de feijão. O de maior potencial é o representado pela banda TM7; o de potencial intermediário é representado pela banda TM2, TM3 e TM5; e o de menor potencial é o constituído pelas bandas TM1 e TM4.

Os processos de reflexão da luz pela folha são genericamente divididos em três classes. A primeira refere-se ao visível, onde há predomínio do efeito de absorção da luz pelos pigmentos (notadamente as clorofilas) na região do azul (TM1) e do vermelho (TM3), e uma reduzida absorção na região do verde (TM2). A segunda região é a do infravermelho próximo (TM4), de alta reflexão atribuída à estrutura interna da folha; e a terceira é ainda no infravermelho (TM5 e TM7) e caracterizada por uma diminuição da reflectância em relação à TM4 atribuída à absorção da luz pela água interna da folha (KNIPLING, 1970).

As diferenças de teores de clorofila entre as duas culturas são acentuadas. Na passagem P2, as áreas de trigo apresentaram teores de clorofila de 19,6 mg/10g e as de feijão 9,7 mg/10g, com desvios padrões de 3,2 e 2,0 mg/10g, respectivamente. Isso propiciou acentuada discriminação entre trigo e feijão com a utilização das bandas da região do visível, à exceção da banda TM1. Nesta banda, a absorção pelas clorofilas é muito intensa, o que acarreta valores de reflectância muito baixos, atingindo o ponto de indiscriminação das culturas no nível de satélite.

Na região do infravermelho (bandas TM4, TM5 e TM7) os resultados são contrastantes. A banda TM7 apresenta elevado potencial de discriminação entre trigo e feijão, enquanto que na banda TM4 esse potencial é muito baixo (zero na passagem P2). Esse resultado para a banda TM4 pode ser explicado pela elevada sensibilidade desta banda a variações nos parâmetros estruturais do dossel, como por exemplo, índice de área foliar ou fitomassa.

Como entre as várias áreas de trigo e de feijão há diferenças entre esses parâmetros, essa variabilidade tende a causar heterogeneidades entre as diversas áreas, fazendo com que não surjam comportamentos típicos de uma ou outra cultura.

Na banda TM7 há forte separação espectral entre as duas culturas. A aplicação do modelo de ALLEN e RICHARDSON (1968), utilizando os dados de reflectância foliar obtidos em laboratório por GAUSMAN et al. expressos em BUNNIK (1978, p.92), mostra resultado inverso ao constatado na banda TM7. Ou seja, enquanto os valores de reflectância do feijão observados na banda TM7 são o dobro dos do trigo, no modelo os valores de reflectância do feijão no comprimento de onda de 2,20 μ m são ligeiramente inferiores aos do trigo. Entretanto, ao se compararem todas as outras bandas, os resultados do modelo são concordantes com os observados no TM/Landsat-5. Deve ser ressaltado que nessas comparações entre dados de satélite e resultados de modelos não se consideram os valores absolutos obtidos por um método ou por outro. As comparações são feitas entre culturas para cada método (satélite ou modelo) separadamente.

Essa discordância entre o dado de reflectância foliar medida em laboratório e a reflectância de dossel detectada pelo TM/Landsat-5 deve ter suas causas melhor investigadas, já que para as bandas do visível os dados são concordantes. Pode-se admitir que as medições de reflectância foliar de trigo ou de feijão realizadas em laboratório não representam adequadamente as diferenças de reflectância dessas duas culturas em condições normais de campo. Como no infravermelho médio a água é tida como principal fator na reflectância foliar, pode ser que, em condições de campo, a água exerça papel importante na distinção entre as duas culturas, o que não ocorreria em laboratório com as folhas individuais. Outro fator que poderia influenciar seria a estrutura de dossel, que é diferente para as duas culturas. Desse modo, tanto a estrutura de dossel como a água poderiam ser fatores de decréscimo na reflectância do trigo em relação ao feijão, quando se comparam as reflectâncias medidas em laboratório com os dados orbitais de culturas em condições normais de cultivo. Não obstante essas diferenças de

reflectâncias entre dados laboratoriais e orbitais, a banda TM7/Landsat-5 foi a que apresentou maior potencial de agrupamento correto dos talhões de trigo e de feijão.

Apesar de não ter encontrado boa discriminação entre trigo e feijão através da banda TM4, essa banda tem alto valor no sensoriamento remoto agrícola, principalmente na relação com parâmetros indicadores de biomassa, na discriminação entre alvos agrícolas e não agrícolas, além de estar na região de sensibilidade dos detectores de silício, que são os mais comuns. Porém, as principais bandas do TM/Landsat-5 sob o ângulo aqui discutido são as TM7 no infravermelho e TM2 no visível.

8.4. Conclusões

A variação da época de obtenção da imagem, relacionada ao estágio de desenvolvimento das culturas, desempenha papel importante no poder das bandas em discriminar a cultura de trigo da de feijão. O período vegetativo é mais propício que o reprodutivo para tal discriminação.

Das bandas do TM/Landsat-5 a que mais propiciou tal discriminação foi a TM7, independente da época da passagem do satélite. Isso indica que esta banda deve ser melhor estudada quanto à discriminação entre outras culturas.

CAPÍTULO 9

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do Sensoriamento Remoto para avaliação de rendimentos agrícolas é uma linha de pesquisa de grande interesse e em franco desenvolvimento atualmente. Neste relatório são sintetizadas algumas pesquisas realizadas neste sentido.

Ao seu final tem-se à disposição uma revisão de literatura que representa o estado da arte em termos de interação da radiação eletromagnética com o dossel de culturas agrícolas e em termos de relações agronômico-espectrais. Quaisquer estudos que se queira fazer sobre alvos agrícolas utilizando tecnologia de sensoriamento remoto pressupõe o conhecimento de tais interações e relações.

Em duas grandes campanhas de coleta (1986 e 1987) houve a aquisição de expressivo volume de dados, que puderam ter uma análise otimizada a partir do convênio INPE/FIBGE. Esses dados consistiram de imagens de satélite concomitantes com os trabalhos de campo, perfis radiométricos (400-1000 nm) com radiômetros de campo, e diversos parâmetros agronômicos de trigo e feijão, basicamente.

O trabalho de coleta e análise desses dados permitiu um ganho de experiência nessa área do conhecimento, que dificilmente poderia ser obtido de outra forma. Uma parte dessa experiência está consolidada neste relatório, na forma de múltiplas abordagens de análises dos dados coletados.

No que tange à radiometria de campo para estudos de variáveis agronômicas, observou-se que existem correlacionamentos

expressivos das variáveis índice de área foliar, percentagem de cobertura do solo, e fitomassa verde com as variáveis espectrais estudadas. Tais relações são semelhantes às obtidas com dados de satélite, convalidando-se mutuamente. As relações para as culturas de trigo e de feijão, embora diferentes em magnitude para cada cultura, são semelhantes na forma e comportamento. Os dados de espectroscopia de campo apresentam dispersão acima do desejado, principalmente em função das heterogeneidades das diversas áreas, dos estágios culturais e das condições de medição.

Com respeito aos dados de satélite, observou-se forte relacionamento entre os parâmetros biofísicos das culturas e as reflectâncias correspondentes às bandas TM3 e TM4 e índices de vegetação delas derivados. Também se observou que a fase de desenvolvimento vegetativo anterior à senescência é a mais apropriada para ajustes e correlações entre variáveis espectrais e agronômicas. Observou-se grande equivalência funcional entre os índices de vegetação razão simples, diferença normalizada e diferença normalizada transformada. Também foi desenvolvido o índice perpendicular de vegetação (PVI) utilizando dados de três diferentes tipos de solos da região. Observou-se que, embora o PVI tenha atuado para minimizar efeitos de solo, sua contribuição para os relacionamentos desejados foi marginal. Nesses estudos ficou patente o acentuado efeito que o estágio de desenvolvimento da cultura exerce sobre os relacionamentos entre variáveis espectrais e agronômicas. Mostrou-se também que a densidade de clorofila pode ser uma variável importante a ser estudada por sensoriamento remoto.

Numa perspectiva mais prática do uso do sensoriamento remoto em agricultura, a identificação da emergência espectral das culturas ganha destaque. Mostrou-se, através da relação entre a data de plantio e a data de surgimento do comportamento espectral típico de vegetação, que tal relação pode ser de alto significado na identificação do tipo de cultura. Foi possível demarcar tais períodos tanto para o trigo quanto para o feijão. Deve-se ressaltar, contudo, que essa demarcação foi estabelecida para áreas irrigadas, não se sabendo se pode ser aplicada a

condições de sequeiro. Para essa demarcação foi estabelecida metodologia apropriada que leva em conta o comportamento espectral teórico da vegetação.

Outro aspecto de vital importância para o sensoriamento remoto agrícola é o da identificação das culturas. Neste relatório tal aspecto foi abordado sob a perspectiva da separabilidade numérica entre trigo e feijão conseguida com as diversas bandas do TM/Landsat. Baseado nesses resultados chegou-se à conclusão de que para efeitos de discriminação das duas culturas a banda TM7 apresentava grande vantagem sobre as outras. Não obstante a banda TM4 seja ideal para separação entre vegetação e outros alvos, é de baixa potencialidade na separação entre espécies. As bandas que mais se prestam a distinguir espécies são aquelas cuja radiação interage com as camadas superiores do dossel, sem sofrer a influência das reflexões múltiplas que ocorrem no interior do dossel. Quanto mais a radiação penetra no dossel, mais porta informação de volume e não de propriedades intrínsecas da espécie.

Todos esses resultados apresentados mostram que o avanço conseguido foi grande. Mais que isso, porém, mostram que há muito mais a ser pesquisado e conhecido na área agrícola. Esta área é extremamente complexa e dinâmica. Normalmente é tão dinâmica que nem mesmo a capacidade de revisita de 16 dias do Landsat é suficiente. Por ter essas características, os estudos feitos em apenas um ano ou dois não são suficientemente conclusivos. São necessárias múltiplas repetições para que se refinem os métodos e se tenha mais certeza das conclusões.

Assim, após esse trabalho, sente-se que há uma necessidade de investigação mais persistente para a aferição das relações entre os parâmetros agrônômicos e espectrais, tanto a nível de campo como de satélite. Tais relações são fundamentais para a implementação de quaisquer modelos de produtividade. São importantes os estudos de emergência espectral para nossas principais culturas segundo o calendário agrícola próprio de cada região. Isso é de grande auxílio nos trabalhos de interpretação e identificação de culturas. Outras pesquisas relacionadas à

questão da influência de características intrínsecas de cada espécie e que sejam de importância em termos de influenciar a reflectância espectral, como por exemplo o teor de clorofila, devem ser realizadas. Outro aspecto que deve ser abordado em trabalhos futuros é o do acoplamento dessas informações espectrais e relações agônômico-espectrais em modelos de desenvolvimento, crescimento, produtividade, etc.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com apoio financeiro da FAPESP (campanha de 1986), da EMBRAPA (campanha de 1987) e da FIBGE. A estas entidades, ao lado da UNICAMP, do DAEE, do IAC, da ESALQ/USP, apresentamos os nossos agradecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASE, J.K. ; SIDDOWAY, F.H. Assessing winter wheat dry matter production via spectral reflectance measurements. Remote Sensing of Environment, 11: 267-277, 1981.
- AASE, J.K. ; SIDDOWAY, F.H. Determining winter wheat stand densities using spectral reflectance measurements. Agronomy Journal, 72(1): 149-152, 1980.
- AASE, J.K. Relationship between leaf area index and dry matter in winter wheat. Agronomy Journal, 70:563-565, 1978.
- AASE, J.K.; SIDDOWAY, F.H. Spring wheat yield estimates from spectral reflectance measurements. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, GE-19(2):78-84. 1981.
- AASE, J.K.; TANAKA, D.L. Effects of tillage practices on soil and wheat spectral reflectances. Agronomy Journal, 76(5): 814-819, 1984.
- AHLRICHS, J.S.; BAUER, M.E. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. Agronomy Journal, 75(6): 987-993, 1983.
- ALLEN, W.A.; RICHARDSON, A.J. Interaction of light with a plant canopy. Journal of the Optical Society of America, 58:1023-1028. 1968.
- ARNON, D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. Plant Physiology, 24(1):1-15, 1949.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal, 76(2): 300-307, 1984.
- ASRAR, G.; KANEMASU, E.T.; YOSHIDA, M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. Remote Sensing of Environment, 17(1): 1-11, 1985.

- BADHWAR, G.D. Automatic corn-soybean classification using Landsat MSS data. II Early season crop proportion estimation. Remote Sensing of Environment, 14(1-3): 31-38, 1984.
- BADHWAR, G.D. Crop emergence date determination from spectral data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46: 369-377, 1980.
- BADHWAR, G.D.; HENDERSON, K.E. Estimating development stages of corn from spectral data-an initial model. Agronomy Journal, 73(4): 748-755, 1981.
- BADHWAR, G.D.; THOMPSON, D.R. Estimating emergence date of spring small grains using Landsat spectral data. Agronomy Journal, 75(1): 75-78, 1983.
- BATISTA, G.T.; RUDORFF, B.T.F. Study of the spectral response of soybeans. MCT/INPE, São José dos Campos. 1988. (INPE-4592-PRE/1322). (presented at 16th Congress of ISPRS; July 1-10, 1988; Kyoto, Japan).
- BATISTA, G.T.; RUDORFF, B.T.F.; OVIEDO, A.F.P. Resposta espectral da soja e sua relação com parâmetros agronômicos. IN: ANAIS DO 5^o. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal-RN, 11 a 15 de outubro, 1988. p. 407-413.
- BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T.; VANDERBILT, V.C. Spectral-agronomic relationships of maize, soybean and wheat canopies. IN: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, Avignon, 8-11 Sept. 1981. Monfavet, INRA, p. 261-272. 1981.
- BAUER, M.E.; VANDERBILT, V.C.; ROBINSON, B.F.; DAUGHTRY, S.T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. IN: PROCEEDINGS OF THE XIV CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY, Hamburg, West Germany, July 13-25, 1980. p. 56-73.
- BEST, R.G.; CHARLAN, J.C. Spectral estimation of green leaf area index of oats. Remote Sensing of Environment, 17(1): 27-36, 1985.
- BOUTTON, T.W.; TIESZEN, L.L. Estimation of plant biomass by spectral reflectance in an East African grassland. Journal of Range Management, 36(2):213-216, 1983.
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. Soil Science, 100(2): 130-138. 1965.
- BREECE, H.T.; HOLMES, R.A. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn "in vivo". Applied Optics, 10:119-127. 1971.

- BUNNIK, N.J.J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen 78-1, 1978, 176p.
- BUNNIK, N.J.J. Review of models and measurements of multispectral reflectance by plant canopies. Recommendations for future research. IN: PROCEEDINGS OF SPIE, Vol. 475(Remote Sensing); Arlington, VI; May 1-2, 1984. p. 2-11.
- BURROUGHS CORPORATION. Advanced Statistical Inquiry System (BASIS). LARGE SYSTEMS. USER'S MANUAL. Detroit, Michigan. USA. 1975.
- CHANCE, J.E.; LEMASTER, E.W. Suits reflectance models for wheat and cotton: theoretical and experimental tests. Applied Optics, 16(2):407-412.
- CHEN, S.C.; LIMA, A.M. Avaliação de composições coloridas TM falsa cor para discriminação de culturas. IN: INPE/SELPER/SBC. Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto. Gramado, 10-15/08, p.799-803, 1986.
- CLEVERS, J.G.P.W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimate of leaf area index. Remote Sensing of Environment, 25:53-69. 1988.
- CNEPA (COMISSÃO DE SOLOS DO CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISAS AGRÔNOMICAS). Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. CNEPA, Rio de Janeiro, 1960. 634p. (Boletim número 12).
- COLWELL, J.E. Grass canopy bidirectional spectral reflectance. IN: PROCEEDINGS OF THE 9th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. Ann Arbor, Univ. of Michigan. 1974(a). p. 1061-1085.
- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. Remote Sensing of Environment, 3:175-183. 1974(b).
- CRIST, E.P. Analysis of the profile characteristics of corn soybeans using field reflectance data. NASA, Houston, TX, 1982b. 48p.
- CRIST, E.P. Cultural and environmental influences on temporal spectral development patterns of corn and soybeans. PROCEEDINGS OF MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, Purdue University, West Lafayette, IN, 1982a. p. 461-468.
- CRIST, E.P. Effects of cultural and environmental factors on corn and soybean spectral development patterns. Remote Sensing of Environment, 14(1-3): 3-14, 1984.

- CURRAN, P.J. Multispectral photographic remote sensing of green vegetation biomass and productivity. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(2): 243-251, 1982.
- CURRAN, P.J. Multispectral remote sensing for estimating biomass and productivity. IN: SMITH, H. Plants and the daylight spectrum. Academic Press, p. 65-99. 1981.
- CURRAN, P.J.; MILTON, E.J. The relationships between the chlorophyll concentration, LAI and reflectance of a simple vegetation canopy. International Journal of Remote Sensing, 4(2): 247-255, 1983.
- DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.E.; CRECELIUS, D.W.; HIXON, M.M. Effects of management practices on reflectance of spring wheat canopies. Agronomy Journal, 72(11): 1055-1060, 1980.
- DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; BIEHL, L.L.; BLAD, B.L.; NORMAN, J. M.; GARDNER, B.R.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G. Spectral estimates of agronomic characteristics of crops. IN: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, Purdue University, West Lafayette, IN, 1984, p. 348-355.
- DEERING, D.W. Fundamental remote sensing science research program: The scene radiation and atmospheric effects characterization project (summary report). NASA, Greenbelt, MD, 1985. 195p. NASA Technical Memorandum 86234).
- DEERING, D.W.; ROUSE JR., J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, H.H. Measuring forage production of grazing units from LANDSAT MSS data. IN: PROCEEDINGS OF THE TENTH INT. SYMP. ON REMOTE SENSING OF ENVIRON.; Univ. of Michigan; Ann Arbor; p. 1169-1198. 1975.
- DUGGIN, M.J. The field measurement of reflectance factors. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46:643-647. 1980.
- ENGEL, J.L.; WEINSTEIN, O. Thematic mapper. An overview. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, GE-21(3): 258-265, 1983.
- EPIPHANIO, J.C.N. Dados TM/Landsat-5 no estudo das culturas de trigo e feijão. Piracicaba, ESALQ/USP, 1988. 141p. (Tese de Doutorado).
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. TM/Landsat-5 data to evaluate wheat and bean percent soil cover and leaf area index. IN: 16th International Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Kyoto, Japan, ISPRS, 1988. vol.27, part B10, p.658-666.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Estimativa da percentagem de cobertura do solo pelas culturas de trigo e feijão através de

dados TM/LANDSAT-5. II SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE
SENSORES REMOTOS, Bogotá, 1987. 16 p.

EPIPHANIO, J.C.N.; VITORELLO, I. Áreas irrigadas: monitoramento
por sensoriamento remoto. Irrigação e Tecnologia Moderna
(ITEM), s.v.(14): 2-6, 1983.

EZRA, C.E.; TINNEY, L.R.; JACKSON, R.D. Effect of soil
background on vegetation discrimination using Landsat data.
Remote Sensing of Environment, 14(3): 233-242, 1984.

FORMAGGIO, A.R. Comportamento espectral de quatro solos do
Estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e de
laboratório. INPE, São José dos Campos, 1983, 140p.
(Dissertação de Mestrado INPE 2878-TDL/144).

FORMAGGIO, A.R. Características agronômicas e espectrais para
sensoriamento remoto de trigo e de feijão. ESALQ/USP,
Piracicaba, 1989. 161p. (Tese de Doutorado).

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N. Estudos espectrais de três
oxissolos e de um ultissol brasileiros. IN: SELPER. SIMPÓSIO
LATINOAMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Bogotá, 1987.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N. Estudos radiométricos das
culturas de trigo e de feijão em três tipos de Latossolos. IN:
ANAIS DO 5º. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,
Natal-RN, 11 a 15 de outubro, 1988. p 393-399.

GALSTON, A.W.; DAVIES, P.J.; SATTER, R.L. The life of the green
plant. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1980. 464p.

GARDNER, B.R. Techniques for remotely monitoring canopy
development and estimating grain yield of moisture stressed
corn. University of Nebraska, Lincoln. 1983. 187p. (Ph.D.
Dissertation).

GARDNER, B.R.; BLAD, B.L. Evaluation of spectral reflectance
models to estimate corn leaf area while minimizing the
influence of soil background effects. Remote Sensing of
Environment, 20: 183-193, 1986.

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEIDNER, V.R.
Spectral properties of plants. Applied Optics, 4(1): 11-20,
1965.

GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 40(2): 183-
191, 1974.

GAUSMAN, H.W. Visible light reflectance, transmittance, and
absoptance of differently pigmented cotton leaves. Remote
Sensing of Environment, 13: 233-238, 1982.

- GAUSMAN, H.W. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. Lubbock, Texas. Texas Tech University. Graduate Studies n°. 29. 1985. 78 p.
- GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; CARDENAS, R. Reflectance of cotton leaves and their structure. Remote Sensing of Environment, 1: 19-22, 1969.
- GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; CARDENAS, R.; RICHARDSON, A.J. Effects of leaf nodal position on absorption and scattering coefficients and infinite reflectance of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. Agronomy Journal, 63: 87-91. 1971.
- GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; CARDENAS, R.; RICHARDSON, A.J. Relation of light reflectance to histological and physical evaluations of cotton leaf maturity. Applied Optics, 9(3): 545-552, 1990.
- GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; ESCOBAR, D.E. Refractive index of plant cell walls. Applied Optics, 13(1): 109-111, 1974.
- GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; MYER, V.I.; CARDENAS, R.; LEAMER, R.W. Reflectance of single leaves and field plots of cycocel-treated-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in relation to leaf structure. Remote Sensing of Environment, 1: 103-107, 1969.
- GAUSMAN, H.W.; ALLEN, W.A.; WIEGAND, C.L.; ESCOBAR, D.E.; RODRIGUEZ, R.R.; RICHARDSON, A.J. The leaf mesophylls of twenty crops, their light spectra, and optical and geometrical parameters. Technical Bulletin No. 1465, U.S.Dept. of Agriculture; Washington, D.C. 1973.
- GAUSMAN, H.W.; MENGES, R.M.; RICHARDSON, A.J.; WALTER, H.; RODRIGUEZ, R.R.; TAMEZ, S. Optical parameters of leaves of seven weed species. Weed Science Society of America Journal, 29(1): 24-26, 1981.
- GAUSMAN, H.W.; RODRIGUEZ, R.R.; RICHARDSON, A.J. Infinite reflectance of dead compared to live vegetation. Agronomy Journal, 68: 295-296, 1976.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY. Image-100 user manual. Daytona Beach, Ground Systems Department. 1975.
- GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. Remote Sensing Reviews, vol. 4. Harwood Academic Publishers GmbH. Great Britain. 1988. 212p.
- GOEL, N.S.; GRIER, T. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data. II: Estimation of leaf area index and percentage of ground cover for row canopies. International Journal of Remote Sensing, 7(10): 1263-1286, 1986.

- GRUM, F.; LUCKEY, G.W. Optical sphere paint and a working standard of reflectance. Applied Optics, 7:2289-2294. 1968.
- HATFIELD, J.L.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G.; JACKSON, R.D.; PINTER JR., P.J.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. International Journal of Remote Sensing, 6(1): 167-175, 1985.
- HEILMAN, J.L.; HEILMAN, W.E.; MOORE, D.G. Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover. Agronomy Journal, 73(3): 403-406, 1981.
- HINZMAN, L.D.; BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T. Growth and reflectance characteristics of winter wheat canopies. NASA, Houston, TX, 1984, 18 p. (NASA CR - 171843).
- HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. IN: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (Ed.) Remote Sensing: the Quantitative Approach. McGraw-Hill, New York. 1978. p. 228-289.
- HOFFER, R.M.; JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L. Remote Sensing in Ecology. Ed. Univ. Of Georgia Press, Athens, GA. 1969. pp. 1-16.
- HOLBEN, B.N.; SCHUTT, J.B.; McMURTREY III, J. Leaf water stress detection utilizing thematic mapper bands 3, 4 and 5 in soybean plants. International Journal of Remote Sensing, 4(2): 289-297, 1983.
- HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46(5): 651-656, 1980.
- HUETE, A.R. Reconstruction of vegetation spectra from soil plant canopies. IN: PROCEEDINGS OF THE 3rd INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING. Les Arcs, France, 16-20 Dec. 1985. p. 179-182. (ESA-SP-247).
- HUETE, A.R. Separation of soil-plant spectral mixtures by factor analysis. Remote Sensing of Environment, 19: 237-251, 1986.
- HUETE, A.R. Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy. Agronomy Journal, 79(1): 61-68, 1987.
- HUETE, A.R.; JACKSON, R.D. The tasseled-cap: size, shape and orientation changes due to soil background. IN: Proceedings the Eleventh International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University, West Lafayette, IN, 1985. p. 329-337.

- HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, 17(1): 37-54, 1985.
- HUETE, A.R.; POST, D.F.; JACKSON, R.D. Soil spectral effects on 4-space vegetation discrimination. Remote Sensing of Environment, 15(2): 155-166, 1984.
- IAG (INSTITUTO ASTRONÔMICO E GEOFÍSICO). Anuário astronômico-1986. IAG/USP, São Paulo, 1985, 276p.
- IDSO, S.A.; DeWIT, C.T. Light relations in plant canopies. Applied Optics, 9(1):177-184. 1970.
- IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo - Vol. 1. IPT, São Paulo, 1981a, 94p. (Publicação IPT nº 1183).
- IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO). Mapa geológico do Estado de São Paulo - vol. 1. IPT, São Paulo, 1981, 126p. (Publicação IPT número 1184).
- JACKSON, R.D. Remote Sensing of vegetation characteristics for farm management. IN: PROCEEDINGS OF SPIE, Vol. 475 (Remote Sensing); may 1-2, 1984; Arlington, VI; pp. 81-96.
- 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.; PINTER JR., P.J.; IDS0, S.B.; REGINATO, R.J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation and azimuth angle. Applied Optics, 18:3730-3732. 1979.
- JACKSON, R.D.; PINTER JR., P.J.; REGINATO, R.J.; IDS0, S.B. Hand-held radiometry. U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Reviews and Manuals, ARM-W-19. 1980.
- JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER JR., P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. Remote Sensing of Environment, 13:187-208. 1983.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology, 50:663-666. 1969.
- KAMAT, A.D.S.; CHATURVEDI, G.S.; SINGH, A.K.; SINHA, S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49(12): 1721-1727, 1983.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The Tasseled-Cap - A graphic description of the spectral temporal development of

- agricultural crop as seen by Landsat. IN: PROCEEDINGS OF MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, 1978. Purdue University, West Lafayette, IN, 1976. p.4B,41-51.
- KIMES, D.S. Modelisation of the optical scattering behavior of the vegetation canopies. IN: PROCEEDINGS OF THE 3rd INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING. Les Arcs, France, 16-20 Dec. 1985. p. 157-163. (ESA-SP-247).
- KIMES, D.S. Modeling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. Optical Society of America A, 1(7): 725-737. 1984.
- KIMES, D.S.; KIRCHNER, J.A. Diurnal variations of vegetation canopy structure. International Journal of Remote Sensing, 4(2): 257-271. 1983.
- KIMES, D.S.; KIRCHNER, J.A. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. Applied Optics, 21(22): 4119-4129. 1982.
- KIMES, D.S.; MARKHAM, B.L.; TUCKER, C.J.; McMURTREY III, J.E. Temporal relationships between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. Remote Sensing of Environment, 11: 401-411. 1981.
- KIRCHNER, J.A.; KIMES, D.S.; McMURTREY III, J.E. Variation of directional reflectance factors with structural changes of a developing alfalfa canopy. Applied Optics, 21: 3766-3774. 1982.
- KLEMAN, J.; FAGERLUND, E. An analysis of the influence of water and nutrient deficiency on the spectral signature of barley. Field measurements in the wavelength range 0.4-2.3 um. University of Stockholm, Stockholm, Sweden, 1985. 80p. (STOUNG56).
- KLEMAN, J.; FAGERLUND, E. Influence of different nitrogen and irrigation treatments on the spectral reflectance of barley. Remote Sensing of Environment, 21(1): 1-14, 1987.
- KLEMAN, J.; FAGERLUND, E. Reflectance properties of barley for different agronomical treatments. IN: PROCEEDINGS OF THE 3rd INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING. Les Arcs, France, 16-20 Dec. 1985. p.491-494. (ESA-SP-247).
- KNEIZYS, F.X.; SHETLE, E.P.; GALLERY, W.O.; CHATWYN JR., J.H.; ABREN, L.W.; SEKLEY, J.E.A.; CLOUGH, S.A.; FERN, R.W. LOWTRAN-6. Air Force Cambridge Laboratory, Cambridge, MA, 1983. (Report no. 62340).

- KNIPLING, G.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. Remote Sensing of Environment, 1: 155-159, 1970.
- KOFFLER, N.F. Identificação da cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp.) através de fotografias aéreas infravermelhas coloridas e dados multiespectrais do satélite Landsat. ESALQ/USP, Piracicaba, 1982. 234p. (Tese de Doutorado).
- KOLLENKARK, J.C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.E.; HOUSLEY, T.L. Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. Agronomy Journal, 74:751-758. 1982b.
- 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, 1982a.
- LEAMER, R.W.; NORIEGA, J.R.; GERBERMANN, A.H. Reflectance of wheat cultivars as related to physiological growth stages. Agronomy Journal, 72: 1029-1032. 1980.
- LEAMER, R.W.; NORIEGA, J.R.; WIEGAND, C.L. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. Agronomy Journal, 70: 113-118, 1978.
- LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Productivity and the morphology of crop stands: pattern with leaves. IN: EASTIN, J.D. (Ed.) Physiological aspects of crop yield. Madison, American Society of Agronomy, pp. 27-47. 1969.
- MACDONALD, R.B.; HALL, F.G. Global crop forecasting. Science, (208): 670-678, 1980.
- MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. IN: FERRI, M.G. (Ed.) Fisiologia Vegetal 1. São Paulo, Editora Pedagógica e Universitária, pp.333-350. 1985.
- MALILA, W.A. Information extraction techniques for multispectral scanner data. Willow Run Laboratories, NASA Report WRL-31650-74-T. 1972.
- MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectance and at-satellite temperatures. EOSAT Landsat Technical Notes, 1: 3-8, 1986.
- MATHER, P.M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester, Wiley, 1987. 352p.
- MENEZES, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor "Thematic Mapper" do Landsat-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semidetalhe. IGUSP, São Paulo, 1986. 233p. (Tese de Doutorado).

- MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. Review article. International Journal on Remote Sensing, 8(12): 1807-1827. 1987.
- MYERS, V.I. Soil, water and plant relations. IN: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Remote sensing with special reference to Agriculture and Forestry. National Academy of Sciences. Washington, D.C. 1970. p 253-323.
- NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION) - LANDSAT-4 data users handbook. Washington, USGS/EDC. 1984a. 210p.
- NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION). A prospectus for Thematic Mapper research in the earth sciences. NASA, Greenbelt, MD, 1984. 71p.
- NICODEMUS, F.E.; RICHMOND, J.C.; HSIA, J.J.; GINSBERG, I.W.; LIMPERS, T. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. U.S.Dept. of Commerce, NBS Monograph 160. 1977. 52 p.
- PERRY JR., C.P.; LAUTENSCHLAGER, L.F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 14: 169-182, 1984.
- PINTER JR, P.J.; JACKSON, R.D.; EZRA, C.E.; GAUSMAN, H.W. Sun angle and canopy architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. International Journal of Remote Sensing, 6: 1813-1825, 1985.
- POLLOCK, R.B.; KANEMASU, E.T. Estimating leaf-area index of wheat with LANDSAT data. Remote Sensing of Environment, 8: 307-312. 1979.
- RANSON, K.J.; BIEHL, L.L.; BAUER, M.E. Variation in spectral responses of soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry. International Journal of Remote Sensing, 6(12): 1827-1842. 1985.
- RANSON, K.J.; VANDERBILT, V.C.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F.; BAUER, M.E. Soybean canopy reflectance as a function of view and illumination geometry. IN: PROCEEDINGS OF THE 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT; may-1981; An Arbor; MI.
- REEVES, R.G., 1975. Glossary. In: REEVES, R.G., (Ed.) Manual of Remote Sensing. Falls Church; American Society of Photogrammetry; vol. 2, p. 2102.
- RIBEIRO, E.A.; II, F.A.M.; MOREIRA, J.C.; DUTRA, L.V. Manual de usuários dos sistemas de tratamento de imagens digitais. INPE, São José dos Campos, 1982. 158p.

- 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.; ARKIN, G.F.; NIXON, P.R.; GERBERMANN, A.H. Remotely-sensed spectral indicators of sorghum development and their use in growth modeling. Agricultural Meteorology, 26: 11-23. 1982.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L.; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMAN, A.H. Plant, soil, and shadow reflectance components of row crops. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 41(11): 1401-1407, 1975.
- ROBINOVE, C.J. Computation of physical values from Landsat digital data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(5): 781-784, 1982.
- ROBINSON, B.F.; BIEHL, L.L. Calibration procedure for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), Vol. 196, Measurements of Optical Radiations, p. 16-26. 1979.
- ROUSE JR., J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. IN: PROCEEDINGS OF THE 3rd SYMPOSIUM ON SIGNIFICANT RESULTS OBTAINED WITH ERTS-1. NASA SP-351, p. 309-317. 1973.
- RUDORFF, B.F.T. Dados LANDSAT na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. MCT/INPE, São João dos Campos, 1985. 76p. (Dissertação de Mestrado). (INPE-3744-TDL/202).
- RUDORFF, B.T.F.; BATISTA, G.T. Estimativa de produtividade agrícola da cultura da cana-de-açúcar através de um modelo agrometeorológico-espectral. MCT/INPE, São José dos Campos. 1989b. 64p.
- RUDORFF, B.T.F.; BATISTA, G.T. LANDSAT TM and agrometeorological data for wheat yield estimation at the farm level. MCT/INPE, São José dos Campos. 1988. (INPE-4591-PRE/1321). (Presented at 16th Congress of ISPRS; July 1-10, 1988, Kyoto, Japan).
- RUDORFF, B.T.F.; BATISTA, G.T. Relatório da Fase II do Projeto ESTIMA - Dados LANDSAT-TM e agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura do trigo ao nível de propriedades rurais. MCT/INPE, São José dos Campos. 1989a. (INPE-4782-RPE/582).
- SCHOWENGERDT, R.A. Techniques for image processing and classification in remote sensing. London, Academic, 1983. 249p.
- SMITH, J.A.; OLIVER, R.E. Plant canopy models for simulating composite scene spectroradiance in the 0.4 to 1.05 micrometer

- region. IN: PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT (Environmental Research Institute of Michigan, An Arbor, 1972); Part 2, p. 1333-1353.
- SMITH, J.T. Manual of color aerial photography. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VI, 1968. 550p.
- SUITS, G.H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. Remote Sensing of Environment, 2: 117-125. 1972.
- SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. Remote sensing: a quantitative approach. McGraw-Hill, New York, NY, 1978. 396p.
- THOMAS, J.R.; GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. Agronomy Journal, 69(5): 799-802, 1977.
- TUCKER, C.J. Red and photographic linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8: 127-150. 1979.
- TUCKER, C.J.; ELGIN JR., J.H.; McMURTREY III, J.E. Temporal spectral measurements of corn and soybean crops. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 45(5): 643-653. 1979.
- TUCKER, C.J.; HOLBEN, B.N.; ELGIN JR., J.H., MACMURTREY III, J.E. The relationship of spectral data to grain yield variation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46: 657-666. 1980.
- TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J. Satellite remote sensing of primary production. International Journal of Remote Sensing, 7(11): 1359-1416. 1986.
- TUCKER, C.J. A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44(11):1369-1380, 1978.
- USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). Landsat-4 data users handbook. U.S. Geological Survey, Alexandria, VA, 1984. 210p.
- 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 direction interactions. IN: INTERNATIONAL COLLOQUIUM on SPECTRAL SIGNATURES of OBJECTS in REMOTE SENSING, Avignon, 8-11 Sept. 1981. MontJavet, INRA. p. 499-508. 1981.
- VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. Remote Sensing of Environment, 16: 125-141. 1984.

- VERHOEF, W.; BUNNIK, N.J.J. The spectral directional reflectance of row crops. NIWARS, Delft, publ. n°. 35. 1976.
- WALBURG, G.; BAUER, M.E.; DAUGHRTRY, C.S.T.; HOUSLEY, T.L. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies. Agronomy Journal, 74: 677-683. 1982.
- WIEGAND, C.L. The value of direct observations of crop canopies for indicating growing conditions and yield. IN: PROCEEDINGS OF THE 18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. Paris, France, October 1-5, 1984. p. 1551-1560.
- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; KANEMASU, E.T. Leaf-area index estimates for wheat from LANDSAT and their implications for evapotranspiration and crop modeling. Agronomy Journal, 71: 336-342. 1979.
- WILLSTATER, R.; STOLL, A. Untersuchungen über die assimilation der kohlenstaure. Springer, Berlin, 1918. 440p. (Tradução parcial de Herman Kux).
- ZAR, J.H. Biostatistical analysis. Prentice, Englewood Cliffs, NJ, 1974. 620p.