

ESTUDOS RADIOMÉTRICOS DAS CULTURAS DE TRIGO E
DE FEIJÃO EM TRÊS TIPOS DE LATOSSOLOS

Antonio Roberto Formaggio
José Carlos Neves Epiphânio
Instituto de Pesquisas Especiais
Ministério da Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Maior entendimento e conhecimentos mais aprofundados das propriedades espectrais de culturas e de solos são necessários, quando se tem por meta desenvolver todo o potencial de medidas multiespectrais adquiridas por sensores colocados em satélites ou em aeronaves com a finalidade de monitorar, mapear e inventariar recursos agrícolas. No presente trabalho, foram obtidas 46 curvas espectrais de trigo e de feijão (faixa de 400 a 1050 nm) numa região geográfica onde ocorrem três dos mais importantes tipos de solos do Estado de São Paulo: o Latossolo Roxo, o Latossolo Vermelho-Escuro e o Latossolo Vermelho Amarelo. Tais medições espectrais procuraram abranger o maior número de condições dentro da dinâmica agrônoma das duas referidas culturas, ou seja, desde as fases iniciais do ciclo até a pré-colheita. Paralelamente, alguns parâmetros quantificadores do desenvolvimento das culturas foram coletados, representados pela porcentagem de cobertura do solo, índice de área foliar e fitomassa. Os resultados indicaram a existência de boas respostas correlativas pelo modelo linear simples, para o feijão, quando são confrontados variáveis espectrais (bandas TM simuladas RTM 1,2,3 e 4 e índices de vegetação Razão Simples, Razão Diferença Normalizada e Índice de Vegetação Transformado) com variáveis agrônomicas (Índice de Área Foliar, Fitomassa e Porcentagem de Cobertura do Solo). No caso do trigo, houve boas correlações do IAF com RTM4, RRS e RND, bem como entre porcentagens de cobertura do solo e RTM4, pelo modelo linear simples.

ABSTRACT

A more detailed knowledge about the crops and soils spectral behaviour is needed when one wants to develop the potential of the multispectral measurement acquired by aerospace sensors with the purpose of monitoring, mapping and inventorying agricultural resources. In this work, 46 spectral curves (400 to 1050 nm) were obtained for wheat and bean, in the NW region of São Paulo State, where three important types of Brazilian Oxisols occur: "Latossolo Roxo", "Latossolo Vermelho Escuro" and "Latossolo Vermelho Amarelo". The spectral measurement included a wide range of cultural conditions during the bean and wheat biological cycles. Some cultural indices were also obtained, as percent soil cover, leaf area index and phytomass. The results lead to some indications: there were good simple linear correlations between spectral variables (TM simulated bands RTM1,2,3,4 and vegetation indices: Simple Ratio, Normalized Difference Ratio and Transformed Vegetation Index) and agronomic variables (LAI, phytomass and percent soil cover) for bean. On the other hand, there were good correlations between LAI and RTM4, Simple Ratio and Normalized Difference Ratio, as well as between percent soil cover and RTM4, using simple linear model, for wheat.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido demonstrado que dados de sensoriamento remoto obtidos a partir de plataformas aéreas e/ou espaciais têm enorme potencial para fornecer informações sobre culturas e solos, que poderiam ser úteis para previsões de safras agrícolas.

O conhecimento das relações existentes entre os parâmetros físicos das culturas com o seu comportamento espectral é um passo importante para se avaliar o desenvolvimento das culturas utilizando modelos baseados em dados de sensoriamento remoto multiespectral.

Bandas espectrais localizadas nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo têm mostrado significativas correlações com as porções fotossinteticamente ativas de dosséis agrícolas, para uma variedade de tipos de coberturas (por exemplo, Williamson, 1988; Curran e Milton, 1983; Hatfield et al., 1985).

Best e Harlam (1985) verificaram coeficientes de correlação altamente significativos, com o modelo exponencial, quando confrontaram Índice de Área Foliar (IAF) de aveia com os modelos de Índice de vegetação Diferença Normalizada e Razão Simples.

Bauer et al. (1981), Ahlrichs e Bauer

(1983), Asrar et al. (1984) e Hatfield et al. (1985), trabalhando com a cultura de trigo, verificaram que houve significativas correlações entre IAF e reflectâncias nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, bem como para as relações entre essas bandas. Essas diversas relações mostraram-se lineares em alguns casos e exponenciais em outros, onde os valores de IAF eram elevados.

Outro parâmetro agrícola de interesse é o peso da matéria verde ou fitomassa.

Boutton e Tieszen (1983) observaram significativas correlações entre essa variável e a razão entre as reflectâncias do IV próximo e do vermelho, medidas no nível de campo para pastagens.

Curran (1982), utilizando o Índice de Vegetação Diferença Normalizada também já observou correlações significativas com fitomassa, em pastagens. Curran (1983) afirma que, para pastagens, em que a biomassa é linearmente correlacionada com o IAF, é possível usar uma simples curva de calibração para estimar a fitomassa a partir da avaliação do IAF.

Kollenkark et al. (1982a), estudando a cultura da soja, observaram correlações significativas entre peso da matéria verde e parâmetros de sensoriamento remoto, com algumas variações nos coeficientes de determinação em função dos tipos de solos.

A porcentagem de cobertura do solo pela cultura é outro parâmetro de interesse.

Kollenkark et al. (1982a) observaram elevados valores de coeficientes de correlação entre esse parâmetro agrônomico e a reflectância no vermelho e IV próximo, bem como a razão IV/vermelho, para a cultura da soja.

Konemasu (1974), estudando a cultura do trigo, obteve coeficientes de correlação da ordem de 0,64 e de 0,72 entre reflectância no IV próximo e IAF e porcentagem de cobertura do solo, respectivamente. Kollenkark et al. (1982 b) verificaram uma relação inversa entre porcentagem de cobertura do solo e reflectância na região do vermelho e uma relação direta na região do IV próximo. Curran (1982) verificou uma relação direta com a diferença normalizada.

Assim, o presente trabalho objetiva avaliar qualitativamente a dinâmica do comportamento espectral do trigo e do feijão ao longo dos seus respectivos ciclos biológicos. Além disso, são buscadas as relações entre variáveis espectrais (obtidas por espectroscopia de campo) na faixa de 400 a 1100 nm e variáveis agronômicas como: Índice de Área Foliar, Fitomassa e Porcentagem de Cobertura do Solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado com base em dados obtidos a partir de culturas agrícolas em andamento no outono/inverno de 1987, na região de Barretos/Guaíra/Colômbia, municípios localizados a NW do Estado de São Paulo (aproximadamente 20°30'S e 48°30'W).

Nesta região, as culturas são irrigadas por sistemas de pivôs centrais (aspersão), graças

ao relevo plano ou suave-ondulado dos solos: Roxo, Vermelho-Escuro e Vermelho Amarelo, que ocorrem com absoluto domínio espacial (CNEPA, 1960).

As culturas de interesse foram o trigo (*Triticum aestivum*, L.), variedades Anahuac e IAC-161 e o feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), variedades Cariquinha e Carioca 80. As datas de plantio variam dentro de um amplo intervalo de tempo - fins de março a meados de junho, em função de se tratar de agricultura irrigada. O espaçamento do trigo girou em torno de 18 cm entre fileiras com cerca de 50 plantas por metro linear, enquanto que, para o feijão foi de aproximadamente 56 cm entre fileiras com cerca de 9 a 12 plantas por metro linear.

Nas diversas fazendas cujos pivôs centrais foram selecionados como áreas de coleta de dados, tanto para o trigo como para o feijão, foram obtidos os seguintes parâmetros agrônomicos: Índice de Área Foliar, Peso da Matéria Verde e Porcentagem de Cobertura do Solo (para maior facilidade, designados doravante apenas por IAF, PMV e COV, respectivamente). A metodologia de obtenção para estes parâmetros foi a mesma utilizada por Epiphanyo (1988), onde podem ser encontrados maiores detalhes.

Os parâmetros espectrais do presente estudo foram obtidos por um radiômetro portátil KI-MOTO, 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 1050 nm. 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 Pesquisas 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 2,5 m do nível do terreno, com o brinde então uma área correspondente a um círculo com diâmetro de aproximadamente 50 cm. 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 cumulus 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 exatamente da área "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 verde das culturas (COV). Os dados registrados na impressora do radiômetro foram transferidos para computador e os valores de reflectância foram devidamente determinados através do uso de média dia das duas leituras de radiância de cultura e

da média das duas leituras de radiância da placa padrão.

A partir das 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:

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

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

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

$$RTM4 = R_{850}$$

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;

- $R_{450, 475, \dots}$ = valor de reflectância obtida em condições de campo para o comprimento de onda 450, 475, ... (nm).

Devido à simplicidade e pelo fato de que têm sido citados méritos na descrição dos padrões de crescimento de culturas, foram utilizados os três seguintes Índices de Vegetação, obtidos a partir das bandas simuladas RTM 1,2, 3 e 4:

- Razão Simples (designado RRS) = $\frac{RTM4}{RTM3}$ (adaptado de Richardson e Wiegand, 1977);

- Diferença Normalizada (designado RRS) = $\frac{RTM4 - RTM3}{RTM4 + RTM3}$ (adaptado de Rouse et al., 1973);

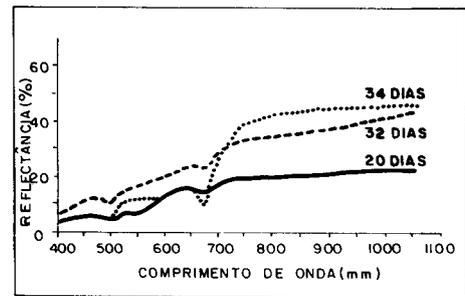
- Índice de Vegetação Transformado (designado RTV) = $\sqrt{RND + 0,5}$ (adaptado de Rouse et al., 1973).

Análises gráficas e análises de correlação linear simples foram utilizadas, a fim de discutir e de quantificar as relações entre os parâmetros culturais do trigo e do feijão e parâmetros espectrais obtidos por radiometria de campo, para ambas as culturas.

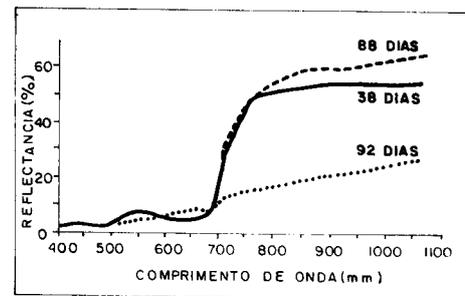
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- DINÂMICA ESPECTRAL AO LONGO DO CICLO

As Figuras 1a e 1b correspondem a amostras de curvas espectrais da cultura de feijão, obtidas em diferentes etapas do seu ciclo biológico. A Tabela 1 representa os valores de IAF_2 , PMV e COV da cultura de feijão, referentes às curvas espectrais das Figuras 1a e 1b.



(a)



(b)

Figuras 1(a) e 1(b) - Curvas espectrais para a cultura de feijão aos 20, 32, 34, 38, 88 e 92 dias de idade.

As curvas espectrais das Figuras 1(a) e 1(b) permitem avaliar a dinâmica do comportamento espectral do feijão, desde a fase de solo praticamente exposto (curva dos 20 dias), passando por fases intermediárias (curvas dos 32 e 34 dias), em que o formato das curvas vai progressivamente assumindo a tipicidade do comportamento espectral de vegetação verde vigorosa (bem ilustrada pela curva dos 38 dias) e chegando à fase final do ciclo em que a correspondente resposta (curva dos 92 dias) toma feições inversas da tipicidade espectral da vegetação verde, porém semelhante à da fase inicial.

Como afirma Epiphanyo (1982a), da perspectiva do sensoriamento remoto, um ciclo agrícola completo poderia ser compreendido como a seqüência das seguintes grandes etapas: solo exposto → acúmulo de clorofila e aumento da cobertura verde sobre o solo → queda da quantidade de clorofila → solo exposto, novamente. Conseqüentemente, cada uma dessas etapas apresentaria comportamento espectral característico, o que está bem ilustrado nas Figuras 1(a) e 1(b).

A cultura de feijão, na região de estudo, é plantada com espaçamento médio de 56 cm entre fileiras de 9 a 12 plantas por metro linear, como já foi dito anteriormente, e é irrigada por grandes sistemas de aspersão conhecidos como "Pivô Central".

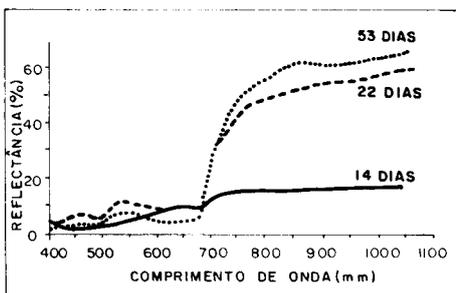
O desenvolvimento da cultura em termos de emissão foliar é lento no início do seu ciclo, e cresce geometricamente a partir das primeiras folhas até o início da maturação, sendo que há um constante incremento da quantidade de folhas fotossinteticamente ativas.

Assim, constata-se que, para a cultura de feijão, o comportamento espectral típico de vegetação verde vigorosa deve começar a ocorrer por volta do 34º ao 38º dia do ciclo a contar da data de plantio. O tempo de permanência desta tipicidade espectral deve durar até por volta do 88º dia do ciclo, ou seja, por um período de aproximadamente 50 dias.

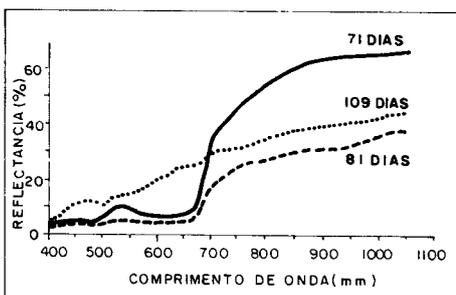
Na região, o número médio de dias de duração do ciclo compreendido entre o plantio e a colheita foi de cerca de 106 dias, com um mínimo de 87 dias e um máximo de 118 dias. Estes números indicam que a fase final de maturação é razoavelmente variável quanto à sua duração, dependendo do manejo da água de irrigação exercido pelo proprietário de cada pivô central - alguns continuam a irrigar no final do ciclo, es-tendendo-o; enquanto que outros cortam cedo o fornecimento de água, acelerando o processo de maturação e, por conseguinte, diminuem a duração do ciclo.

Epiphanyo (1988), utilizando dados do TM/LANDSAT-5, para as culturas de trigo e feijão, na mesma região, sugeriu que o período em que o feijão passa a apresentar comportamento espectral típico de vegetação verde situa-se entre 40 e 50 dias após o plantio. Contudo, as diferenças de sensores (TM x radiômetro de campo), bem como de condições de obtenção dos dados espectrais (por exemplo, a interferência atmosférica nos dados TM) devem ser devidamente ponderadas numa possível comparação entre os resultados obtidos em ambos os trabalhos.

No tocante à cultura de trigo, nas Figuras 2(a) e 2(b) são apresentadas amostras de curvas espectrais representativas das diferentes etapas do seu ciclo biológico.



(a)



(b)

Figuras 2(a) e 2(b) - Curvas espectrais para a cultura de trigo aos 14, 22, 53, 71, 81 e 109 dias de idade.

A dinâmica do comportamento espectral do trigo é bem distinta em relação à do feijão. Numa primeira fase, com baixa porcentagem de cobertura verde, a resposta espectral ainda é totalmente predominada pela reflectância do solo, como mostra a curva dos 14 dias, na Figura 2(a). Entretanto, já aos 22 dias, a resposta apresenta as feições espectrais típicas de vegetação verde vigorosa, que se mantém com estas mesmas feições nesta fase intermediária do ciclo (curvas dos 53 e dos 71 dias), vindo posteriormente a descaracterizar-se quando a parte aérea vai tornando-se totalmente amarelecida (curva dos 81 dias) na fase de maturação das espiguetas, até o final do ciclo (curva dos 109 dias).

Na região de estudo, a cultura de trigo é plantada com espaçamento médio de 18 cm entre fileiras, com aproximadamente 50 plantas por metro linear. Em função desta alta quantidade de plantas por unidade de área, em condições normais de desenvolvimento, o crescimento inicial do trigo e seu perfilamento são bastante rápidos, promovendo a cobertura completa do solo em pouco tempo. Contudo, concomitantemente ao desenvolvimento da cultura, com a grande rapidez de emissão de folhas verdes, há também um contínuo senescimento e amarelecimento das folhas, o que, a partir de determinado ponto do ciclo, faz começar a haver uma perda progressiva daquela tipicidade de comportamento espectral.

A partir dessas considerações e dos dados das Figuras 2(a) e 2(b), para o trigo, pode-se indicar que o comportamento espectral típico da vegetação inicia-se um pouco antes dos 22 dias de idade e, apesar de certo decaimento do comportamento espectral típico devido ao surgimento de espiguetas e uma perda gradativa das folhas verdes, ainda permanece aos 81 dias após o plantio. Isso sugere que a permanência com resposta espectral típica deve ser no mínimo de 60 dias.

Com relação ao trigo, Epiphanyo (1988) indicou que o tempo decorrido entre a data de plantio e a expressão do comportamento espectral típico de vegetação está situado abaixo de 30 dias. Isto está de acordo com o que foi encontrado no presente trabalho, embora os sensores e as condições de obtenções dos dados espectrais tenham sido diferentes.

Na região de estudo, o número médio de dias de duração do ciclo do trigo, entre a data de plantio e a de colheita, foi de 122 dias, com um mínimo de 113 dias e um máximo de 133 dias.

É interessante ressaltar ainda que, após o início da descaracterização de comportamento típico de vegetação verde vigorosa (que, como indicado anteriormente, ocorre pouco após os 81 dias de idade), a matéria vegetal acima do solo apresenta alturas médias superiores a 1 metro e coloração amarelo-palha, recobrando quase totalmente a superfície do solo. Assim sendo, as respostas espectrais vão assumindo características semelhantes às de palha seca como pode ser ilustrado pelas curvas dos 81 e dos 109 dias (Figura 2b).

3.2- CORRELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS AGRONÔMICAS E ESPECTRAIS

Medições espectrais sobre dosséis de culturas, feitas a nível de campo, fornecem uma ligação imprescindível entre observações macro de campos agrícolas (sensores em aeronaves e em satélites) e observações micro no laboratório de amostras de folhas e de solos.

Um segundo papel relevante da radiometria de campo é o desenvolvimento e a verificação de modelos de radiação de dosséis. A possibilidade de inverter tais modelos a fim de estimar parâmetros agronomicamente importantes de dosséis

culturais (e.g. IAF, COV, PMV) corrobora a importância dos dados de espectroscopia de campo.

Na Tabela 1 são apresentados os valores de coeficientes de correlação linear simples para o feijão, os quais relacionam: - os canais RTM1, 2, 3 e 4 (simulados a partir dos dados de radiometria de campo); - os modelos de índices de vegetação Razão Simples, Diferença Normalizada e Índice de Vegetação Transformado, obtidos a partir de RTM3 e RTM4 (designados respectivamente por RRS, RND e RTV); e, - os indicadores das condições agronômicas das duas culturas (Índice de Área Foliar ou IAF, Fitomassa ou PMV e Porcentagem de Cobertura Verde ou COV).

TABELA 1

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES ENTRE: - AS BANDAS SIMULADAS RTM1, 2, 3, 4 do LANDSAT; - TRÊS MODELOS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (RRS, RND E RTV); E, - TRÊS PARÂMETROS AGRONÔMICOS (IAF, PMV E COV), PARA AS CULTURAS DE INVERNO DE TRIGO E DE FEIJÃO IRRIGADOS.

PARÂMETROS CULTURAIS PARÂMETROS ESPECTRAIS	TRIGO			FEIJÃO		
	IAF	PMV	COV	IAF	PMV	COV
RTM1	0,1083 NS	-0,3527 NS	0,2093 NS	-0,3616 NS	-0,3642 NS	-0,6691 (**)
RTM2	0,0586 NS	-0,5054 (*)	0,1784 NS	-0,1919 NS	-0,1996 NS	-0,5169 (**)
RTM3	-0,2721 NS	-0,3990 NS	-0,0176 NS	-0,5015 (*)	-0,4929 (*)	-0,8447 (**)
RTM4	0,6213 (*)	0,0801 NS	0,6447 (**)	0,5591 (*)	0,4870 (*)	0,7452 (**)
RRS	0,7118 (**)	0,3311 NS	0,4048 NS	0,5649 (*)	0,6203 (**)	0,8595 (**)
RND	0,5166 (*)	0,3149 NS	0,4689 (*)	0,5641 (*)	0,5292 (*)	0,9112 (**)
RTV	0,4902 NS	0,2751 NS	0,4654 (*)	0,5579 (*)	0,5193 (*)	0,9109 (**)

NS = não significativo; (*) significativo a 5%; (**) significativo a 1%.

Legenda: RTM1,2,3,4 = canais TM/LANDSAT, simulados a partir de dados obtidos por radiometria de campo;

RRS = modelo de índice de vegetação RAZÃO SIMPLES, obtidos com RTM3 e RTM4;
 RND = modelo de índice de vegetação RAZÃO NORMALIZADA, obtido com RTM3 e RTM4;
 RTV = modelo de Índice de Vegetação Transformado, obtido com RTM3 e RTM4;
 IAF = Índice de Área Foliar;
 PMV = Peso da Matéria Verde (Fitomassa);
 COV = Porcentagem de Cobertura Verde.

Convém salientar que o que se está buscando através dos procedimentos de correlação linear simples (como os resumidos na Tabela 1) é verificar se existe uma relação linear entre as variáveis agronômicas e as variáveis espectrais em estudo; em quais pares destas variáveis a relação linear existe, a ordem de grandeza desta relação, e se ela é estatisticamente significativa ou não.

Desta forma, conhecimentos podem ser gerados, de modo a se poder construir modelos, os quais, potencialmente permitirão obter vários tipos de informações sobre culturas agrícolas, a partir de dados de sensoriamento remoto.

Assim sendo, constata-se, pela análise da Tabela 1, que houve um maior número de boas correlações entre variáveis espectrais e agronômicas para a cultura de feijão do que para o tri-

go.

Isto permite indicar que o comportamento das variáveis agronômicas, ao longo do ciclo do feijão (uma vez que os dados utilizados referem-se a um ciclo completo), é semelhante ao comportamento das variáveis espectrais. Esta constatação pode ser considerada auspiciosa dentro dos objetivos do sensoriamento remoto agrícola, pelo potencial de informações sobre a cultura contido nestas relações.

O menor número de boas correlações entre os dois tipos de variáveis, para o trigo, poderia ser atribuído ao hábito mais diferenciado dos variáveis agronômicas em relação às variáveis espectrais durante o ciclo da cultura. Ou seja, nem sempre há relação do tipo linear entre ambos os tipos de variáveis; ou mesmo, a relação pode ser linear numa fase do ciclo e de

outro tipo noutra fase. Seria interessante, então, que fossem feitas investigações a respeito de tais relações para as diferentes fases do ciclo biológico do trigo.

No caso do feijão, houve correlações altamente significativas (a 1% e a 5%) para:

- cobertura verde (COV) com as 7 variáveis espectrais;
- fitomassa (PMV) com RTM3, RTM4 e os 3 índices de vegetação (RRS, RND e RTV); e,
- índice de área foliar (IAF) com 5 das 7 variáveis espectrais.

No caso do trigo, as melhores correlações lineares foram para:

- cobertura verde (COV) com RTM4 e os índices RND e RTV;
- fitomassa (PMV) com RTM2; e
- índice de área foliar (IAF) com RTM4 e os índices RRS e RND (em concordância com Bauer et al., 1980; Bauer et al., 1981; Ahlrichs e Bauer, 1983; Asrar et al., 1984 e Hatfield et al., 1985).

Assim, verifica-se que mudanças nas variáveis IAF, PMV e COV são manifestadas nas reflexões dos dosséis culturais de trigo e, principalmente, de feijão, de acordo com o modelo linear simples.

No caso da fitomassa do trigo, provavelmente não houve boas correlações pelo motivo de que as folhas constituem-se na maior porção das áreas refletidas das plantas em desenvolvimento, quando vistas verticalmente. No caso do trigo, a área foliar deve atingir um máximo próximo do momento em que ocorre a fase reprodutiva das plantas. Durante esta fase reprodutiva, as plantas acumulam fitomassa principalmente nos grãos, os quais contribuem com uma porção relativamente pequena da área de planta vista pelo sensor. Assim sendo, após atingir um máximo de área foliar, as acumulações de fitomassa continuam, mas provavelmente sem a correspondente resposta espectral.

Ainda analisando a Tabela 1, verifica-se que o maior potencial de boas correlações ocorreu para as bandas RTM3 e RTM4 e principalmente para os três modelos de índices de vegetação (RRS, RND e RTV).

De qualquer forma, observa-se que as relações entre as três variáveis agrônomicas e as sete variáveis espectrais não seguem os mesmos padrões indistintamente, seja qual for a cultura. Então, torna-se necessário investigar estes tipos de relação para cada cultura, separadamente.

Finalizando, pode-se indicar que as variáveis espectrais, principalmente na faixa do vermelho e do IV próximo, bem como as combinações destas variáveis por meio de índices de vegetação, são sensíveis às variações de valores de variáveis agrônomicas de grande interesse. Assim, elas poderiam servir como interessantes dados para modelos de estimativas de rendimentos agrícolas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Principalmente no caso do feijão, houve boas respostas correlativas, pelo modelo linear simples, das bandas simuladas TM (RTM1, 2, 3, 4) e dos índices de vegetação RRS, RND e RTV, quando estas variáveis espectrais são confrontadas com indicadores de desenvolvimento e do vigor das culturas (como IAF, PMV e COV).

O maior potencial de sensibilidade das variáveis espectrais às mudanças das variáveis agrônomicas ocorreu para as bandas RTM3 e RTM4 e, principalmente, para os três índices de vegetação (RRS, RND e RTV).

Cada cultura deve apresentar um tipo de relação entre os dois tipos de variáveis, não se podendo generalizar que o tipo de relação entre o IAF e a RRS, por exemplo, vale para ambas as culturas.

A radiometria de campo, realizada com os devidos cuidados metodológicos, constitui-se em excelente ferramenta para o desenvolvimento e a verificação de modelos de radiação de dosséis ou modelos de estimativas de rendimentos agrícolas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLRICH, J.S.; BAUER, M.E. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. *Agronomy Journal*, 75(6):987-993, 1983.
- 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):300-306, 1984.
- BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T.; VANDERBILT, V.C. Spectral agronomic relationships of maize, soybean, and wheat canopies. IN: PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING. Avignon, France, 8-11 September, 1981, p.261-273.
- BEST, R.G.; HARLAN, 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.
- 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, 634 p.
- CURRAN, P.J. Multispectral photographic remote sensing of green vegetation biomass and productivity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(2): 243-250, 1982.
- . Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A309:257-270, 1983.

- 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.; HIXSON, M.M. Effects of management practices on reflectance of spring wheat canopies. *Agronomy Journal*, 72(6):1055-1060, 1980.
- EPIPHANIO, J.C.N. *Dados TM/Landsat-5 no estudo das culturas de trigo e feijão*. ESALQ/USP, Piracicaba, 1988, 200 p. (Tese de Doutorado).
- 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.
- KANEMASU, E.T. Seasonal canopy reflectance patterns of wheat, sorghum and soybean. *Remote Sensing of Environment*, 3(1): 43-47, 1974.
- KOLLENKARK, J.C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M. E.; HOUSLEY, T.L. Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. *Agronomy Journal*, 74(4): 751-758, 1982a.
- 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): 1079-1184, 1982b.
- WILLIAMSON, H.D. Evaluation of middle and thermal infrared radiance in indices used to estimate GLAI. *International Journal of Remote Sensing*, 9(2): 275-283, 1988.