

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Influência da geometria de iluminação e do ângulo de visada na resposta
espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Priscylla Ferraz

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

Piracicaba
2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Priscylla Ferraz
Engenheiro Agrônomo

Influência da geometria de iluminação e do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

Orientador:
Prof. Dr. RUBENS ANGULO FILHO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2005

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Ferraz, Priscylla

Influência da geometria de iluminação e do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) / Priscylla Ferraz. - - Piracicaba, 2005.
76 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Feijão 2. Radiometria 3. Região espectral 4. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 635.652

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICO

Aos meus pais, Márcio de Silos Ferraz e Yamara Potel de Silos Ferraz, com amor e gratidão, pela dedicação, carinho e confiança e por me ensinarem não só o necessário para que eu pudesse vencer na vida, mas, principalmente, a ser feliz;

Aos meus Avós Wilson Potel e Ida Pâmio Potel, com carinho, pelo exemplo de vida, carinho e apoio sempre prestados;

Ao meu irmão Eduardo Ferraz, com carinho, pelo incentivo e amizade;

Ao meu namorado Rodrigo Otávio Câmara Monteiro, com amor, pelo companheirismo, amizade e amor; aos seus Pais, Francisco Otávio Monteiro e Gláucia Maria Câmara Monteiro, pelo apoio.

Agradecimentos

À Deus, pela oportunidade de viver e a cada dia adquirir mais conhecimento para entender e admirar suas criações;

À Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em especial à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pelo apoio concebido durante a realização do programa;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro concedido durante a realização do curso;

Ao Professor Dr. Rubens Angulo Filho, pelo apoio, orientação, amizade e dedicação prestados durante a realização deste trabalho;

Ao Professor Dr. Carlos Alberto Vettorazzi, pela colaboração e sugestões apresentadas a esta Dissertação;

À Professora Dra. Sonia Maria de Stefano Piedade, do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP, pelo apoio na análise estatística dos dados;

Ao Prof. Dr. José Antônio Frizzone, pelo apoio e ajuda prestados para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Maurício Alves Moreira, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE, pelas sugestões apresentadas a este trabalho;

Ao Dr. Carlos Augusto Hungria da Cunha, pelo ensino na coleta e processamento dos dados radiométricos;

Ao Dr. Luis Fernando Sanglade Marchiori, diretor técnico da Fazenda Areão – ESALQ/USP, pela ajuda na instalação e manutenção da cultura no campo;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural e da Fazenda Areão – ESALQ/USP, em especial Áureo Santana de Oliveira, Antônio Agostinho Gozzo, Hélio de Toledo Gomes, Juarez Renó do Amaral, Lino Stênico e Osvaldo Rettore Neto;

Às secretárias do Departamento de Engenharia Rural, Vanda Macedo Zambello, Davilmar Aparecida D. Collevatti e Sandra Regina T. Silveira Mello, pela atenção e disposição em nos atender;

Aos amigos, Alexandre Martin Martines, Jeanedy Pazinato, Valesca Pandolfi e Mauro Guida dos Santos, Edson Cabral e Lazara Maria da Silva, Marcos Emanuel e Madaila Veloso,

Valquíria, Francisco Edinaldo e Francilene Mousinho, pelo companheirismo e bons momentos de convivência;

Ao amigo Antônio Clarette Santiago Tavares, pela amizade e indispensável ajuda nas coletas de campo;

À Prof. Raquel, pela dedicação e carinho;

Aos colegas de sala, Silvio Frosini de Barros Ferraz e Adriana Basile, pela ajuda e companheirismo;

Aos amigos Sérgio Weine Paulino Chaves, Tadeu Queiroz e Ronaldo Antônio dos Santos, pela ajuda na finalização deste trabalho;

À todos os colegas do Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem - ESALQ/USP, pela convivência e companheirismo no decorrer do curso;

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho científico, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Sensoriamento remoto	16
2.2 Radiometria	17
2.2.1 Radiometria de campo.....	18
2.3 Comportamento espectral de alvos agrícolas	20
2.3.1 Região do visível	23
2.3.2 Região do infravermelho próximo.....	24
2.3.3 Fatores que afetam as propriedades ópticas da folha	25
2.3.4 Fatores que influenciam na resposta espectral de dosséis agrícolas.....	27
2.4 Índices de vegetação.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	33
3.2 Solo.....	34
3.3 Cultura do feijão, instalação e condução da cultura no campo	35
3.4 Sistema e manejo da irrigação.....	37
3.5 Delineamento experimental	38
3.6 Estimativa do índice de área foliar.....	39
3.7 Medidas radiométricas sobre o dossel da cultura do feijão	40
3.8 Cálculo do fator de reflectância (FR).....	43
3.9 Cálculo do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI).....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Fatores de reflectância nas bandas TM ₃ e TM ₄	45
4.2 Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI).....	50

4.3 Relação IAF - NDVI	52
5 CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	57
ANEXOS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva média de reflectância da vegetação fotossinteticamente ativa.....	21
Figura 2 - Curvas de reflectância espectral de uma folha, obtidas durante a fase de crescimento vegetativo e durante a senescência.....	26
Figura 3 - Área experimental - Fazenda Areão, ESALQ/USP	33
Figura 4 - Esquema do sistema de irrigação.....	37
Figura 5 – Medidor do índice de área foliar, LAI – 2000	39
Figura 6 - Medidas do campo de visada dos ângulos nadirais	42
Figura 7 - Variação do fator de reflectância nas bandas TM ₃ (curva contínua) e TM ₄ (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 10 horas, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45° - Piracicaba, SP, 2005.....	47
Figura 8 - Variação do fator de reflectância nas bandas TM ₃ (curva contínua) e TM ₄ (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 12 horas, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45° - Piracicaba, SP, 2005.....	48
Figura 9 - Variação do fator de reflectância nas bandas TM ₃ (curva contínua) e TM ₄ (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 14 horas, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45° - Piracicaba, SP, 2005.....	48
Figura 10 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 10 horas, sob diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005	50

- Figura 11 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 12 horas, sob diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005 51
- Figura 12 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 14 horas, sob diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005 51
- Figura 13 - Regressão entre os valores de NDVI e os valores observados para o IAF, no horário das 10 horas, nos diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005 54
- Figura 14 - Regressão entre os valores de NDVI e os valores observados para o IAF, no horário das 12 horas, nos diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005 54
- Figura 15 - Regressão entre os valores de NDVI e os valores observados para o IAF, no horário das 14 horas, nos diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do solo da área de estudo.....	34
Tabela 2 – Características físicas do solo da área de estudo	34
Tabela 3 - Etapas do ciclo do feijão (fenologia), com os respectivos intervalos de tempo observados no experimento	36
Tabela 4 - Valores de coeficiente da cultura (Kc) de feijão para as condições brasileiras	38
Tabela 5 - Esquema da análise de variância.....	39
Tabela 6 - Estádios fenológicos da cultura do feijão.....	42
Tabela 7 - Valores de F para o FR na banda TM ₃ em função do horário de leitura e ângulo de visada, nas cinco datas (D) representativas das fases do ciclo do feijoeiro-Piracicaba, SP, 2005	45
Tabela 8 - Valores de F para o FR na banda TM ₄ em função do horário de leitura e ângulo de visada, nas cinco datas (D) representativas das fases do ciclo do feijoeiro-Piracicaba, SP, 2005	46
Tabela 9 - Teste de Tukey para os valores médios do fator de reflectância nas bandas TM ₃ e TM ₄ , nos diferentes ângulos de visada – Piracicaba, SP, 2005	46
Tabela 10 - Resumo dos resultados da análise de regressão simples da relação entre IAF e NDVI, para as diferentes condições de estudo	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

FOV – “Field of View” (Campo de Visada)

FR – Fator de Reflectância

FRB – Fator de Reflectância Bidirecional

IAF – Índice de Área Foliar

IVs – Índices de Vegetação

ρ_{IVP} – Fator de Reflectância Obtido na Faixa Espectral do Infravermelho Próximo

NDVI – Índice de Vegetação Diferença Normalizada

nm – Nanômetro (10^{-9} m)

RS – Índice de Vegetação Razão Simples

R^2 – Coeficiente de Determinação

TM – Thematic Mapper

TM₃ – Fator de Reflectância Medido na Faixa Espectral do Vermelho (630 nm a 700 nm)

TM₄ – Fator de Reflectância Medido na Faixa Espectral do Infravermelho Próximo (760 nm a 900 nm)

ρ_V – Fator de Reflectância Obtido na Faixa Espectral do Vermelho

VT – Índice de Vegetação Transformado

CBERS – Programa Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

RESUMO

Influência da geometria de iluminação e do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

O estudo do comportamento espectral de culturas agrícolas, por meio da radiometria de campo, contribui para a obtenção de uma maior precisão nos modelos gerados pelo sensoriamento remoto, quando utilizados na estimativa e análise de variáveis agronômicas de culturas. Tendo em vista que os sensores a bordo de satélites podem adquirir imagens sob diferentes ângulos de visada e em diferentes horários de passagem, torna-se necessário o conhecimento do efeito dessas variáveis sobre a resposta espectral das culturas. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência de três ângulos de visada (0°, 30° e 45°) e três horários de medição (10 horas, 12 horas e 14 horas), o que implica em diferentes ângulos de elevação solar, na resposta espectral da cultura de feijão, como também nas relações entre o índice de área foliar (IAF) e o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI). O experimento foi conduzido na “Fazenda Areão”, pertencente à Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP), Piracicaba, SP, de março a junho de 2005. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, constituído de três blocos, três tratamentos primários referentes aos horários de leitura e três tratamentos secundários relacionados ao ângulo de visada. Foram realizadas nove campanhas de medição no campo, com o espectroradiômetro SPECTRON SE-590. Dos fatores de reflectância (FR) determinados, simularam-se as bandas TM₃ e TM₄ e, a partir destes, foram gerados os índices de vegetação. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que a variação do horário de medição não proporcionou variação significativa sobre os valores do FR nas bandas TM₃ e TM₄. Já a variação do ângulo zenital de visada influenciou significativamente, ao nível de 5 % de probabilidade, o FR nas bandas TM₃ e TM₄, para todos os dias de leitura. Quanto às relações IAF e NDVI, o modelo linear apresentou melhores ajustes, estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$).

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Espectrorradiometria; Comportamento espectral

ABSTRACT**Radiation geometry and viewing angle influence on the spectral response of bean crop
(*Phaseolus vulgaris* L.)**

The study of the spectral behavior of crops, through field radiometry, contributes to a better precision in models generated by remote sensing, when they are used to estimate and analyze crops' agronomic variables. Once sensors aboard of satellites are able to acquire images under different viewing angles and at different times of the day, it is necessary to understand the effect of such variables on the crops' spectral response. The objective of this research was to evaluate the influence of the viewing angles (0°, 30° and 45°) and three radiometric acquisition times (10:00 a.m, 12:00 a.m and 2:00 p.m), related to different sun elevation angles, on the spectral behavior of bean crop, as well as on the relationship between Leaf Area Index (LAI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The experiment was installed in the "Fazenda Areão", of the ESALQ/USP, in Piracicaba, SP, from March to June, 2005. The experimental design was the randomized blocks, with split plots, with three blocks, three primary treatments (acquisition times) and three secondary treatments (viewing angles). Nine field campaigns were carried out with the SPECTRON SE-590 spectroradiometer. Bands TM₃ e TM₄ were simulated from the determined reflectance factors and, with these bands, vegetation indices were generated. According to the results, it was concluded that the variation on acquisition time did not lead to a significant variation on the reflectance factors in the TM₃ and TM₄ bands. On the other hand, the variation in the viewing angle significantly affected ($p \leq 0,05$) the reflectance factor in the TM₃ and TM₄ bands, for every day of measurement. Regarding the relationships between LAI and NDVI, the linear model showed the best fit ($p \leq 0,05$).

Keywords: Remote sensing; Spectroradiometry; Spectral behavior

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de obtenção de produtividades cada vez maiores, o sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta indispensável para a agricultura. Os dados obtidos a partir de sensores remotos orbitais têm sido utilizados, não só para auxiliar na identificação e mapeamento de áreas agrícolas, mas, também, em sistemas de previsão de safras, gerando resultados bastante próximos da realidade.

A variável produtividade é a mais difícil de ser estimada, pois depende de vários fatores ambientais aliando às características intrínsecas da cultura, tais como: cultivar, temperatura, radiação, água no solo, fertilidade, pragas e doenças, tratos culturais, densidade de plantio, época de plantio etc. Entretanto, acredita-se que estas estimativas podem ser melhoradas com a introdução de dados de sensoriamento remoto, uma vez que, nesses dados, a resposta espectral das culturas agrícolas é resultado do efeito conjugado de todos estes fatores.

No entanto, o emprego de imagens de satélites na estimativa da produtividade das culturas, mostra-se ainda sujeito a uma série de erros amostrais, tendo como causa principal a complexidade do comportamento espectral do dossel agrícola.

O estudo do comportamento espectral de plantas por meio da radiometria de campo pode contribuir para uma melhor compreensão das variações observadas nas imagens de satélites, contribuindo para a obtenção de uma maior precisão nos modelos gerados pelo sensoriamento remoto, quando utilizados na estimativa e análise de variáveis agronômicas.

É importante entender a relação existente entre as características agronômicas das culturas e a sua resposta espectral. Considerando dois comprimentos de onda altamente correlacionados com a vegetação (vermelho e infravermelho próximo), podemos calcular os “índices de vegetação”, a partir das respostas espectrais dos dosséis. Agrícolas.

Além de entender a relação existente entre características do dossel e índices de vegetação, faz-se necessário conhecer a estabilidade desses índices, quanto às condições de iluminação e detecção do alvo. Os alvos agrícolas, em especial, são vistos sob condições particulares de iluminação e detecção, onde a reflectância mostra-se altamente dependente das posições do Sol e do sensor.

Como os sensores a bordo de satélites podem adquirir imagens sob diferentes ângulos de visada e em diferentes horários, torna-se necessário o conhecimento do efeito dessas variáveis

sobre a resposta espectral das culturas. Tem-se como exemplo, os sensores HRV/SPOT ($\pm 27^\circ$ perpendicular à trajetória), o sensor AVHRR/NOAA ($\pm 56^\circ$ perpendicular à trajetória) e o sensor CCD/CBERS ($\pm 32^\circ$ perpendicular à trajetória), podendo coletar informações de alvos da superfície terrestre com o apontamento do coletor fora da posição perpendicular à linha de deslocamento do satélite (*off-nadir*).

A radiometria de campo permite maior controle das condições do alvo, sendo uma técnica precisa para estudo das relações dos parâmetros espectrais e as informações sobre o alvo, proporcionando melhor entendimento da radiação em cena. Assim, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência de três horários de medição (10 horas, 12 horas e 14 horas), o que implica em diferentes ângulos de elevação solar, ângulos de visada (0° , 30° e 45°), na resposta espectral da cultura de feijão, como também, nas relações entre o índice de área foliar (IAF) e o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sensoriamento remoto

Sensoriamento remoto pode ser definido como a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos para transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações (NOVO, 1992).

Para Crepani (1993), o sensoriamento remoto é a ciência e a arte de se obter informações sobre um determinado objeto, área ou fenômeno, por meio de dados coletados por um equipamento, que não entra em contato direto com o objeto, área ou fenômeno estudado.

Atualmente os satélites de observação da Terra possuem sensores de bandas largas como Enhanced Thematic Mapper (ETM+), Thematic Mapper (TM) e o Multispectral Scanner (MSS) da série LANDSAT, o High Resolution Visible (HRV) do SPOT ($\pm 27^\circ$ perpendicular à trajetória), o Linear Imaging Self-Scanning (LISS) do Indian Remote Sensing (IRS). Segundo Thenkabail; Smith e Pauw (2002), existem limitações por parte dos sensores em proporcionar dados precisos de características biofísicas, identificação de espécies vegetais e produtividade das culturas.

Com o desenvolvimento de sensores orbitais, especialmente desenhados para aplicações agrícolas, sugere-se que o método seja utilizado mais extensivamente (STAFFORD, 2000). O autor ressalta, ainda, que a resolução espacial deve ser a melhor possível (da ordem de 1 metro) e que, a frequência ideal de passagens de um sensor orbital deve ser suficiente para acompanhar a evolução da cultura durante o ciclo anual de produção. Huete (1997) verificou que sensores terrestres proporcionam informações básicas para a calibração e entendimento de dados orbitais.

As aplicações do sensoriamento remoto na agricultura têm apresentado resultado satisfatório em muitas pesquisas realizadas nesta área. Novo (1992) cita algumas destas aplicações: a) avaliação de recursos hídricos; b) mapeamento e análise do uso da terra; c) aspectos ligados à agricultura, tais como: levantamento e caracterização de solos, previsão de safras, identificação de culturas e área ocupada por estas, monitoramento da vegetação tendo como objetivo avaliar as áreas degradadas, levantamento de danos causados por estresse hídrico,

geadas, incidência de pragas, deficiência de nutrientes etc.

O sensoriamento remoto parte do princípio que cada objeto tem uma característica única de reflexão e emissão de energia eletromagnética. Com isso, pode-se identificar e entender o objeto ou condições ambientais através dessa unicidade de comportamento. Portanto, dois objetos diferentes, interagirão distintamente com a energia eletromagnética, pelo menos em alguns comprimentos de onda, permitindo assim sua identificação e diferenciação (NOVO, 1992).

Para Clevers (1999), o índice de área foliar está diretamente relacionado com a produção agrícola e constitui uma das principais variáveis de modelos de produtividade das culturas. Sendo assim, a potencialidade do uso do sensoriamento remoto, em áreas agrícolas, pode ser demonstrada pela estimativa de características das culturas, como o índice de área foliar e a cobertura do solo.

2.2 Radiometria

A radiometria é a mensuração da energia eletromagnética refletida ou emitida por um objeto em um determinado intervalo de comprimento de onda. Os sistemas que medem essas quantidades de energia são denominados radiômetros, os quais são capazes de mensurar alguns parâmetros na radiometria chamados de grandezas radiométricas.

Steffen e Moraes (1993), citam que a Energia radiante (Q) é a mais fundamental das grandezas radiométricas, cuja unidade é o Joule (J) e é a partir dela que todas as outras grandezas são calculadas, tais como: Fluxo radiante (ϕ), Irradiância (E), Radiância (L), Exitância (M) e Intensidade radiante (I).

Para Moreira (1997), as três grandezas radiométricas mais usadas neste tipo de levantamento, podem ser definidas como: a) Fluxo radiante (ϕ) que é a quantidade de energia radiante que passa por uma posição do espaço na unidade de tempo, dada em Joule/segundo (Js^{-1}) ou Watt (W); b) Irradiância (E) que é a razão entre o fluxo radiante que incide numa amostra da superfície e a sua respectiva área (Wm^{-2}); c) Radiância (L): é a razão entre o fluxo radiante refletido (ou emitido) por unidade de área projetada e por unidade de ângulo sólido na direção considerada (Wm^{-2}sr). A radiância é uma grandeza direcional e corresponde à sensação visual de brilho da amostra de superfície, e se ela não varia com a direção, a superfície é um difusor perfeito (Lambertiana).

Moreira (1997) afirma ainda, que aproveitando os conceitos de grandeza radiométrica, pode-se determinar também uma grandeza adimensional denominada reflectância, que é a razão entre o fluxo de energia incidente sobre uma superfície e o fluxo de energia refletido pela superfície, apresentando valores compreendidos entre 0 e 1. Como a reflectância é a razão entre a radiância e a irradiância, não pode ser medida diretamente, assim sendo é expressa em termos de radiância, podendo assim, ser medida por um radiômetro .

Conforme Steffen (1996b), para se medir a reflectância na prática, utiliza-se do conceito de superfície perfeitamente difusa. Superfície esta com reflectância unitária e que reflete uma radiância constante independente do ângulo de visada. Utiliza-se para simular tal superfície uma placa de referência recoberta com Sulfato de Bário ($BaSO_4$) ou Óxido de Magnésio (MgO) e calibrada com relação a um determinado padrão de laboratório de reflectância conhecida. Dessa forma, utiliza-se um radiômetro e mede-se a radiância dessa superfície padrão e, em seguida, a de um alvo em estudo, calculando-se assim o Fator de Reflectância (Bidirecional), que é a razão entre a radiância refletida do alvo em estudo e a radiância refletida da placa de referência (suposta superfície completamente difusora), nas mesmas condições de iluminação.

2.2.1 Radiometria de campo

Uma importante técnica utilizada na agricultura é a espectrorradiometria, pois permite obter medidas ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas, sob condições mais favoráveis, em termos de influência atmosférica, do que os dados coletados por sensores remotos a bordo de satélites (DEERING, 1980).

Ainda segundo Deering (1980), a radiometria ou espectrorradiometria de campo pode ser definida como uma técnica de sensoriamento remoto utilizada para medir a radiação solar refletida de objetos na superfície terrestre, em determinadas faixas ou bandas espectrais. Por utilizar a radiação solar como fonte de energia, a mesma é dita passiva. Para Milton (1987), esta técnica é de fundamental importância para o sensoriamento remoto, tanto para utilização em pesquisa básica como para aplicações operacionais.

A radiometria atua no mínimo em três áreas do sensoriamento remoto: a) agindo como ligação entre as medidas de laboratório e condição de campo, dessa forma, útil na calibração de sensores orbitais e aerotransportados; b) útil na predição de bandas espectrais ótimas e na

configuração de visada e horário para realizar uma tarefa particular de sensoriamento remoto, e, c) importante ferramenta para o desenvolvimento, refinamento e teste de modelos, relacionando atributos biofísicos para os dados obtidos por sensores remotos (MILTON, 1987).

Para Novo (1992), os espectrorradiômetros operam em faixas espectrais estreitas, o que permitem a obtenção de curvas espectrais com grande número de informações. O sistema de dispersão usado por estes, decompõe a radiação incidente em diferentes comprimentos de ondas, de tal forma que se pode medir a resposta do alvo quase de maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético.

As medidas radiométricas coletadas no campo são essenciais e apresentam algumas vantagens como: a) influência mínima da atmosfera, pois os dados são obtidos próximo à superfície; b) os espectrorradiômetros são sensores que geralmente possuem um número maior de bandas espectrais (alta resolução espectral) do que os sensores a bordo de satélite ou de aeronaves; c) pode-se controlar melhor a relação entre as medidas espectrais e os parâmetros biofísicos devido à proximidade do alvo-sensor, e; d) maior facilidade para delinear experimentos em campo, além de possibilitar um maior número de medidas ao longo do ciclo da cultura (EPIPHANIO, 1989).

Para definir o sistema a ser utilizado para coletar medidas radiométricas de campo, devem-se considerar as características dos espectros que se deseja obter: a) resolução e intervalo espectrais das medidas; b) campo de visada necessário para a amostragem, e; c) acessibilidade das amostras. Para satisfazer estas características é recomendada a utilização de equipamentos que possuam peso e volume reduzidos, suprimento de energia por bateria recarregável, unidade detectora separada da unidade controladora, sistema de armazenamento de dados, curto tempo de aquisição dos dados e programa para manipulação dos dados coletados (STEFFEN, 1996a).

Os equipamentos empregados para medir a radiação solar refletida dos alvos (reflectância), podem ser classificados em duas categorias: a) radiômetros de banda, que produzem informações sobre a resposta do alvo em faixas largas do espectro, ou seja, operam em número limitado de bandas espectrais, e; b) espectrorradiômetro, que operam em faixas espectrais estreitas (de forma contínua) e possuem sistema de dispersão, que decompõe a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda, como o SPECTRON SE-590 (MILTON, 1987).

2.3 Comportamento espectral de alvos agrícolas

A medida dos valores de reflectância de um corpo ou alvo ao longo do espectro eletromagnético é definida como o seu comportamento espectral. Para Sabins Júnior (1987), os alvos agrícolas, em geral, devido a sua composição química, física e biológica, apresentam respostas espectrais características e distintas.

A interpretação do comportamento espectral de objetos terrestres é muito importante para a definição de novos sensores orbitais, portanto, os estudos desenvolvidos em nível de campo e laboratório são essenciais, tornando possível definir as condições de iluminação e observação (BOWKER; DAVIS e MYRIK, 1985).

Segundo Moreira (1997), a maneira como a planta é vista, seja pelo olho humano ou através de sensor multiespectral, depende fundamentalmente da interação da energia eletromagnética com a mesma. O dossel vegetativo é constituído de folhas, caules, flores etc, porém as folhas são as que têm maior importância na interação do fluxo radiante com a vegetação, tendo em vista que são nelas que se realiza quase toda a fotossíntese, responsável pela conversão da energia solar em energia química para a produção de carboidratos. Para o autor, como a folha é o principal elemento de captação da radiação solar, observa-se uma predominância de área foliar quando comparada à área de outros componentes da planta. Esta predominância é tão marcante que normalmente outros órgãos que também podem realizar fotossíntese, são desprezados pelo sensoriamento remoto. As folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado pelos sensores óticos (COWELL, 1974), sendo as propriedades espectrais de uma única folha, função de sua composição química, morfológica e estrutural.

Para Moraes (1996), quando se trata das possíveis trajetórias da radiação incidente na folha, uma pequena quantidade de radiação é refletida das células da camada superficial. A maior parte é transmitida para o mesófilo esponjoso, onde os raios incidem frequentemente nas paredes celulares, sendo refletidos, se os ângulos de incidência forem suficientemente grandes. Esta múltipla reflexão é aleatória, no qual os componentes do fluxo mudam de direção dentro da folha. Por existir um grande número de paredes celulares na folha, alguns componentes são refletidos de volta para o hemisfério de incidência, enquanto outros são transmitidos através da folha.

Formaggio (1989), estudando o comportamento espectral de culturas agrícolas de ciclo

curto, observou que há uma variação da quantidade de material vegetal contido no dossel da plantação durante o ciclo. A extensão do ciclo de uma cultura anual pode ser subdividida em três fases, fenologicamente, distintas: a) primeira fase: predominância do solo nas interações com a radiação eletromagnética. Envolve o plantio, a germinação e o desenvolvimento inicial em que a cultura não recobre totalmente a superfície do solo; b) segunda fase: predominância da cobertura verde nas interações da cultura com a radiação eletromagnética, onde o dossel da cultura já se “fechou” até o florescimento e a formação de grãos, e; c) terceira fase: destaca-se a maturação e a senescência, onde ocorre o secamento e a queda das folhas, ocorrendo o domínio conjugado da vegetação seca e do solo exposto. Ainda para o autor, entre os fatores que influenciam a resposta espectral dos dosséis vegetais de culturas agrícolas estão: o solo, a estrutura dos dosséis (densidade de plantio e arquitetura das plantas) e aspectos de geometria de iluminação e de visada de cena.

O comportamento espectral da vegetação ou dossel vegetativo se manifesta de forma distinta em três regiões espectrais, que são as regiões do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio. A Figura 1 mostra as principais características da resposta espectral das folhas verdes nessas três regiões.

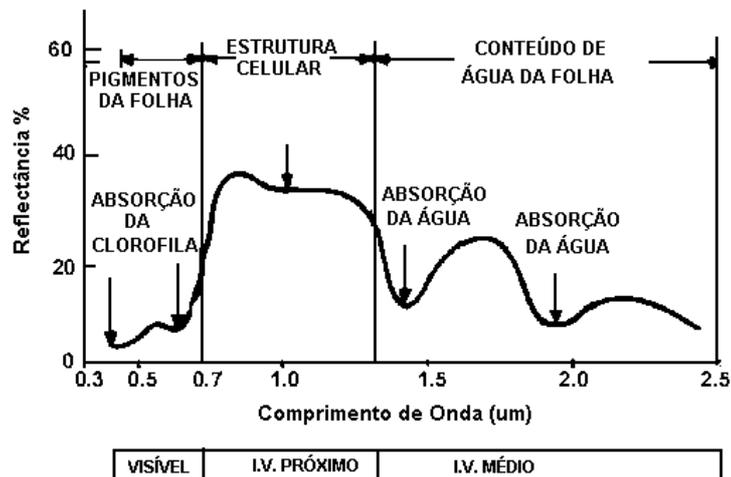


Figura 1 - Curva média de reflectância da vegetação fotossinteticamente ativa. Fonte: Novo (1992)

Com o objetivo de avaliar a correlação entre variáveis agrônomicas e variáveis espectrais, Formaggio (1989) desenvolveu uma pesquisa na região de Guaíra, SP, com as culturas de trigo e feijão, utilizando como variáveis espectrais, os valores de reflectância das seis bandas

refletidas do sensor TM/LANDSAT-5 e, também, três índices de vegetação: a Razão Simples (RS), a Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Transformada (VT). O autor concluiu que existe relação significativa entre características agronômicas e respostas espectrais. Os três índices de vegetação utilizados e as bandas infravermelha e vermelha podem ser considerados ótimos descritores das condições das culturas utilizadas. As curvas obtidas a partir das bandas TM_3 e TM_4 , permitem avaliar o comportamento espectral em todas as fases de desenvolvimento do feijão.

Epiphonio (1988), trabalhando na região de Guaíra, SP, com dados provenientes do sensor TM/LANDSAT-5 e, analisando o comportamento espectral das culturas do trigo e feijão, afirmou que: a) a cultura do feijão apresenta comportamento espectral típico de vegetação, entre 40 e 50 dias após a semeadura; b) a banda TM_4 foi a que se mostrou mais eficiente para as correlações determinadas, embora tenha apresentado baixa utilidade na diferenciação das culturas do feijão e do trigo; c) o trigo apresentou comportamento espectral típico de vegetação bem antes do que o feijão; d) a banda TM_7 apresentou maior poder de discriminação entre o trigo e o feijão e, para tal análise, a transformação de nível de cinza em reflectância, é ineficaz; e) em geral, maiores correlações entre parâmetros de sensoriamento remoto e parâmetros de cultura (índice de área foliar e percentagem de cobertura do solo), ocorrem para a cultura do feijão e, para tais correlações, a banda TM_4 e a razão TM_5 / TM_7 , apresentaram maior destaque.

Formaggio e Epiphonio (1990a), estudando a cultura do feijão em áreas situadas no nordeste do Estado de São Paulo, com o objetivo de trazer subsídios e fundamentações ao entendimento dos relacionamentos existentes entre variáveis espectrais (as seis bandas refletivas TM/Landsat-5 e os índices de vegetação Razão Simples e Diferença Normalizada) e variáveis agronômicas para o feijão, concluíram que as variações do índice de área foliar, fitomassa e porcentagem de cobertura vegetal, mostraram-se excelentes descritoras das condições gerais de vigor do feijão, principalmente nas fases pré-senescência.

Visando testar a aplicação de imagens digitais do satélite SPOT e dados radiométricos, coletados em campo, no cadastramento de lavouras irrigadas de feijão carioca, Silva e Vettorazzi (1997) concluíram que: a) a correlação entre os dados de níveis de cinza extraídos de imagens do satélite Spot e da radiometria de campo não foi satisfatória; b) os dados de radiometria de campo foram mais sensíveis às variações dos fatores fitotécnicos que os dados obtidos a partir das imagens; c) o levantamento e acompanhamento das áreas agrícolas irrigadas pode ser feito, com

sucesso, empregando sensoriamento remoto orbital; d) o cadastramento e identificação de culturas de ciclo anual, exploradas em áreas agrícolas irrigadas, exige serviços de apoio de campo periódico.

Formaggio e Epiphonio (1988) afirmaram que o conhecimento das relações existentes entre os parâmetros físicos das culturas (IAF, fitomassa, cobertura do solo e vigor vegetativo) e seu comportamento espectral é um passo importante para se avaliar o desempenho e desenvolvimento das culturas, utilizando modelos de dados de sensoriamento remoto como os índices de vegetação.

Thenkabail; Smith e Pauw (2002) citaram que vegetais de arquitetura foliar planófila, como as leguminosas, contribuem, significativamente, em maior reflectância no infravermelho próximo e maior absorvância no vermelho visível em relação a vegetais de arquitetura erectófila, como as gramíneas.

A energia refletida pelos alvos terrestres representa a média da energia refletida por todos os elementos que estão na superfície, de forma que, se as culturas não estiverem cobrindo totalmente a superfície, maior será a contribuição do solo como parte constituinte na radiância detectada pelo sensor (RONDEAUX; STEVEN; BARET, 1996; TODD; ROFFER, 1998).

Portanto, em se tratando de comportamento espectral, ou seja, da reflectância das culturas durante a fase de desenvolvimento vegetativo, o dossel é considerado incompleto, pois sua cobertura vegetal é inferior a 100%, deixando o solo mais exposto e apresentando uma mistura de resposta espectral da parte aérea da planta e do solo, onde a cultura foi instalada. Quando a cultura atinge seu desenvolvimento máximo, com 100% de cobertura, o dossel é definido como sendo completo.

2.3.1 Região do visível

A região do visível do espectro eletromagnético compreende toda radiação eletromagnética da faixa espectral de 400 nm a 700 nm e pode ser percebida pelo sistema visual humano. Esta radiação é também aquela em que os pigmentos das folhas dos vegetais absorvem para realizar a fotossíntese e para serem utilizadas em outros processos bioquímicos da planta. Essa faixa de radiação solar é denominada de radiação fotossinteticamente ativa (Photosynthetically Active Radiation –“PAR”), sendo que a maior parte desta radiação que incide

sobre o dossel vegetativo é absorvida no mesófilo das folhas, pelos pigmentos fotossintetizantes existentes nos cloroplastos, predominantemente as clorofilas a e b. Os carotenóides, as xantofilas e antocianinas contribuem em menor intensidade nessa absorção (Moreira, 2005).

Para Moraes (1996), na região do visível, os pigmentos existentes nas folhas dominam a assinatura espectral. Esses pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%), sendo que esses valores variam de espécie para espécie.

A faixa do visível (400 nm a 700 nm) compõe-se das cores azul, verde e vermelho, sendo que essa faixa se caracteriza pela baixa reflectância e alta absorvância atribuídas à presença de pigmentos carotenóides e xantofílicos. Verifica-se, porém, aumento de reflectância nas regiões medianas do visível (550 nm) em decorrência da menor absorção de radiação, refletindo o verde (SILVA, 1995).

Segundo Novo (1992), até 700 nm a reflectância é baixa (< que 20%), dominando a absorção da radiação incidente pelos pigmentos das plantas em 480 nm (carotenóides) e em 620 nm (clorofila). Em 560 nm, há um pequeno aumento do coeficiente de reflectância, não atingindo, porém, níveis superiores a 10% que é a reflectância responsável pela percepção da cor verde da vegetação.

2.3.2 Região do infravermelho próximo

A região do infravermelho próximo é constituída de radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda situam-se entre 700 nm e 1300 nm. Nesta região, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é denominado pelas propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas. Além disso, há uma contribuição indireta do conteúdo de água da folha (MOREIRA, 2005). Com isso, a radiação incidente, ao interagir com uma vegetação sadia, apresenta uma maior percentagem de energia refletida e transmitida e menor percentagem de radiação absorvida, quando comparada com a região do visível.

De acordo com Formaggio (1989), na região do infravermelho próximo, as folhas verdes sadias apresentam altos valores de reflectância (45-50%), alta transmitância (45-50%) e baixa absorvância (menor que 5%). Essa elevada reflexão de energia, na região do infravermelho

próximo, é atribuída à estrutura interna das folhas.

Silva (1995), afirmou que na faixa do infravermelho próximo, a maior porcentagem de energia refletida e transmitida deve-se à estrutura interna da folha, isto é, as radiações ao incidirem na estrutura foliar, são espalhadas pela cutícula e epiderme para as células do mesófilo e cavidades de ar, onde sofrem novo espalhamento seguido de reflexões e refrações múltiplas. Como as estruturas internas das folhas variam de uma espécie vegetal para outra, para o autor, isso explica a razão da maior reflectância, normalmente observada no infravermelho, quando comparada com a região do visível, sendo esta faixa de comprimento de onda mais indicado para identificação de culturas.

2.3.3 Fatores que afetam as propriedades ópticas da folha

São vários os fatores que podem afetar as propriedades ópticas da folha, entre esses podem ser citados:

a) Estrutura anatômica da folha: a reflectância no infravermelho próximo é geralmente afetada pela estrutura anatômica das folhas e depende dos estratos celulares, do tamanho das células e da espessura do mesófilo esponjoso. Assim, as folhas de dicotiledôneas possuem reflectância maior do que as de monocotiledôneas para uma mesma espessura, porque as primeiras têm um mesófilo esponjoso mais desenvolvido (GUYOT, 1990).

b) Idade das folhas: as propriedades ópticas das folhas mudam de acordo com a sua fase de desenvolvimento. Assim sendo, na maturação, ocorre um decréscimo da reflectância na região do visível e um aumento na região do infravermelho próximo, devido à existência de um maior número de espaços aéreos intercelulares no mesófilo das folhas maduras. No início da senescência, e em razão da degradação das clorofilas, ocorre uma menor absorção da radiação solar e, conseqüente aumento da reflectância na região do visível. Posteriormente, com o avanço gradativo da senescência, observa-se a degradação dos carotenos e morte das células. Nessa fase, ocorre um aumento dos espaços aéreos intercelulares das folhas, e conseqüente aumento da reflectância no infravermelho próximo (MOREIRA, 1997), como pode ser observado na Figura 2.

c) Nutrientes: sabe-se que a deficiência de nutrientes no vegetal afeta de forma significativa às

propriedades ópticas das folhas. A deficiência de nitrogênio provoca clorose, a qual é responsável pelo aumento da reflectância na região do visível, devido ao decréscimo do conteúdo de clorofila e da reflectância na região do infravermelho próximo (THOMAS; OERTHER, 1972). Alguns trabalhos ainda mostram a influência da deficiência de outros nutrientes como o fósforo, potássio, enxofre, magnésio e cálcio, na redução da concentração de clorofila da folha e conseqüente redução da absorvância e aumento da reflectância na faixa do visível.

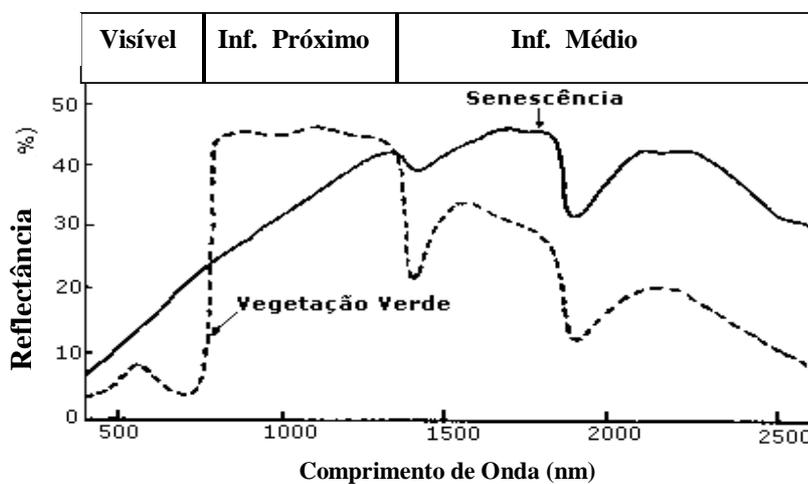


Figura 2 - Curvas de reflectância espectral de uma folha, obtidas durante a fase de crescimento vegetativo e durante a senescência. Fonte: Guyot (1990), citado por Moreira (1997)

d) Doenças e pragas: alguns fungos e insetos podem influenciar a assinatura espectral de folhas infestadas por estes. Em relação aos fungos, Moraes (1996) citou em seu trabalho que alguns autores verificaram que a reflectância nas folhas doentes era maior do que nas sadias, na região do visível, o que provavelmente poderia ser explicado pela perda de clorofila. Contudo, ela era menor na região do infravermelho próximo, o que também pode ser explicado pela invasão das hifas nos espaços intercelulares.

e) Conteúdo de água na folha: na região do infravermelho próximo, a absorção da água é geralmente baixa e a assinatura espectral é quase constante. Gates (1980), afirmou que a assinatura espectral de folhas nessa região é o resultado da interação entre a energia incidente e o mesófilo, assim, fatores externos a folha, como disponibilidade de água, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região.

2.3.4 Fatores que influenciam na resposta espectral de dosséis agrícolas

A complexidade de alvos agrícolas é atribuída ao fator de reflectância bidirecional ser uma função de muitas variáveis, como a orientação de fileiras, ângulo zenital e azimutal do sol, características do solo (umidade e rugosidade), estágio de desenvolvimento das culturas e espécie de plantas, ângulos foliares e vigor vegetativo (KIMES; HOLBEN; TUCKER, 1984b; JACKSON; PINTER JR; IDSO, 1979a).

Algumas culturas, como citros e café, por exemplo, apresentam dosséis incompletos mesmo em condições de máximo desenvolvimento, causando no campo de visada do sensor quatro componentes em diferentes propriedades de reflectância, sendo: a) vegetação iluminada, b) solo iluminado, c) solo sombreado e, d) vegetação sombreada. (RICHARDSON et al., 1975; JACKSON et al.; 1979b; JACKSON; PINTER JR; IDSO, 1979a; KOLLENKARK et al., 1982).

A proporção relativa desses quatro componentes varia com a cobertura vegetal, orientação e espaçamento das fileiras, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõem o dossel, diâmetro da copa e altura da planta, teor de água na planta e no solo, condições fitossanitárias, ângulo zenital e azimutal do sol, latitude e tamanho do elemento de resolução do equipamento utilizado (KOLLENKARK et al., 1982).

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

Segundo os autores Jackson; Pinter e Idso (1979a); Kollernkark et al. (1982); Lorde; Desjardins e Dube (1988), o valor máximo do fator de reflectância na região do visível ocorre ao meio dia solar ou para azimutes próximos de zero grau, situação em que as entrelinhas encontram-se totalmente iluminadas. Todos os autores encontraram baixa variação no valor do fator de reflectância, em função da mudança dos ângulos solares, para a região do infravermelho próximo, uma vez que a transmitância nessa faixa é alta, ocorrendo assim um menor efeito de sombreamento.

Na região do infravermelho próximo, o sombreamento não é tão pronunciado como na região do visível, devido ao múltiplo espalhamento e a baixa absorção por pigmentos nesta faixa de espectro (COWELL, 1974; DAUGHTRY; VANDERBITT; POLLARA, 1982).

Para Jackson; Pinter e Idso (1979a), quando os dados são adquiridos sob baixos ângulos

de elevação solar, existe um aumento da reflectância na região do infravermelho próximo. Segundo os autores, à baixos ângulos de elevação solar, a radiação entra no dossel de maneira que numerosas folhas são iluminadas, aumentando assim a reflectância.

Para Lorde; Desjardins e Dube (1988), com o aumento do ângulo zenital solar, os raios solares incidentes atingem um maior número de folhas. Jackson; Pinter e Idso (1979a), utilizando a cultura do trigo, Lorde; Desjardins e Dube (1988) com trigo, girassol e cevada observaram esse mesmo acontecimento. Entretanto, Kollenkark et al. (1982) utilizando a cultura da soja, observaram um pequeno aumento do fator de reflectância no infravermelho próximo, com a diminuição do ângulo zenital solar.

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

A parte superior do dossel causa um sombreamento em suas camadas inferiores. Esse sombreamento é mais intenso quando a posição do Sol está mais próxima ao horizonte, do que ao zênite. Portanto, a reflectância aumenta com o incremento do ângulo zenital de visada, uma vez que no campo de visada do sensor, tem-se uma maior proporção de componentes superiores do dossel mais iluminado e, conseqüentemente, diminui a proporção dos componentes inferiores do dossel que possuem maior grau de sombreamento.

Pesquisando a influência do solo de fundo e da geometria da radiação na resposta espectral da cultura do feijão, Gleriani (1994) concluiu que os solos influenciaram de forma significativa os três índices de vegetação, em todas as fases da cultura. A variação do ângulo zenital de visada não trouxe variação significativa e o horário de medição é uma fonte significativa de variação sobre os índices de vegetação, exceto quando a cobertura vegetal é de 100% (cobertura completa). Quanto a relação entre parâmetros agrônômicos e índices vegetativos, o NDVI apresentou o melhor coeficiente de variação, sendo o índice que melhor estimou o índice de área foliar.

2.4 Índices de vegetação

O sensoriamento remoto tem se mostrado uma fonte importante de dados para estudos da vegetação. Entre outras aplicações do sensoriamento remoto, encontra-se o uso dos índices de

vegetação. Estes foram desenvolvidos para avaliar coberturas vegetais, quantitativa e qualitativamente, utilizando-se dados espectrais (HUETE, 1988; JACKSON; HUETE, 1991). Estes índices têm sido utilizados, com sucesso, no monitoramento e estudo temporal das mudanças na vegetação, em escala regional, continental e global (BANNARI et al., 1995; MORAN; INQUE; BARNES, 1997; RONDEAUX; STEVEN; BARET, 1996). O sucesso desta técnica deve-se à reflectância diferencial da clorofila, nos comprimentos de onda do visível (400 nm a 740 nm) e infravermelho (740 nm a 1400 nm).

Para Gitelson et al. (2002), índices de vegetação são obtidos pela soma, diferença, razão ou qualquer combinação linear, da reflectância ou radiância, de dois ou mais intervalos de comprimento de onda. Foram desenvolvidos com o objetivo de diferenciar o substrato da vegetação, que interferem no comportamento espectral das culturas, e fornecer um valor numérico que possa ser relacionado com vários parâmetros da planta.

Segundo alguns autores, a maioria dos índices de vegetação fornece a mesma informação, sendo funcionalmente equivalentes, do ponto de vista matemático, ou seja, contém o mesmo tipo de informações sobre parâmetros biofísicos das culturas (RICHARDSON; WIEGAND, 1977).

Os satélites de sensoriamento remoto passam pelo mesmo local na superfície da Terra, em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Portanto, podem obter-se imagens em diferentes períodos ao longo da vida útil do instrumento. Os índices de vegetação têm sido utilizados para estudos da variação temporal da cobertura vegetal (MESQUITA JR, 2003) e para outros processos que requeiram análises multitemporais da vegetação, como por exemplo, o acompanhamento do ciclo de culturas agrícolas.

Segundo Ponzoni (2001), os índices de vegetação servem como indicadores do crescimento e vigor da vegetação, e podem ser utilizados para diagnosticar vários parâmetros biofísicos com os quais apresentam altas correlações, incluindo índice de área foliar, biomassa, porcentagem de cobertura no solo, atividade fotossintética e produtividade.

Os dados do LANDSAT, quando transformados em índices de vegetação, podem ser usados para expressar o efeito conjunto de vários fatores de produtividade de culturas (RUDORFF, 1985).

Os índices mais comuns são aqueles provenientes de medidas da reflectância de dosséis de vegetação, nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro

eletromagnético. Meneses e Madeira Neto (2001) relataram que na faixa espectral correspondente ao vermelho, a reflectância apresenta uma relação inversa e não-linear com a produção de fitomassa verde, enquanto que no infravermelho próximo, a reflectância apresenta uma relação não-linear, porém direta.

De acordo com Baret; Guyot e Major (1989), a maioria dos índices de vegetação são obtidos a partir de medidas do fator de reflectância sobre dosséis agrícolas, nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo. Há duas razões básicas para o uso destas duas faixas espectrais, primeiro é que estão presentes em quase todos os satélites meteorológicos e de recursos terrestres e, contêm mais de 90% da informação espectral da vegetação.

Como o índice de vegetação estudado é função do vermelho e do infravermelho próximo, este será afetado por outros fatores, além do IAF, entre eles: a) estrutura do dossel (altura da planta, distribuição do ângulo foliar etc.) (ASRAR; KANEMASU; YOSHIDA, 1985; MYNENI; NEMANI; RUNNING, 1997); b) geometria sol-sensor-alvo (DEERING; ECK; BANERJEE, 1999), c) substrato (HUETE, 1988) e; d) atmosfera (MYNENI; ASRAR, 1994).

Formaggio (1989) utilizou as bandas TM_1 a TM_5 e TM_7 para estudo em áreas agrícolas, na região Norte paulista, e concluiu que as bandas que contêm a maior quantidade de informações são as bandas TM_3 e TM_4 . Portanto, essas duas bandas podem ser consideradas suficientes para monitorar as culturas.

Para Wiegand; Richardson e Escobar (1991), a grande diferença entre a vegetação e os outros dois substratos (solo e água), ocorre pela alta absorção da radiação solar na faixa espectral do vermelho (600 nm a 700 nm) e a alta reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo (750 nm a 1350 nm).

Thenkabail; Smith e Pauw (2002) ressaltam que a influência do solo pode ser maior, dependendo da altura da cultura, e os dados de satélites se tornam incapazes de captar determinadas variações na vegetação.

Na radiometria de campo o efeito atmosférico existente é considerado desprezível, por isso, os índices de vegetação obtidos são mais preciosos. No entanto, esse mesmo efeito atmosférico deve ser considerado e corrigido, quando se utilizam índices de vegetação obtidos por dados provenientes de sensores a bordo de satélites.

De acordo com Elvidge e Chen (1995), o Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI) é o índice mais utilizado na determinação dos parâmetros biofísicos da vegetação, o qual

é definido pela eq. (1):

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (1)$$

sendo:

ρ_{IVP} - fator de reflectância obtido na faixa espectral do infravermelho-próximo

ρ_V - fator de reflectância obtido na faixa espectral do vermelho

Pastagens e áreas vegetadas que apresentam um dossel contínuo, porém pouco volumoso e com marcada sazonalidade, são alvos particularmente adequados para serem monitorados através de imagens que espacializam e quantificam este índice (NDVI).

Diversos estudos mostraram a correlação do NDVI com parâmetros biofísicos da vegetação, como por exemplo, a estimativa do índice de área foliar (ASRAR et al., 1984; XAVIER, 2002) a estimativa de biomassa (HATFIEL et al., 1985; BROGE e LEBLANC, 2001 e BOEGH et al., 2002) e, também, para estimar a produtividade (ASRAR et al., 1984).

Para Bauer; Daughtry e Vanderbitt (1981), há três fases bem distintas em toda cultura de ciclo anual, quanto ao padrão geral do comportamento espectral. Na fase inicial do desenvolvimento da cultura existe uma influência muito grande do solo, depois há uma resposta espectral para a vegetação verde e no final do ciclo há uma resposta espectral de vegetação senescente (maturação, descoloração) e do solo.

Kimes et al. (1981), avaliando medidas de radiância com radiômetros de bandas similares ao TM/Landsat em dosséis de milho, afirmam que as variáveis agrônômicas que melhor relacionaram com as bandas do vermelho, infravermelho próximo e NDVI, foram: o índice de área foliar e a biomassa de folhas verdes.

Alguns fatores interferem nos valores de NDVI, entre eles destacam-se as variações nas propriedades da atmosfera (MIURA et al, 2001) nas propriedades e características do solo (GILABERT et al. 2002) na geometria de visada da plataforma onde se localiza o sensor e nas mudanças na geometria de iluminação, devidas à sazonalidade (HU et al. 2000), na quantidade hídrica da vegetação (CECCATO et al. 2002), na posição e na largura das faixas espectrais utilizadas (GALVÃO; VITORELLO; ALMEIDA FILHO, 1999; GALVÃO; VITORELLO; PIZARRO, 2000) e variações nos fatores biofísicos e bioquímicos (ASNER, 1998).

Ao analisar a relação NDVI-IAF para a cultura da soja, usando de modelos lineares de regressão, Holben (1980) observou boa correlação entre as variáveis ($r = 0,79$). Notou, ainda, que o NDVI aumentou mais rapidamente para menores valores de IAF, tendendo a se estabilizar para maiores valores deste índice. Tal comportamento foi ainda observado por outros autores, dentre eles Turner, Cohen e Kennedy (1999), que usando da regressão do tipo potencial, observaram, em vegetação de clima temperado, a saturação do índice NDVI, ocorrendo em IAF situado entre 3 e 5.

Xavier (2002) estudando a relação entre o IAF e os índices de vegetação RVI, NDVI e SAVI, em culturas estabelecidas numa área correspondente a microbacia rural do Ribeirão dos Marins, Piracicaba, SP, notou que o padrão geral das curvas obtidas, nas relações estudadas, foi similar, e que o modelo de regressão potencial foi aquele que obteve ajuste mais adequado às relações IAF-IVs. Observou, ainda, nas relações IAF-NDVI e IAF-SAVI, que os valores do NDVI e SAVI aumentaram mais rapidamente para menores valores de IAF, mas tenderam a se estabilizar para maiores valores deste índice. Os coeficientes de determinação encontrados das relações IAF-RVI, IAF-NDVI e IAF-SAVI foram de 0,70, 0,72 e 0,56, respectivamente, mostrando que o IAF apresentou melhor relação com o índice de vegetação NDVI.

Xavier (2002) concluiu, ainda, que o emprego do NDVI, como técnica de sensoriamento remoto, foi eficaz para mapear o IAF em nível regional, servindo como meio de entrada em modelos para cálculo regional da evapotranspiração.

Cunha (2004), analisando a relação NDVI-IAF para o Capim Tanzânia, utilizou modelos potenciais de regressão e observou aumento dos valores do NDVI na medida em que os valores do IAF foram acrescidos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado sob condições de campo, na área experimental de agricultura irrigada da Fazenda Areão (Figura 3), sob responsabilidade do Departamento de Engenharia Rural, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba, SP. A área situa-se a uma altitude de aproximadamente 576 m, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22° 42' 30" S e longitude 47° 38' 00" WGr. O experimento foi instalado em uma área de 0,46 ha, com declividade de 5%, desenvolvido no período de 14 de março a 27 de junho de 2005.

O clima, segundo classificação de Koeppen, é do tipo mesotérmico CWa, ou seja, subtropical úmido com estiagem no inverno, cujas chuvas do mês mais seco não atingem a 30 mm. A precipitação pluviométrica média é de 1.247 mm anuais, a temperatura média anual é de 21,1°C e a umidade relativa média anual é de 74%.



Figura 3 – Área experimental - Fazenda Areão, ESALQ/USP

3.2 Solo

O solo da área experimental foi classificado por Sparovek et al. (1993) como Terra Roxa Estruturada eutrófica, A moderado, textura argilosa, profundo e permeável, apresentando textura argilosa em todo perfil, com um incremento de argila no horizonte B. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido pela Embrapa, 1999, é classificado como um Nitossolo Vermelho eutrófico.

Para a caracterização química do solo foram coletadas amostras, cerca de dois meses antes da instalação do experimento, nas profundidades de 0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, cujos resultados são apresentados na Tabela 1. A análise química foi realizada no laboratório do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP. A análise consistiu na determinação dos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), pH, matéria orgânica, hidrogênio mais alumínio (H + Al), soma de bases (S), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V), conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas do solo da área de estudo

Profundidades m	pH CaCl ₂ -	P mg dm ⁻³	M.O. g dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmol _c dm ⁻³	SB	CTC	V %
0 -20	5,1	2	55	0,6	28	17	28	45,6	73,6	62
0 - 40	4,6	1	53	0,6	19	11	42	30,6	72,6	42

Para a caracterização física do solo foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0 – 0,20 m, 0,20 – 0,40 m e 0,40 – 0,60 m (Tabela 2). As determinações foram feitas pelo Laboratório de Física de Solos do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP.

Tabela 2 – Características físicas do solo da área de estudo

Profundidades m	CC cm ³ cm ⁻³	PMP cm ³ cm ⁻³	Densidade kg dm ⁻³	Argila	Silte g kg ⁻¹	Areia
0,00 - 0,20	0,4148	0,3472	1,49	624,0	172,0	204,0
0,20 - 0,40	0,4193	0,3491	1,46	694,3	138,3	167,4
0,40 - 0,60	0,4500	0,3808	1,43	688,9	136,3	174,8

3.3 Cultura do feijão, instalação e condução da cultura no campo

Neste experimento foi utilizado o cultivar de feijão Pérola (linhagem LR 720982 CPL53), tipo carioca, que é proveniente de seleção na cultivar Aporé, realizada pelo Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (Embrapa Arroz e Feijão). A escolha da cultivar foi baseada na sua alta produtividade e pouca incidência de pragas e doenças.

As características da cultivar são: hábito de crescimento indeterminado (entre os tipos II e III); porte semi-ereto; ciclo de 90 dias; média de 46 dias para floração; flor branca; vagem verde, levemente rosada, na maturação, e; vagem amarelo-areia na colheita.

Classificado no grupo comercial carioca, o grão da cultivar Pérola é de cor bege-clara, com rajas marrom-claras, brilho opaco e peso de 100 sementes em torno de 27 g. A qualidade do grão equipara-se a das cultivares Aporé e Carioca, especialmente quanto ao tempo de cozimento, conforme análise realizada pela Embrapa Arroz e Feijão. Vale destacar que esta cultivar, comparada às demais cultivares do mesmo grupo, produz grãos maiores, o que lhe confere excelente aspecto visual.

O preparo do solo constituiu de duas arações com grade aradora e uma gradagem com niveladora no dia 11/03/2005. De acordo com o resultado da análise de solo não foi necessária a realização de calagem para correção do pH. A adubação de semeadura foi feita com base na análise química do solo (Tabela 1), onde utilizou-se 200 kg de P_2O_5 , tendo como fonte o Superfosfato simples.

O plantio foi realizado mecanicamente no dia 14/03/2005, sendo adotado o espaçamento de 0,40 m entre linhas, profundidade de 0,03 m da superfície do solo e 10 plantas, aproximadamente, por metro linear.

Vinte e três dias após a semeadura foi realizada a primeira adubação em cobertura, com 60 kg ha^{-1} de K_2O e 20 kg ha^{-1} de nitrogênio, tendo como fonte o cloreto de potássio e o sulfato de amônio, respectivamente. Aos 46 dias do ciclo foi realizada a segunda adubação em cobertura, utilizando-se 40 kg ha^{-1} de nitrogênio e 40 kg ha^{-1} de K_2O , com as mesmas fontes da primeira adubação em cobertura.

Como controle fitossanitário preventivo, foi aplicado aos 17 dias após a semeadura, um inseticida à base de Deltamethrin. Nesta mesma data foram aplicados herbicidas pós-emergentes à base de Bentazon, Imazamox e Clethodim. Foram realizadas, ainda, duas capinas manuais ao

redor dos três pontos de coletas de dados com um raio de três metros de cada ponto, com o intuito de eliminar as plantas daninhas e evitar alterações nas leituras feitas pelo espectrorradiômetro.

A Tabela 3 mostra as etapas do ciclo do feijão, com as respectivas durações observadas durante o experimento e com a descrição de cada uma destas etapas, conforme menciona Getps e Fernandez (1982).

A colheita foi iniciada aos 98 dias após a semeadura, sendo realizada manualmente, e concluída aos 105 dias após a semeadura, devido à ocorrência de chuvas.

Tabela 3 - Etapas do ciclo do feijão (fenologia), com os respectivos intervalos de tempo observados no experimento

Etapa	Duração	Dias após semeadura.	Intervalo de tempo	Cod.	Fases
Semeadura (s)	-	-	14/03/2005	-	-
	7 dias	7 dias	14/03 a 21/03	Vo	Germinação
				V1	Emergência
				V2	Desdobramento das folhas 1 ^a
Desenvolvimento vegetativo	27 dias	34 dias	22/03 a 18/04	V3	Emissão da 1 ^a folha trifoliada
				V4	Emissão da 3 ^a folha trifoliada
				R5	Aparecimento dos 1 ^o botões florais
				R6	Abertura das 1 ^a flores
Desenvolvimento reprodutivo	36 dias	70 dias	19/04 a 25/05	R7	Início formação das vagens
				R8	Enchimento da 1 ^a vagem
	24 dias	92 dias	26/05 a 19/06	R9	Maturação
Colheita	-	105 dias	27/06	-	Colheita realizada aos 105 dias após a semeadura

3.4 Sistema e manejo da irrigação

A água utilizada para irrigação provinha de uma barragem próxima à área experimental. Sua aplicação foi realizada por um sistema de irrigação por aspersão, disposto no campo de forma fixa. A disposição dos equipamentos no campo pode ser vista no esquema representado pela Figura 4.

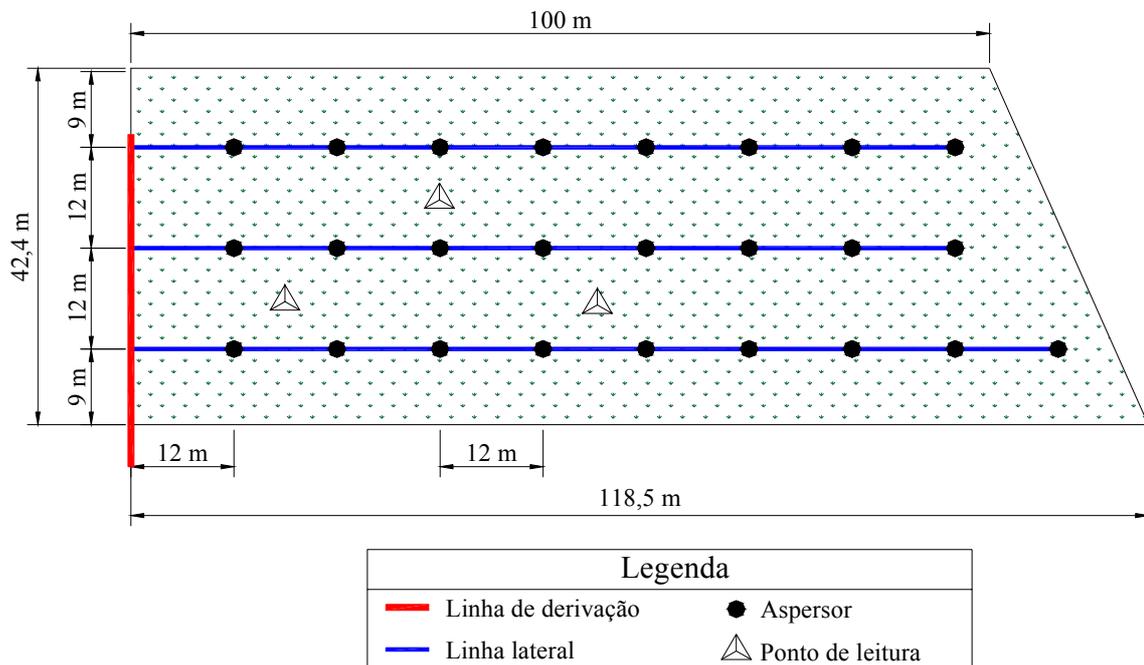


Figura 4 - Esquema do sistema de irrigação

Foram utilizados 25 aspersores de marca Agropolo, modelo NY-25, com diâmetro dos bocais de 3,50 mm x 2,50 mm. Optou-se por este aspersor, por apresentar eficiência em ensaios realizados no Laboratório de Irrigação e Drenagem da ESALQ/USP. Os aspersores, com espaçamento de 12,00 m entre si, operaram a uma pressão de 25 mca, produzindo um raio de 12,00 m e obtendo uma intensidade de aplicação de 6,80 mm h⁻¹.

O manejo da irrigação foi pela estimativa da evapotranspiração diária de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO). Os parâmetros climatológicos foram obtidos na estação agrometeorológica automatizada, distante 50 metros da área experimental. A partir de sensores acoplados a um datalogger CR-21X (Campbell), em conjunto a um conversor de sinal e transmissor/receptor de dados RF95 e UHF RECEIVER DL-3410, foi possível a coleta destas

informações pela comunicação dos sinais, via rádio, com o Laboratório de Aquisição de Dados, distante 2 Km.

A partir do coeficiente de cultivo do Feijão *Phaseolus* (Tabela 4), obteve-se a evapotranspiração da cultura. Para efeito da determinação da lâmina bruta, considerou-se a eficiência de irrigação de 80%.

O momento da irrigação foi indicado através de tensiômetros instalados às profundidades de 0,20, 0,30 e 0,40 m abaixo da superfície do solo.

Tabela 4 - Valores de coeficiente da cultura (Kc) de feijão para as condições brasileiras

Estádio fenológico (F.A.O) ¹	Termina quando há	Kc
I	10% do desenvolvimento vegetativo	0,3 a 0,4 ⁽²⁾
II	80% do desenvolvimento vegetativo	0,7 a 0,8 ⁽³⁾
III	Florescimento	1,05 a 1,20
IV	Ponto de maturidade fisiológica	0,65 a 0,75
V	Colheita	0,25 a 0,3

1 Descrição de fenologia de acordo com os critérios da F.A.O. (Food and Agricultural Organization)

2 Menores valores de Kc devem ser utilizados para umidade relativa superior a 70 % e velocidade do vento inferior a 5 m/s

3 Valores médios

3.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com três blocos (pontos de leitura), três tratamentos primários referentes aos horários de leitura (10 horas, 12 horas e 14 horas) e três tratamentos secundários relacionados ao ângulo de visada (0°, 30°, 45°).

A análise de variância foi realizada de acordo com o esquema mostrado na Tabela 5. Foi utilizado, para isso, o programa estatístico “SAS for Windows-release 6.11” (SAS, 1996).

Tabela 5 - Esquema da análise de variância

Causa da Variação (CV)	Grau de Liberdade (GL)	Valores do Grau de Liberdade (GL)
Horários (H)	H-1	2
Blocos	J-1	2
Resíduo A	(H-1) (J-1)	4
Ângulos (A)	A-1	2
H x A	(H-1) (A-1)	4
Resíduo B		12
Total	HJA-1	26

3.6 Estimativa do índice de área foliar

As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas por meio de um método não destrutivo, utilizando-se um equipamento denominado Plant Canopy Analyzer, modelo LAI-2000 da LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EUA.

Para estimar o IAF as medidas de radiação difusa, acima e abaixo do dossel do feijão, foram tomadas nas mesmas posições dentro da área experimental, em três pontos pré-estabelecidos (blocos). As coletas foram realizadas uma vez por semana, desde o estágio de floração até o de enchimento de grãos.



Figura 5 – Medidor do índice de área foliar, LAI – 2000. Fonte: LI-COR Environment

3.7 Medidas radiométricas sobre o dossel da cultura do feijão

As medidas radiométricas foram realizadas aproximadamente a cada 10 dias, nos horários de 10 horas, 12 horas e 14 horas. As condições meteorológicas eram favoráveis, ou seja, condições de céu aberto, com o máximo de radiação solar direta incidente. Em cada um dos horários estabelecidos, foram obtidas medidas radiométricas nos ângulos de 0° (nadir), 30° e 45°, nos três pontos de leitura (blocos) coincidentes aos utilizados na estimativa do IAF.

O espectrorradiômetro portátil SPECTRON SE-590, desenvolvido pela Spectron Engineering Incorporation, Denver, Colorado, EUA, foi projetado para as leituras de campo.

Segundo Steffen (1988) e Moreira (1997), o SPECTRON SE-590 consiste de duas unidades básicas: uma controladora (data logger/CE500) e outra detectora (SE-390WB), a qual é ligada à unidade controladora por meio de cabos de conexão que podem atingir até 15 m de comprimento. A unidade detectora (SE-390), também denominada de cabeça sensora, pode ser ajustada para diversos campos de visada ("field of view", FOV) através de dispositivos ópticos adicionais (1°, 6°, 15° ou 180°), sendo que o campo de visada padrão é de 6°. Utilizando uma rede de difração, como elemento dispersivo da radiação incidente sobre uma matriz de fotodiodo, a unidade detectora é capaz de registrar, numa fração de tempo que varia de 1/60s até 60/64s, informações sobre as características radiométricas do alvo em 256 bandas, de aproximadamente 2,7 nm cada, na faixa espectral de 400 nm a 1100 nm do espectro eletromagnético.

A unidade controladora (CE-500) possui um microprocessador que permite programar o sistema, através de um teclado multifuncional, para a aquisição de espectros simples, bem como, introduzir indicadores tais como data, hora e número de identificação nos dados adquiridos. Possui ainda um gravador digital "12 bit" que permite gravação e leitura dos dados em uma fita cassete digital do tipo miniatura. Estes dados também podem ser transferidos, através da porta serial RS-232C, diretamente para o computador, tornando desnecessária a utilização da fita cassete.

As unidades detectoras estão ligadas à unidade controladora por cabos de conexão, onde se permite registrar dois espectros de forma quase simultânea, sendo que um dos espectros corresponde a radiância de uma amostra de área sobre o dossel da cultura (alvo) e o outro, a radiância da placa de referência (Sulfato de Bário). As medidas da radiância quase que simultaneamente, do alvo e da placa (par de medidas radiométricas), foram utilizadas para obter o

fator de reflectância.

Para as coletas realizadas em condições de campo, foi necessária a utilização de baterias recarregáveis de 12v, uma para o espectrorradiômetro e outra para o microcomputador (Compac, aero 4/33C), onde armazenou-se os dados coletados.

Na área experimental, é utilizado um mastro de alumínio desmontável, em forma de L invertido, com 3 metros de altura. Uma placa, com duas unidades detectoras, foi fixada na extremidade da parte horizontal do mastro, através de um sistema de acoplamento rápido. Estas são montadas com seus eixos ópticos orientados de forma paralela, sendo uma posicionada para o dossel da cultura, utilizando-se o campo de visada de 15°, e a outra com campo de visada de 6°, posicionada sobre a placa de referência, e fixada a 15 cm abaixo da unidade detectora.

Para a realização das leituras foram adotados os seguintes procedimentos:

a) em primeiro lugar foi obtido um par de medidas de radiância da placa de referência (Sulfato de Bário), com as duas unidades detectoras, primeiro na cabeça de 6° e em seguida na cabeça de 15° (calibração).

b) em seguida, a placa de referência era redirecionada para unidade detectora de 6°, onde permanecia até o final da coleta dos dados, sendo feita a calibração a cada mudança de ângulo;

c) o mastro foi posicionado em um local predeterminado de leitura (bloco), de forma que as medidas da reflectância do dossel do feijão foram obtidas em dois locais diferentes e intercaladas com as medidas da placa de referência. Os locais determinados para as leituras das medidas radiométricas foram marcados com piquetes, de forma que estas foram coletadas nos mesmos locais e de maneira semelhante, durante todo o ciclo da cultura do feijoeiro.

A regulagem do ângulo nadiral desejado (0°, 30° ou 45°) foi feita no encaixe da placa, que sustenta as duas unidades detectoras com o mastro.

O FOV dos ângulos nadirais de visada 0°, 30° e 45° possuem o diâmetro de 0,79 m (0,49 m² de área), 1,06 m (0,66 m² de área) e 1,60 m (0,99 m² de área), respectivamente, conforme mostra a Figura 4.

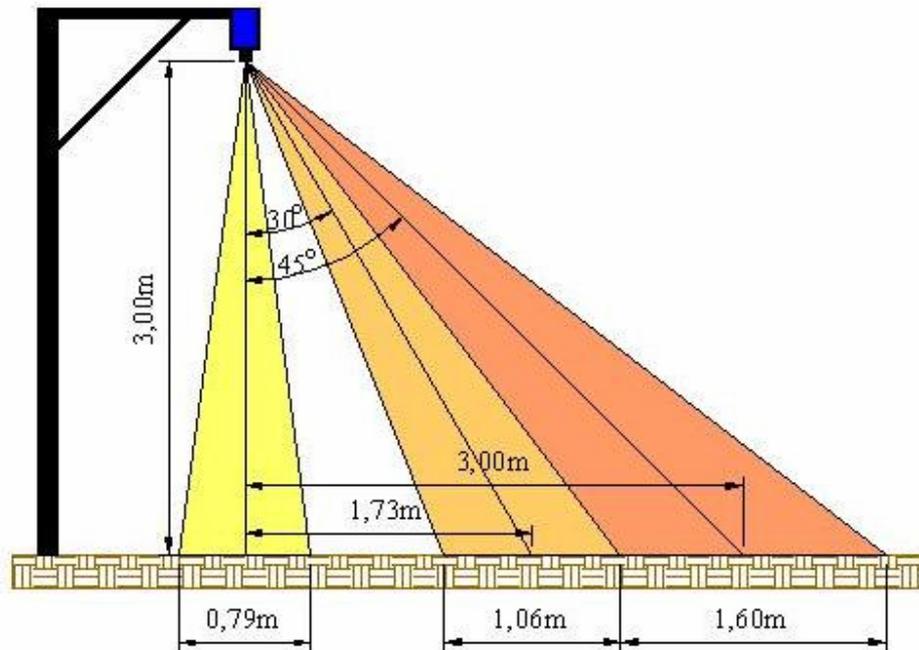


Figura 6 – Medidas do campo de visada dos ângulos nadirais

Ao longo do ciclo da cultura foram realizadas nove campanhas de coletas de dados radiométricos (Tabela 6). Nestas datas houve uma grande variação da geometria do dossel, que compreende desde o desdobramento das folhas primárias até a maturação. Foram obtidos, neste período, todos os dados necessários, nos diferentes pontos de leitura, horários e ângulos de visada.

Tabela 6 - Estádios fenológicos da cultura do feijão

Campanha	Data	Estádio Fenológico	Características
1	30/03	V2	50 % - folhas primárias
2	07/04	V3	50 % - 1ª folha trifoliolada
3	14/04	V4	50 % - 3ª folha trifoliolada
4	02/05	R6	50 % - floração
5	11/05	R7	50 % - formação de vagens
6	17/05	R8	50 % - enchimento de vagens
7	31/05	R9	Maturação - secagem
8	07/06	R9	Maturação - secagem
9	14/06	R9	Maturação - secagem

A partir das medidas radiométricas, após processamento no computador, utilizando o programa "ESPECTRO", desenvolvido em São José dos Campos, pelo Laboratório de Radiometria do INPE (LARAD), determinou-se os valores de reflectância (FR) correspondentes às bandas TM₃ e TM₄ do satélite Landsat, bem como os valores do índice de diferença normalizada (NDVI), tendo em vista os diferentes horários de leitura, em diferentes ângulos de visada. Com os dados de IAF obtidos por meio do equipamento LAI-2000, os valores de NDVI puderam ser confrontados para fins de análise e comparação.

3.8 Cálculo do fator de reflectância (FR)

Com os dados obtidos no campo armazenados no computador e, utilizando-se ainda do programa "ESPECTRO", calculou-se então o FR médio representativo de cada um dos arquivos, bem como a simulação posterior desses fatores, relativos às duas bandas do sensor TM do Landsat (TM₃ e TM₄), empregando o seguinte procedimento:

1) Calibração dos dados: consistiu em dividir a medida da radiância obtida sobre o dossel do feijão, pela medida da radiância da placa de referência, obtendo assim o FR de cada ponto amostral, como pode ser visto na eq. (2):

$$R(\nu_i, \omega_i; \nu_r, \omega_r \lambda) = dL_a(\nu_r, \omega_r \lambda) / dL_p(\nu_i, \omega_i \lambda) * k(\nu_i, \omega_i; \nu_r, \omega_r \lambda) \quad (2)$$

sendo:

$R(\nu_i, \omega_i; \nu_r, \omega_r \lambda)$ - fator de reflectância bidirecional espectral;

$dL_a(\nu_r, \omega_r \lambda)$ - radiância espectral do alvo;

$dL_p(\nu_i, \omega_i \lambda)$ - radiância espectral da placa de referência;

$k(\nu_i, \omega_i; \nu_r, \omega_r \lambda)$ - fator de calibração da placa de referência.

2) Intercalibração: após a calibração, foi realizada a intercalibração, com o objetivo de corrigir as diferenças de sensibilidade de resposta entre as duas unidades detectoras. Para isso, dividiu-se o fator de reflectância calibrado anteriormente, pelo fator K_i .

3) Fator de reflectância médio: terminada a intercalibração, havia ainda dois espectros representativos de cada parcela. Com o objetivo de adquirir uma informação espectral mais

representativa do dossel, se tornou necessária a obtenção da média desses dois pares de medidas para a obtenção de uma única curva espectral do fator de reflectância da parcela, com valores situados entre 400 a 1100 nm;

4) Simulação das bandas TM₃ e TM₄ do Landsat: após a obtenção do fator de reflectância médio, tornou-se necessário simular as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, presentes no sensor do TM do Landsat. Esta simulação foi feita através de uma das opções existentes no programa "ESPECTRO". A partir dos valores do FR médio, foram calculados os valores do FR relativos às duas bandas do sensor TM Landsat (TM₃, 630 a 700 nm e TM₄, 760 a 900 nm).

3.9 Cálculo do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI)

Após a obtenção dos valores de FR relativos às bandas TM₃ e TM₄ do sensor TM do Landsat, foi determinado o valor do índice de vegetação diferença normalizado (NDVI), conforme a eq. (3):

$$\text{NDVI} = (\text{TM}_4 - \text{TM}_3) / (\text{TM}_4 + \text{TM}_3) \quad (3)$$

sendo:

TM₄ - fator de reflectância medida na faixa espectral do infravermelho próximo (760 a 900 nm);

TM₃ - fator de reflectância medida na faixa espectral do vermelho (630 a 700 nm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fatores de reflectância nas bandas TM₃ e TM₄

Os valores do FR nas bandas TM₃ e TM₄ em função dos tratamentos, horário de leitura e ângulo de visada, são apresentados nos anexos A e B.

Para a análise da variância, foram escolhidas cinco datas de leitura (D₁, D₃, D₆, D₇ e D₈) representativas do ciclo do feijoeiro, referentes aos estádios fenológicos V2, V4, R8, R9 e R9, respectivamente. De acordo com esta análise (Tabelas 7 e 8), observa-se que a interação entre horário de leitura e ângulo de visada não influenciou, significativamente, a resposta do FR nas bandas TM₃ e TM₄. Verifica-se, ainda, que não ocorreu efeito significativo, ao nível de 5% de probabilidade, dos horários de leitura sobre o FR nas bandas TM₃ e TM₄.

Para Gleriani (1994), o horário de medição foi uma fonte significativa de variação sobre os índices de vegetação, exceto quando a cobertura vegetal era de 100%. Mesma notação é feita por Lord; Desjardins e Dube (1988), onde, com o aumento do ângulo zenital solar, os raios solares incidentes atingem um maior número de folhas. Neste trabalho, observou-se um comportamento inverso, já que o horário de leitura não teve influência sobre o FR para a região do visível e do infravermelho próximo.

Para a variável ângulo de visada, os valores do FR na banda TM₃ foram influenciados, ao nível de 5% de significância, com exceção do primeiro dia de leitura, onde não se observou influência significativa dos ângulos. Para o FR na banda TM₄, o ângulo de visada apresentou efeito significativo, ao nível de 5%, para todos os dias de leitura.

Tabela 7 - Valores de F para o FR na banda TM₃, em função do horário de leitura e ângulo de visada, nas cinco datas (D) representativas das fases do ciclo do feijoeiro - Piracicaba, SP, 2005

FV	GL	D ₁	D ₃	D ₆	D ₇	D ₈
Bloco	2	2,21 ^{ns}	0,90 ^{ns}	1,13 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,19 ^{ns}
Horário (H)	2	9,79 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,61 ^{ns}	4,52 ^{ns}	1,33 ^{ns}
Resíduo (a)	4	5,37 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,35 ^{ns}	2,17 ^{ns}	1,19 ^{ns}
Ângulo (A)	2	2,21 ^{ns}	4,21*	8,96**	29,83**	3,62*
H x A	4	3,00 ^{ns}	1,41 ^{ns}	1,91 ^{ns}	2,83 ^{ns}	1,62 ^{ns}
Resíduo (b)	-	-	-	-	-	-
CV %	12	10,46	13,28	23,19	20,73	27,69

Ns – não significativo; * e ** - significativo ao nível de 5 e 1% , respectivamente

Tabela 8 - Valores de F para o FR na banda TM₄, em função do horário de leitura e ângulo de visada, nas cinco datas (D) representativas das fases do ciclo do feijoeiro - Piracicaba, SP, 2005

FV	GL	D ₁	D ₃	D ₆	D ₇	D ₈
Bloco	2	1,32 ^{ns}	7,76 ^{ns}	4,94 ^{ns}	1,31 ^{ns}	3,01 ^{ns}
Horário (H)	2	4,26 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,19 ^{ns}	1,34 ^{ns}	1,08 ^{ns}
Resíduo (a)	4	1,70 ^{ns}	1,25 ^{ns}	0,94 ^{ns}	1,34 ^{ns}	0,64 ^{ns}
Ângulo (A)	2	6,94*	18,67**	3,80*	11,41**	9,35**
H x A	4	2,15 ^{ns}	1,41 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,37 ^{ns}
Resíduo (b)	-	-	-	-	-	-
CV %	12	8,26	12,48	38,21	35,57	28,12

Ns – não significativo; * e ** - significativo ao nível de 5 e 1% , respectivamente

Na Tabela 9 estão contidos os valores das médias dos FR nas bandas TM₃ e TM₄, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45°, analisados pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 9 – Teste de Tukey para os valores médios do fator de reflectância nas bandas TM₃ e TM₄, nos diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

Bandas	Ângulo	D ₁	D ₃	D ₆	D ₇	D ₈
TM ₃	0°	-	0,0500 a	0,0233 a	0,0211 a	0,0267 a
	30°	-	0,0555 ab	0,0255 a	0,0288 a	0,0311 ab
	45°	-	0,0600 b	0,0355 b	0,0444 b	0,0378 b
TM ₄	0°	0,1066 a	0,0866 a	0,2566 a	0,2367 a	0,2111 a
	30°	0,1100 a	0,1044 b	0,3511 ab	0,3667 a	0,2889 ab
	45°	0,1222 b	0,1244 c	0,4277 b	0,5411 b	0,3789 b

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

Observa-se que em todos os dias de campanha, a exceção do primeiro, que não houve efeito significativo dos ângulos ao nível de 5% de probabilidade sobre o FR na banda TM₃, o ângulo de 0° difere estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade, do ângulo de 45°. Apenas em D₆ e D₇, o ângulo de 30° difere estatisticamente do ângulo de 45°.

Para o FR na banda TM₄, em todos os dias se observa que o ângulo de 0° difere estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade, do ângulo de 45°. Em D₁, D₃ e D₇ o ângulo de 30° difere estatisticamente do ângulo de 45°.

De acordo com Gleriani (1994), não houve diferença significativa entre os ângulos de

visada 0° e 30°, mas ocorreu diferença significativa entre os ângulos de 0° e 45°. Uma possível explicação para tal evento seria devido ao aumento da reflectância com o incremento do ângulo nadiral de visada, (alguns autores definem como ângulo zenital de visada, entretanto, a mudança é feita com base no nadir) uma vez que no campo de visada do sensor, tem-se uma maior proporção de componentes superiores do dossel iluminados. O FOV do ângulo de visada a nadir possui uma área de 0,49 m², enquanto a área do FOV do ângulo de 45° é de 0,99 m², proporcionando uma leitura correspondente à quase o dobro da área de visada.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram a variação do FR observado nas bandas TM₃ e TM₄, ao longo do desenvolvimento da cultura, em resposta aos horários de leitura e ângulos de visada.

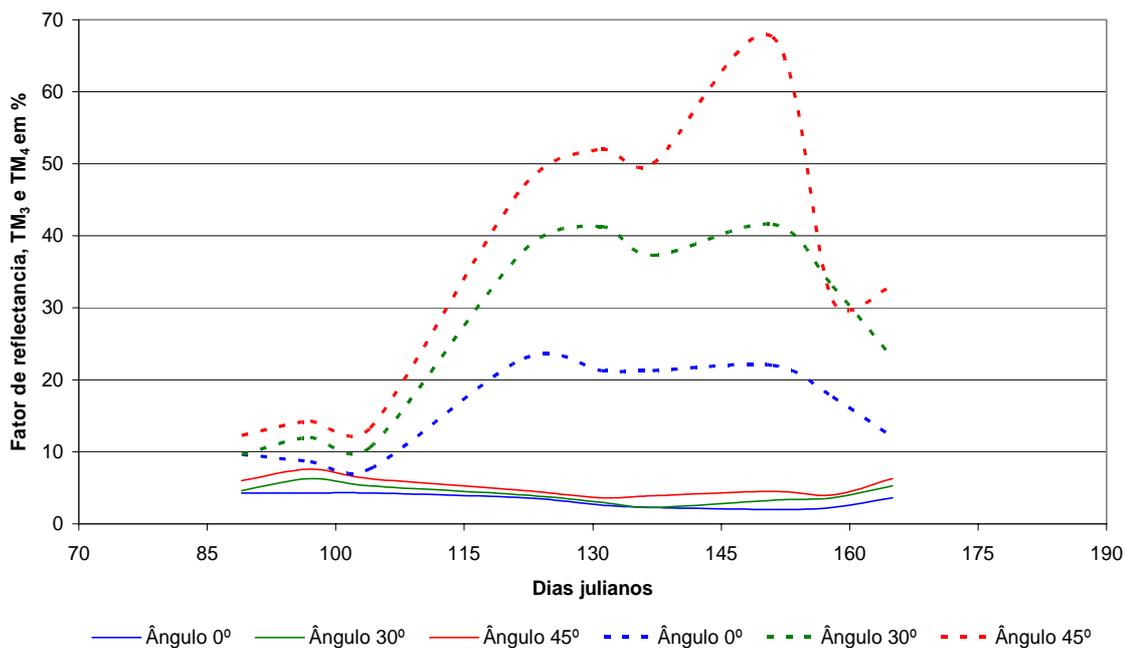


Figura 7 - Variação do fator de reflectância nas bandas TM₃ (curva contínua) e TM₄ (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 10 horas, para os ângulos de visada 0°, 30° e 45° - Piracicaba, SP, 2005

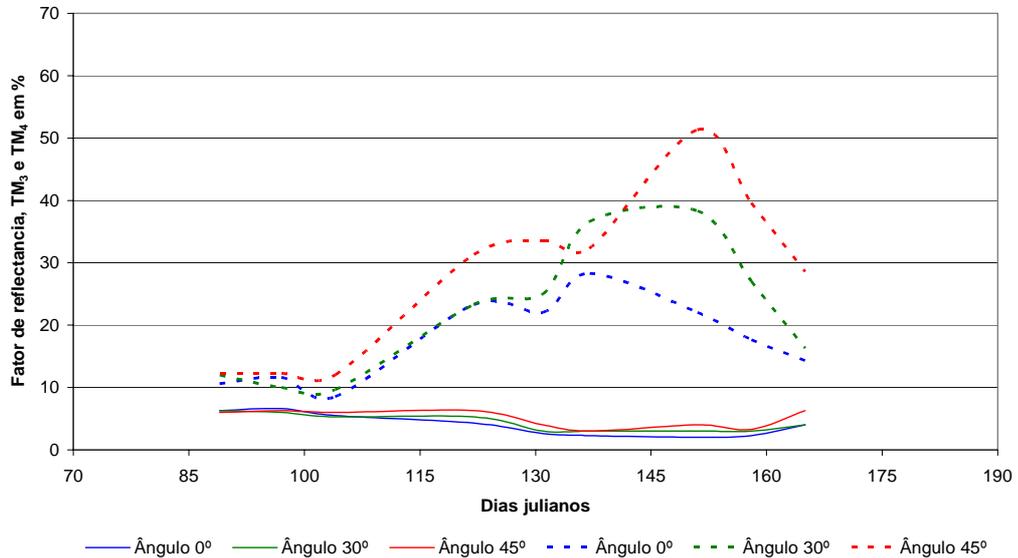


Figura 8 - Variação do fator de reflectância nas bandas TM_3 (curva contínua) e TM_4 (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 12 horas, para os ângulos de visada 0° , 30° e 45° - Piracicaba, SP, 2005

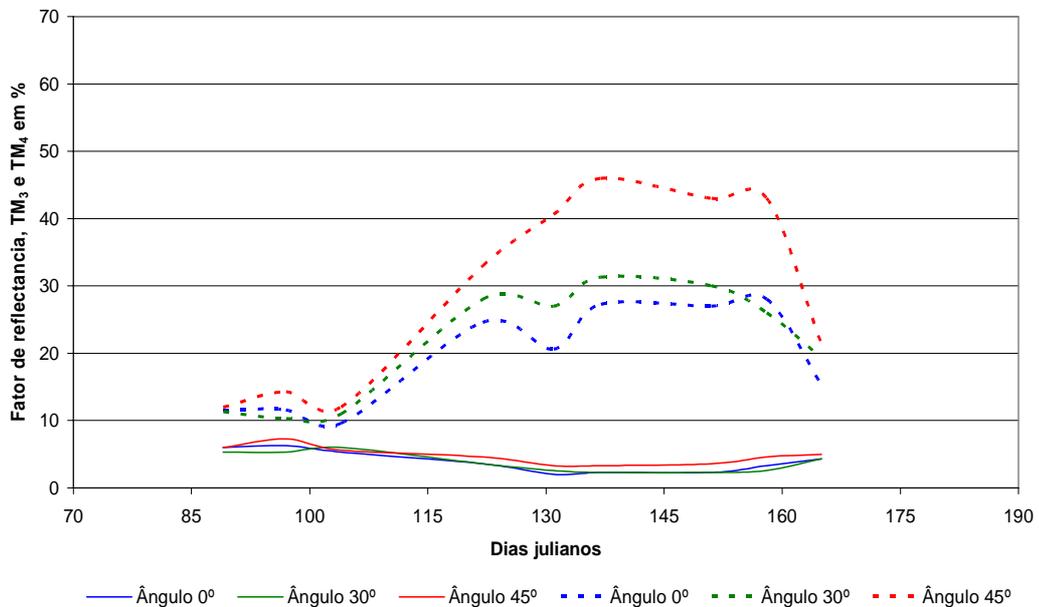


Figura 9 - Variação do fator de reflectância nas bandas TM_3 (curva contínua) e TM_4 (curva tracejada), obtidos ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 14 horas, para os ângulos de visada 0° , 30° e 45° - Piracicaba, SP, 2005

Observa-se que a variação do FR na banda TM_3 , para os diferentes tratamentos, apresentou uma tendência semelhante. Verifica-se, também, que no início do desenvolvimento da cultura, em função da baixa percentagem de cobertura vegetal e devido a grande influência da reflectância do solo, o valor do FR na banda TM_3 é maior. À medida que a cultura vai se desenvolvendo há um aumento da quantidade de fitomassa e do índice de área foliar, o qual proporciona um aumento da quantidade de clorofila nas folhas e, conseqüentemente, uma maior absorção da radiação por estas. Com isso, os valores do fator de reflectância na banda TM_3 diminuem até um certo ponto, como observado por Formaggio (1989). Após esse período, isto é, início da maturação, o FR aumentou gradativamente até o ponto em que a cultura estava completamente madura. Este aumento do FR ocorreu porque as folhas entraram em senescência, causando a degradação da clorofila. Com isso, houve uma menor absorção da radiação solar pelo dossel da cultura, aumentando o FR. De acordo com Guyot (1990), há um aumento da reflectância no final do ciclo da cultura porque na senescência, a reflectância aumenta na região do visível.

A variação do FR na banda do TM_4 , ao longo do desenvolvimento da cultura, apresentou tendência semelhante para os diferentes tratamentos. Os valores do FR foram maiores à medida em que a quantidade de folhas foi aumentando, refletindo assim na percentagem de cobertura vegetal do terreno, até se atingir um ponto máximo. Este valor foi determinado na época em que a cultura apresentou a máxima absorção de radiação solar, na região do espectro eletromagnético. A partir desta fase observou-se a diminuição do fator de reflectância de forma quase linear, devido à fase de senescência da cultura do feijão, onde ocorre o amarelecimento, secamento e a queda drástica das folhas, causando a degradação das clorofilas.

É importante ressaltar que, com o aumento do vigor da vegetação, aumentaram os valores de reflectância da banda TM_4 , ocorrendo o inverso com os valores da banda TM_3 . Entretanto, verifica-se que na banda TM_4 houve maior variação nos valores do FR, quando comparados aos valores obtidos na banda TM_3 . Além disso, é possível observar que a maior variação ocorreu no horário das 10 horas, mostrando uma maior diferença entre os ângulos de leitura.

4.2 Índice de vegetação diferença normalizada - NDVI

A variação do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) com os dias do ciclo da cultura, obtidos a partir dos fatores de reflectância nas bandas TM₃ e TM₄, são apresentados Figuras 10, 11 e 12.

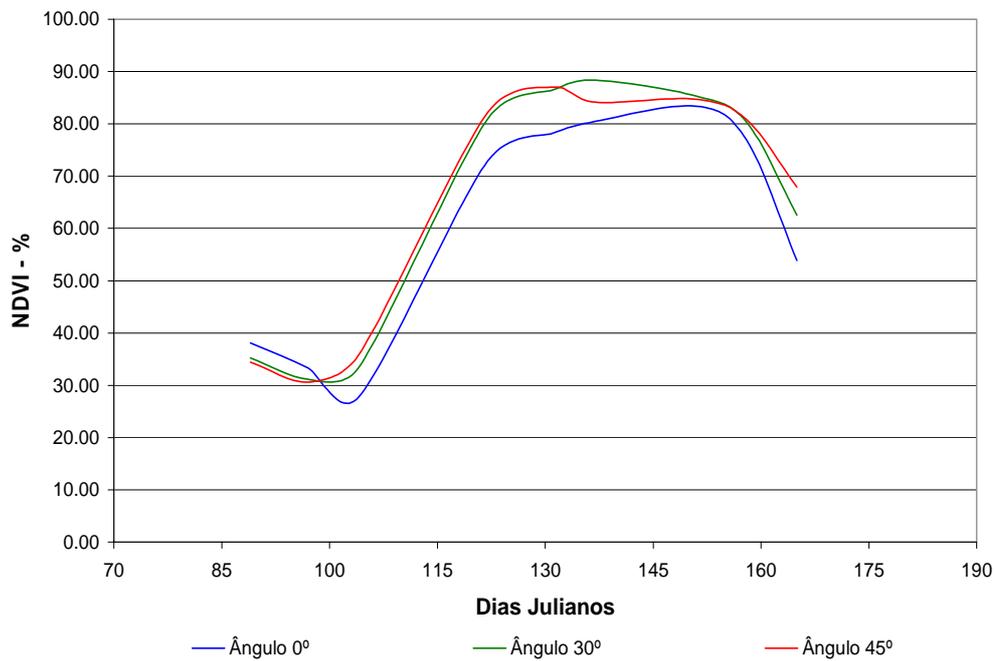


Figura 10 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 10 horas, sob diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

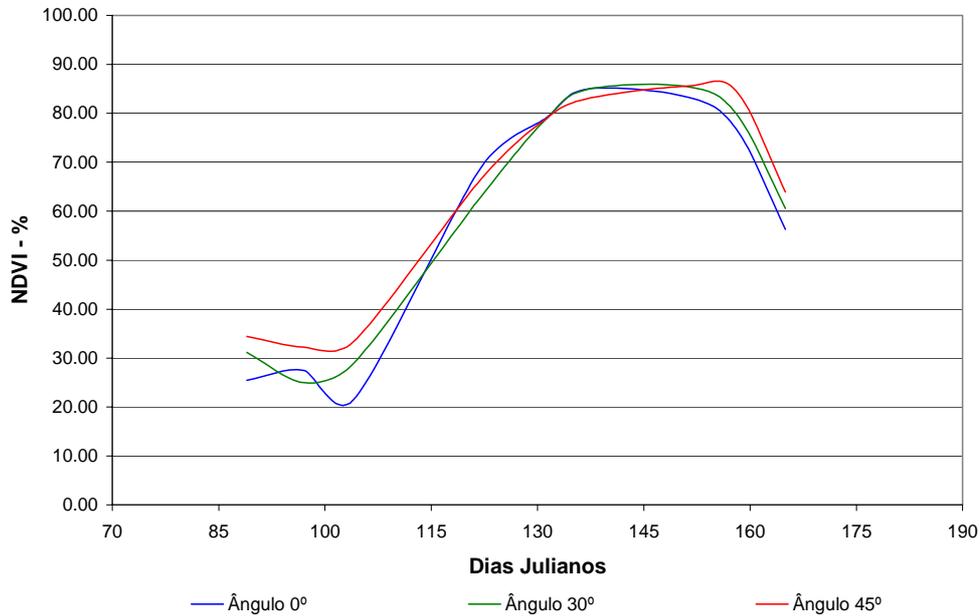


Figura 11 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 12 horas, sob diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

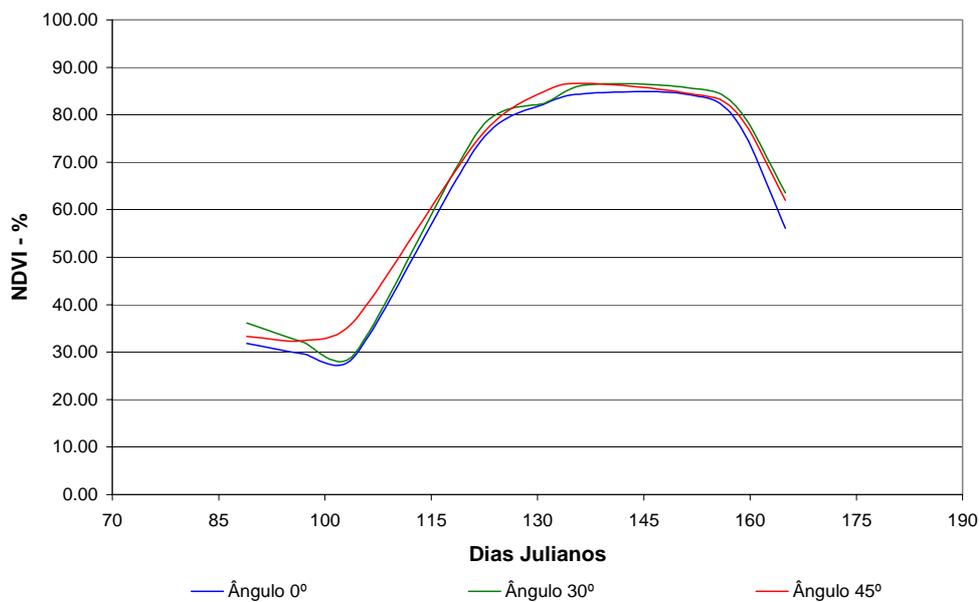


Figura 12 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do feijão, no horário das 14 horas, sob diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

Analisando a trajetória do NDVI, nota-se que independente do tratamento, o comportamento ao longo do ciclo do feijão foi semelhante, ou seja, todos eles apresentaram forma de parábola. Comportamento semelhante também foi observado por Formaggio (1989) e Moreira (1997).

Observa-se que no comportamento parabólico do NDVI ao longo do ciclo, em todos os tratamentos, houve um crescimento constante dos valores, chegando a atingir um pico, onde, a partir deste, iniciou uma queda contínua até o final do ciclo. Os valores correspondentes às fases inicial e final do ciclo da cultura se situaram em torno de 0,3, atingindo um valor máximo de, aproximadamente, 0,9.

4.3 Relação IAF-NDVI

Para se avaliar a existência da possível relação entre o NDVI e o IAF do feijoeiro, foi realizada a análise de variância para regressão linear simples. O modelo linear mostrou-se o mais adequado para explicar a relação em estudo.

Conforme mostra a Tabela 10, quanto às relações entre IAF e NDVI, o modelo linear apresentou melhores ajustes, estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$).

Tabela 10 – Resumo dos resultados da análise de regressão simples da relação entre IAF e NDVI, para as diferentes condições de estudo

Horário	Ângulo	Modelo	R ²	Teste F
10 horas	0°	NDVI = 0,2478.IAF+0,0778	0,83	0,0046
	30°	NDVI = 0,2456.IAF+0,1461	0,83	0,0044
	45°	NDVI = 0,2113.IAF+0,2363	0,73	0,0149
12 horas	0°	NDVI = 0,2765.IAF+0,0046	0,82	0,0048
	30°	NDVI = 0,2414.IAF+0,1046	0,77	0,0089
	45°	NDVI = 0,2164.IAF+0,1854	0,73	0,0144
14 horas	0°	NDVI = 0,2574.IAF+0,0777	0,85	0,0033
	30°	NDVI = 0,2455.IAF+0,1308	0,78	0,0082
	45°	NDVI = 0,2274.IAF+0,1806	0,85	0,0033

Examinando-se parâmetros de regressão obtidos, pode-se afirmar que, dentro das condições estabelecidas neste estudo, evidenciou-se uma correlação entre o NDVI e o IAF. O modelo linear apresentou, por sua vez, ajustes adequados para as relações NDVI-IAF, permitindo assim, de maneira significativa, a estimativa do NDVI a partir dos resultados encontrados para o IAF.

Foi observado, ainda, em todos os momentos avaliados, um aumento dos valores do NDVI à medida em que os valores de IAF foram acrescidos. Esta constatação está de acordo com Moraes (1996), uma vez que a absorção é mínima na região do infravermelho próximo, com isso, o aumento do IAF implica no aumento do espalhamento e no conseqüente aumento da reflectância da vegetação nessa região do espectro, contribuindo para que maiores valores de NDVI sejam observados.

Outros autores também presenciaram relação positiva entre essas variáveis, tais como Holben; Tucker e Fan (1980); Gleriani (1994), Turner; Cohen e Kennedy (1999), Xavier (2002) e Cunha (2004), que comentam ainda sobre a natureza assintótica que a relação pode apresentar, isto é, um aumento mais rápido do NDVI para menores valores de IAF, com tendência de se estabilizar para maiores valores deste último.

As Figuras 13, 14 e 15, mostram a relação entre o IAF e o NDVI.

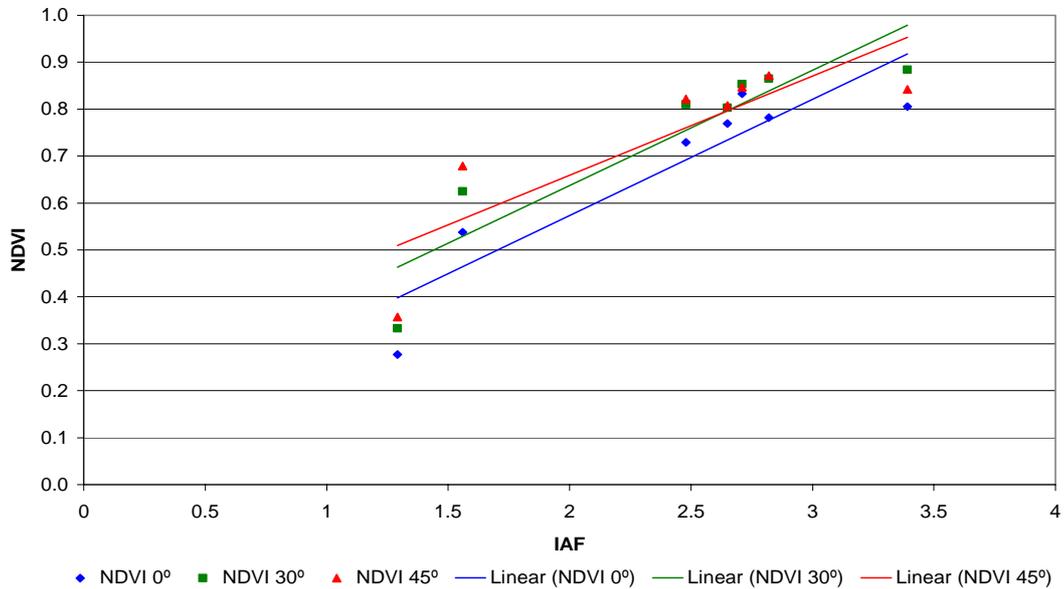


Figura 13 – Regressão entre os valores de NDVI e os valores observados para o IAF, no horário das 10 horas, nos diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

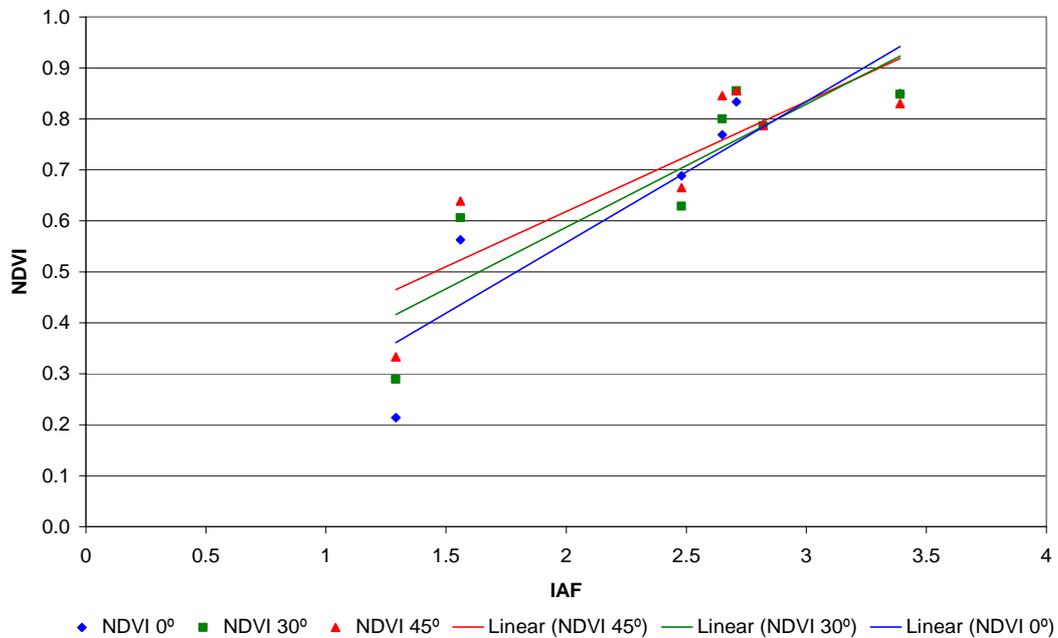


Figura 14 - Regressão entre os valores de NDVI e os valores observados para o IAF, no horário das 12 horas, nos diferentes ângulos de visada - Piracicaba, SP, 2005

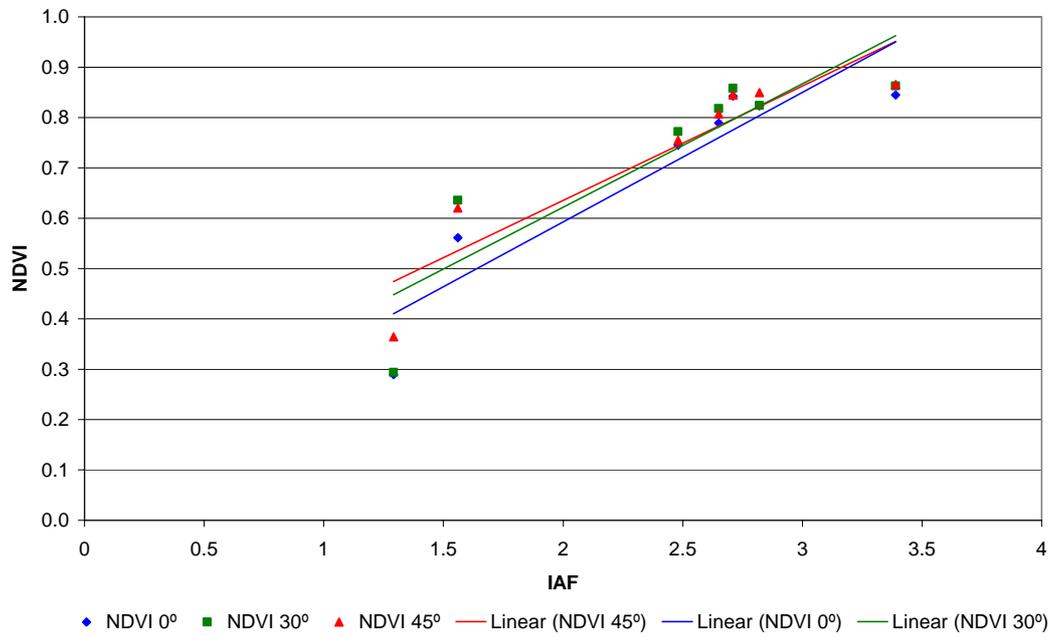


Figura 15 - Regressão entre os valores de NDVI e os valores observados para o IAF, no horário das 14 horas, nos diferentes ângulos de visada, - Piracicaba, SP, 2005

5 CONCLUSÕES

A variação do horário de medição, o que implica na variação dos ângulos de elevação solar, não influenciou significativamente os resultados do FR nas bandas TM₃ e TM₄ e nos valores do NDVI. Desta forma, as leituras, para estas condições, poderiam ser feitas em qualquer um dos horários pré-estabelecidos.

A variação do ângulo nadiral de visada influenciou significativamente, ao nível de 5% de probabilidade, os FR nas bandas TM₃ e TM₄, para todos os dias de leitura, havendo diferença entre o ângulo 0° e 45°.

Quanto às relações IAF e NDVI, o modelo linear apresentou melhores ajustes, estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$).

REFERÊNCIAS

- ASNER, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.64, p.234-253, 1998.
- 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**, New York, v.17, p.1-11, 1985.
- 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**, Madison, v.76, p.300-306, 1984
- BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A.R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, Amsterdam, v.13, p.95-120, 1995.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D.J. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. **Photogrammetry (PRS)**, Bethesda, v.43, p.241-246, 1989.
- BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T.; VANDERBITT, V.C. Spectral agronomic relationships of maize, soybean and wheat canopies. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, 1., 1981, Avignon. Avignon: SAM, 1981. p.8-11
- BOWKER, D.A.; DAVIS, R.E.; MYRIK, D.L. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies**. Washinton: National Aeronautics and Space Administration, 1985. 184 p. (NASA Reference Publication, 1139).
- BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; N.; BROGE, N.; HASAGER, C. B.; JENSEN, N. O.; SCHELDE, K.; THOMSEN, A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.81, p.179-193. 2002.
- BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.76, p.156-172, 2001.
- CECCATO, P.; GOBRON, N.; FLASSE, S.; PINTY, B.; TARANTOLA, S. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.82, p.188-197. 2002.
- CLEVERS, J.G.T.W. The use of imaging spectrometry for agricultural applications ISPRS, **Journal of Remote Sensing**, London, v.54, p.299-304, 1999.
- CREPANI, E. **Princípios básicos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: CNPQ;INPE, 1993. 45 p.

- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.3, p.175-183, 1974.
- CUNHA, C.A.U. **Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em Capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio**. 2004. 173p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- DAUGHTRY, C.S.T.; VANDERBILT, V.C.; POLLARA, V.J. Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.774-751, 1982.
- DEERING, D.W. Field measurements of bidirectional reflectance. In: ASRAR, G. (Ed.). **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley, 1980. p.14-61.
- DEERING, D.W.; ECK, T.F.; BANERJEE, B. Characterization of the reflectance anisotropy of boreal forest canopy in spring-summer. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.67, p.205-229, 1999.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informações, 1999. 412p.
- EPIPHANIO, J.C.N. **Dados TM Landsat-5 no estudo das culturas do trigo e feijão**. 1988. 140p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.
- EPIPHANIO, J.C.N. Metodologia de aquisição de dados ao nível terrestre. In: ASSUNÇÃO, G.V. **Sensoriamento remoto na agricultura**; conceitos básicos, metodologia e aplicações. São José dos Campos: INPE, 1989. p.53-73. (INPE-4806-MD/39).
- ELVIDGE, C.D.; CHEN, Z. Comparison of broad band and narrow band red and near infrared vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.45, p.38-48, 1995.
- FAO. **FAOSTAT**. Disponível em <<http://www.fao.org>>. Consultado em março de 2005.
- FORMAGGIO, A.R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e feijão**. 1989. 161p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N. Estudos radiométricos das culturas de trigo e de feijão em três tipos de latossolos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., 1988, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1988. p.405-410.
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C. Reflectância multiespectral TM/Landsat-5 para o sensoriamento remoto das condições de vigor da cultura de feijão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., 1990, Manaus. **Anais...** Manaus: CNPq;INPE. 1990. v.3, p.806-813.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; ALMEIDA FILHO, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.67, p.181-193. 1999.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; PIZARRO, M.A. An adequate band positioning to enhance NDVI contrast among green vegetation, senescent biomass and tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.21, p.1953-1960. 2000.

GATES, D.M. **Biophysical ecology**. New York: Springer-Verlag, 1980. 611 p.

GEPTS, P.; FERNANDÉZ, F. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Cali: CIAT, 1982. 10 p.

GILABERT, M.A.; GONZALES-PIQUERAS, J.; GARCIA-HARO, F.; MELIA, J. A generalized soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.82, p.303-310. 2002.

GITELSON, A.A.; STARK, R.; GRITS, U.; RUNDSQUIST, D.; KAUFMAN, Y.; DERRY, D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.23, p.2537-2562, 2002.

GLERIANI, J.M. **Influência do solo de fundo e da geometria da radiação na resposta espectral da cultura do feijão**. 1994. 87p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

GUYOT, G. Optical properties of vegetation canopies. In: STEVEN, M.D.; CLARK, J.A. (Ed.). **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworths, 1990. cap.2, p.19-43.

HATFIELD, D. L.; KANEMASU, E. T.; ASRAR, G.; JACKSON, R. D.; PINTER JUNIOR, P. J.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Leaf area estimates from spectral measurements over various planting data of wheat. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.6, p.167-175. 1985.

HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; FAN, C.J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.46, p.651-656, 1980.

HU, B.; LUCHT, W.; STRAHLER, A.H.; SCHAAF, C.B.; SMITH, M. Surface Albedos and Angle-Corrected NDVI from AVHRR Observations of South America. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.71, p.119-132. 2000.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v.25, p.295-309, 1988.

HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, New York, v.34, p.101-118. 1997.

JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, New York, v.11, p.185-200, 1991.

JACKSON, R.D.; PINTER JR, P.J.; IDSO, S.B. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. **Applied Optics**, Washinton, v.18, p.3730-3731, 1979a.

JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J.; PINTER, J.R.; IDSO, S.B. Plant canopy information extracyion from composit scene reflectance of row crops. **Applied Optics**, Washinton, v.18, p.3775-3782, 1979b.

KIMES, D.S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. **Applied Optics**, Washinton, v.22, p.1364-1372, 1983.

KIMES, D.S.; HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J. Optical directional view angles for remote sensing missions. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.5, p.887-908. 1984b.

KIMES, D.S.; MARKHAM, B.L.; TUCKER, C.J.; MCMURTREY III, J.E. Temporal relationship between spectral response and agronomic variables of a corn canopy. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.11, p.401-411, 1981.

KOLLENKARK, J.C.; VANDERBILT, V.C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.E. Influence of solar illumination angle on soybean canopy reflectance. **Applied Optics**, Washinton, v.21, p.1179-1184, 1982.

LI-COR. **Lai-2000**. Disponível em: <www.licor.com/env/Products/AreaMeters/lai2000>. Acesso em: 25 jul. 2005.

LORD, D.; DESJARDINS, R.L.; DUBÉ, P.A. Sun-angle effects on the red and near infrared reflectances of five different crop canopies. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.14, p.46-55, 1988.

MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. Comportamento espectral da vegetação. In: **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001. cap. 5, p. 157-199.

MESQUITA JR, H.N. **Modelagem da resposta espectral das fisionomias de Cerrado em relação às variações climáticas sazonais**. 2003. 244p. Tese (Doutorado em Ecologia) do Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.8, p.1807-1827, 1987.

MYNENI, R.B.; ASRAR, G. Atmospheric effects and spectral vegetation indeces. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.47, p.390-402, 1994.

- MYNENI, R.B.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S. Estimation of global leaf index and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v.35, p.1380-1393, 1997.
- MIURA, T.; HUETE, A.R.; YASHIOKA, H.; NOLBEN, B.N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.78, p.284-298. 2001.
- MORAES, E.C. Radiometria óptica espectral: comportamento espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996. p.1-22.
- MORAN, M.S.; INOUE, Y.; BARNES, E.M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.319-346, 1997.
- MOREIRA, M.A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos**. 1997. 142p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2005. 320 p.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 308 p.
- PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p.157-195.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.43, p.1541-1552. 1977.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L.; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMANN, A.H. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.41, p.1401-1407. 1975.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.55, p.95-107, 1996.
- RUDORFF, B.F.T. **Dados LANDSAT na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.

SABINS JÚNIOR, F.F. **Remote sensing: principles and interpretations**. San Francisco: W.H. Freeman, 1987. 449 p.

SILVA, A.F. **Dados digitais do satélite SPOT e de radiometria de campo no estudo da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. 1995. 118p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

SILVA, A.F.; VETORAZZI, C.A. Dados digitais do satélite SPOT e de radiometria de campo no estudo da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26. 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: CBEA, 1997. 1 CD-ROM.

SPAROVEK, G.; LEPSCH, I.F.; TORRADO, P.VP.; MODOLO, L.C.; PASSOS, H.R.; VAZ, L.F.A.; BARBOSA, R.G. **Avaliação das terras do campus "Luiz de Queiroz"**. Piracicaba: ESALQ, 1993. 28 p.

STAFFORD, J.V. Implementing Precision Agriculture in the 21th century. **Journal of Agricultural Engineering**, Darmstadt, v.76, p.267-275, 2000.

SAS INSTITUTE. **The SAS-System for Windows release 6.11 (software)**. Cary, 1996. 378p.

STEFFEN, C.A. **Spectron SE-590: manual de referência**. São José dos Campos: INPE, 1988. 23p.

STEFFEN, C.A. Fundamentos de radiometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996a. p.1-17.

STEFFEN, C.A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996b. p.9-14.

STEFFEN, C.A.; MORAES, E.C. Introdução à radiometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE;SBC, 1993. p.1-12.

THENKABAIL, P.S.; SMITH, R.B.; PAUW, E. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperpectral wavebands for agricultural crop characterization. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.68, p.607-621, 2002.

THOMAS, J.R.; OERTHER, G.F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurement. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, p.11-13, 1972.

TODD, S.W.; HOFFER, R.M. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.64, p.915-922, 1998.

- TUCKER, C.L.; GARRATT, M.W. Leaf optical system modeled as stochastic process. **Applied Optics**, Washinton, v.16, p.635-42, 1977.
- TURNER, D.P.; COHEN, W.B.; KENNEDY, R.E. Relationships between leaf area index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.70, p.52-68, 1999.
- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E. Vegetation endices in crop assesment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, p.105-119. 1991.
- XAVIER, A.C. **Estimativa da dinâmica do índice de área foliar em uma microbacia hidrográfica por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2002. 111p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ANEXOS

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continua)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
89	1	1	1	0,04	0,10	0,4286
97	1	1	1	0,04	0,09	0,3846
104	1	1	1	0,04	0,08	0,3333
122	1	1	1	0,05	0,09	0,2857
131	1	1	1	0,04	0,09	0,3846
137	1	1	1	0,03	0,08	0,4545
151	1	1	1	0,02	0,08	0,6000
158	1	1	1	0,03	0,13	0,6250
165	1	1	1	0,04	0,1	0,4286
89	2	1	1	0,04	0,09	0,3846
97	2	1	1	0,04	0,08	0,3333
104	2	1	1	0,04	0,07	0,2727
122	2	1	1	0,03	0,39	0,8571
131	2	1	1	0,02	0,35	0,8919
137	2	1	1	0,02	0,28	0,8667
151	2	1	1	0,02	0,35	0,8919
158	2	1	1	0,02	0,22	0,8333
165	2	1	1	0,04	0,15	0,5789
89	3	1	1	0,05	0,10	0,3333
97	3	1	1	0,05	0,09	0,2857
104	3	1	1	0,05	0,08	0,2308
122	3	1	1	0,03	0,21	0,7500
131	3	1	1	0,02	0,2	0,8182
137	3	1	1	0,02	0,28	0,8667
151	3	1	1	0,02	0,23	0,8400
158	3	1	1	0,02	0,18	0,8000
165	3	1	1	0,03	0,11	0,5714
89	1	1	2	0,05	0,11	0,3750

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
97	1	1	2	0,07	0,15	0,3636
104	1	1	2	0,05	0,12	0,4118
122	1	1	2	0,05	0,43	0,7917
131	1	1	2	0,02	0,28	0,8667
137	1	1	2	0,02	0,23	0,8400
151	1	1	2	0,03	0,43	0,8696
158	1	1	2	0,02	0,17	0,7895
165	1	1	2	0,04	0,2	0,6667
89	2	1	2	0,04	0,10	0,4286
97	2	1	2	0,06	0,11	0,2941
104	2	1	2	0,05	0,11	0,3750
122	2	1	2	0,04	0,44	0,8333
131	2	1	2	0,04	0,62	0,8788
137	2	1	2	0,03	0,61	0,9063
151	2	1	2	0,04	0,46	0,8400
158	2	1	2	0,04	0,36	0,8000
165	2	1	2	0,08	0,24	0,5000
89	3	1	2	0,05	0,08	0,2308
97	3	1	2	0,06	0,10	0,2500
104	3	1	2	0,06	0,09	0,2000
122	3	1	2	0,03	0,27	0,8000
131	3	1	2	0,03	0,34	0,8378
137	3	1	2	0,02	0,28	0,8667
151	3	1	2	0,03	0,36	0,8462
158	3	1	2	0,05	0,46	0,8039
165	3	1	2	0,04	0,25	0,7241
89	1	1	3	0,05	0,11	0,3750
97	1	1	3	0,07	0,13	0,3000
104	1	1	3	0,07	0,16	0,3913

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
122	1	1	3	0,05	0,54	0,8305
131	1	1	3	0,03	0,37	0,8500
137	1	1	3	0,03	0,29	0,8125
151	1	1	3	0,06	0,73	0,8481
158	1	1	3	0,02	0,23	0,8400
165	1	1	3	0,08	0,43	0,6863
89	2	1	3	0,05	0,13	0,4444
97	2	1	3	0,08	0,18	0,3846
104	2	1	3	0,06	0,14	0,4000
122	2	1	3	0,05	0,61	0,8485
131	2	1	3	0,04	0,74	0,8974
137	2	1	3	0,05	0,76	0,8765
151	2	1	3	0,07	0,89	0,8542
158	2	1	3	0,04	0,38	0,8095
165	2	1	3	0,06	0,26	0,6250
89	3	1	3	0,07	0,12	0,2632
97	3	1	3	0,08	0,12	0,2000
104	3	1	3	0,06	0,1	0,2500
122	3	1	3	0,04	0,26	0,7333
131	3	1	3	0,04	0,45	0,8367
137	3	1	3	0,05	0,45	0,8000
151	3	1	3	0,04	0,41	0,8222
158	3	1	3	0,04	0,32	0,7778
165	3	1	3	0,05	0,3	0,7143
89	1	2	1	0,06	0,10	0,2500
97	1	2	1	0,07	0,12	0,2632
104	1	2	1	0,05	0,09	0,2857
122	1	2	1	0,05	0,15	0,5000
131	1	2	1	0,03	0,09	0,5000
137	1	2	1	0,02	0,14	0,7500

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
151	1	2	1	0,02	0,09	0,6364
158	1	2	1	0,03	0,16	0,6842
165	1	2	1	0,04	0,11	0,4667
89	2	2	1	0,07	0,11	0,2222
97	2	2	1	0,06	0,11	0,2941
104	2	2	1	0,05	0,09	0,2857
122	2	2	1	0,03	0,36	0,8462
131	2	2	1	0,02	0,4	0,9048
137	2	2	1	0,03	0,54	0,8947
151	2	2	1	0,02	0,36	0,8947
158	2	2	1	0,02	0,25	0,8519
165	2	2	1	0,04	0,21	0,6800
89	3	2	1	0,06	0,11	0,2941
97	3	2	1	0,07	0,12	0,2632
104	3	2	1	0,06	0,08	0,1429
122	3	2	1	0,05	0,19	0,5833
131	3	2	1	0,03	0,17	0,7000
137	3	2	1	0,02	0,17	0,7895
151	3	2	1	0,02	0,21	0,8261
158	3	2	1	0,02	0,12	0,7143
165	3	2	1	0,04	0,11	0,4667
89	1	2	2	0,05	0,11	0,3750
97	1	2	2	0,06	0,10	0,2500
104	1	2	2	0,04	0,1	0,4286
122	1	2	2	0,04	0,19	0,6522
131	1	2	2	0,02	0,21	0,8261
137	1	2	2	0,03	0,33	0,8333
151	1	2	2	0,03	0,29	0,8125
158	1	2	2	0,03	0,19	0,7273
165	1	2	2	0,03	0,1	0,5385

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
89	2	2	2	0,08	0,14	0,2727
97	2	2	2	0,06	0,09	0,2000
104	2	2	2	0,06	0,09	0,2000
122	2	2	2	0,08	0,24	0,5000
131	2	2	2	0,04	0,24	0,7143
137	2	2	2	0,03	0,35	0,8421
151	2	2	2	0,03	0,40	0,8605
158	2	2	2	0,03	0,34	0,8378
165	2	2	2	0,05	0,18	0,5652
89	3	2	2	0,06	0,11	0,2941
97	3	2	2	0,06	0,11	0,2941
104	3	2	2	0,06	0,1	0,2500
122	3	2	2	0,04	0,27	0,7419
131	3	2	2	0,03	0,3	0,8182
137	3	2	2	0,03	0,42	0,8667
151	3	2	2	0,03	0,46	0,8776
158	3	2	2	0,03	0,28	0,8065
165	3	2	2	0,04	0,21	0,6800
89	1	2	3	0,05	0,12	0,4118
97	1	2	3	0,07	0,14	0,3333
104	1	2	3	0,06	0,13	0,3684
122	1	2	3	0,05	0,22	0,6296
131	1	2	3	0,04	0,3	0,7647
137	1	2	3	0,03	0,32	0,8286
151	1	2	3	0,04	0,62	0,8788
158	1	2	3	0,03	0,45	0,8750
165	1	2	3	0,07	0,28	0,6000
89	2	2	3	0,07	0,13	0,3000
97	2	2	3	0,06	0,11	0,2941

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
104	2	2	3	0,06	0,11	0,2941
122	2	2	3	0,07	0,43	0,7200
131	2	2	3	0,04	0,34	0,7895
137	2	2	3	0,03	0,37	0,8500
151	2	2	3	0,04	0,48	0,8462
158	2	2	3	0,03	0,36	0,8462
165	2	2	3	0,05	0,27	0,6875
89	3	2	3	0,06	0,12	0,3333
97	3	2	3	0,06	0,12	0,3333
104	3	2	3	0,06	0,12	0,3333
122	3	2	3	0,07	0,29	0,6111
131	3	2	3	0,04	0,37	0,8049
137	3	2	3	0,03	0,28	0,8065
151	3	2	3	0,04	0,44	0,8333
158	3	2	3	0,04	0,38	0,8095
165	3	2	3	0,07	0,31	0,6316
89	1	3	1	0,06	0,12	0,3333
97	1	3	1	0,06	0,13	0,3684
104	1	3	1	0,05	0,1	0,3333
122	1	3	1	0,04	0,19	0,6522
131	1	3	1	0,02	0,18	0,8000
137	1	3	1	0,02	0,14	0,7500
151	1	3	1	0,02	0,19	0,8095
158	1	3	1	0,03	0,18	0,7143
165	1	3	1	0,03	0,12	0,6000
89	2	3	1	0,07	0,12	0,2632
97	2	3	1	0,06	0,10	0,2500
104	2	3	1	0,05	0,1	0,3333
122	2	3	1	0,03	0,38	0,8537
131	2	3	1	0,02	0,26	0,8571

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
137	2	3	1	0,03	0,51	0,8889
151	2	3	1	0,03	0,40	0,8605
158	2	3	1	0,04	0,45	0,8367
165	2	3	1	0,06	0,21	0,5556
89	3	3	1	0,05	0,11	0,3750
97	3	3	1	0,07	0,12	0,2632
104	3	3	1	0,06	0,09	0,2000
122	3	3	1	0,04	0,17	0,6190
131	3	3	1	0,02	0,18	0,8000
137	3	3	1	0,02	0,17	0,7895
151	3	3	1	0,02	0,22	0,8333
158	3	3	1	0,03	0,21	0,7500
165	3	3	1	0,04	0,13	0,5294
89	1	3	2	0,05	0,13	0,4444
97	1	3	2	0,05	0,12	0,4118
104	1	3	2	0,06	0,14	0,4000
122	1	3	2	0,04	0,42	0,8261
131	1	3	2	0,02	0,27	0,8621
137	1	3	2	0,02	0,35	0,8919
151	1	3	2	0,02	0,28	0,8667
158	1	3	2	0,03	0,22	0,7600
165	1	3	2	0,06	0,25	0,6129
89	2	3	2	0,05	0,10	0,3333
97	2	3	2	0,06	0,09	0,2000
104	2	3	2	0,07	0,1	0,1765
122	2	3	2	0,04	0,26	0,7333
131	2	3	2	0,02	0,18	0,8000
137	2	3	2	0,02	0,26	0,8571
151	2	3	2	0,02	0,22	0,8333
158	2	3	2	0,02	0,23	0,8400

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)

Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI
165	2	3	2	0,04	0,16	0,6000
89	3	3	2	0,06	0,11	0,2941
97	3	3	2	0,05	0,10	0,3333
104	3	3	2	0,05	0,09	0,2857
122	3	3	2	0,03	0,16	0,6842
131	3	3	2	0,04	0,36	0,8000
137	3	3	2	0,03	0,33	0,8333
151	3	3	2	0,03	0,40	0,8605
158	3	3	2	0,03	0,35	0,8421
165	3	3	2	0,03	0,17	0,7000
89	1	3	3	0,06	0,12	0,3333
97	1	3	3	0,09	0,19	0,3571
104	1	3	3	0,06	0,15	0,4286
122	1	3	3	0,05	0,36	0,7561
131	1	3	3	0,03	0,41	0,8636
137	1	3	3	0,03	0,43	0,8696
151	1	3	3	0,03	0,27	0,8000
158	1	3	3	0,06	0,43	0,7551
165	1	3	3	0,05	0,16	0,5238
89	2	3	3	0,06	0,12	0,3333
97	2	3	3	0,07	0,13	0,3000
104	2	3	3	0,05	0,1	0,3333
122	2	3	3	0,06	0,4	0,7391
131	2	3	3	0,03	0,3	0,8182
137	2	3	3	0,03	0,37	0,8500
151	2	3	3	0,03	0,35	0,8421
158	2	3	3	0,04	0,4	0,8182
165	2	3	3	0,05	0,27	0,6875
89	3	3	3	0,06	0,12	0,3333

ANEXO A - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM₃ e TM₄ e respectivos valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da radiometria de campo para os três blocos da parcela analisada e em função da data juliana de aquisição dos dados

							(conclusão)
Dia Juliano	Ponto	Horário	Ângulo	TM3	TM4	NDVI	
97	3	3	3	0,06	0,11	0,2941	
104	3	3	3	0,06	0,11	0,2941	
122	3	3	3	0,03	0,23	0,7692	
131	3	3	3	0,04	0,51	0,8545	
137	3	3	3	0,04	0,58	0,8710	
151	3	3	3	0,05	0,68	0,8630	
158	3	3	3	0,04	0,46	0,8400	
165	3	3	3	0,05	0,21	0,6154	

ANEXO B - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM3 e TM4 e respectivamente os valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da média dos três pontos analisados e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continua)

Dia Juliano	Horário	Ângulo	TM3 média	TM4 média	NDVI média
89	1	1	0,0433	0,0967	0,3822
97	1	1	0,0433	0,0867	0,3346
104	1	1	0,0433	0,0767	0,2789
122	1	1	0,0367	0,2300	0,6310
131	1	1	0,0267	0,2133	0,6982
137	1	1	0,0233	0,2133	0,7293
151	1	1	0,0200	0,2200	0,7773
158	1	1	0,0233	0,1767	0,7528
165	1	1	0,0367	0,1200	0,5263
89	1	2	0,0467	0,0967	0,3448
97	1	2	0,0633	0,1200	0,3026
104	1	2	0,0533	0,1067	0,3289
122	1	2	0,0400	0,3800	0,8083
131	1	2	0,0300	0,4133	0,8611
137	1	2	0,0233	0,3733	0,8710
151	1	2	0,0333	0,4167	0,8519
158	1	2	0,0367	0,3300	0,7978
165	1	2	0,0533	0,2300	0,6303
89	1	3	0,0567	0,1200	0,3609
97	1	3	0,0767	0,1433	0,2949
104	1	3	0,0633	0,1333	0,3471
122	1	3	0,0467	0,4700	0,8041
131	1	3	0,0367	0,5200	0,8614
137	1	3	0,0433	0,5000	0,8297
151	1	3	0,0567	0,6767	0,8415
158	1	3	0,0333	0,3100	0,8091
165	1	3	0,0633	0,3300	0,6752
89	2	1	0,0633	0,1067	0,2554
97	2	1	0,0667	0,1167	0,2735

ANEXO B - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM3 e TM4 e respectivamente os valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da média dos três pontos analisados e em função da data juliana de aquisição dos dados

(continuação)					
Dia Juliano	Horário	Ângulo	TM3 média	TM4 média	NDVI média
104	2	1	0,0533	0,0867	0,2381
122	2	1	0,0433	0,2333	0,6432
131	2	1	0,0267	0,2200	0,7016
137	2	1	0,0233	0,2833	0,8114
151	2	1	0,0200	0,2200	0,7857
158	2	1	0,0233	0,1767	0,7501
165	2	1	0,0400	0,1433	0,5378
89	2	2	0,0633	0,1200	0,3139
97	2	2	0,0600	0,1000	0,2480
104	2	2	0,0533	0,0967	0,2929
122	2	2	0,0533	0,2333	0,6314
131	2	2	0,0300	0,2500	0,7862
137	2	2	0,0300	0,3667	0,8474
151	2	2	0,0300	0,3833	0,8502
158	2	2	0,0300	0,2700	0,7905
165	2	2	0,0400	0,1633	0,5946
89	2	3	0,0600	0,1233	0,3484
97	2	3	0,0633	0,1233	0,3203
104	2	3	0,0600	0,1200	0,3320
122	2	3	0,0633	0,3133	0,6536
131	2	3	0,0400	0,3367	0,7864
137	2	3	0,0300	0,3233	0,8283
151	2	3	0,0400	0,5133	0,8528
158	2	3	0,0333	0,3967	0,8436
165	2	3	0,0633	0,2867	0,6397
89	3	1	0,0600	0,1167	0,3238
97	3	1	0,0633	0,1167	0,2939
104	3	1	0,0533	0,0967	0,2889
122	3	1	0,0367	0,2467	0,7083

ANEXO B - Dados do fator de reflectância correspondentes as bandas TM3 e TM4 e respectivamente os valores do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos através da média dos três pontos analisados e em função da data juliana de aquisição dos dados

(conclusão)

Dia Juliano	Horário	Ângulo	TM3 média	TM4 média	NDVI média
131	3	1	0,0200	0,2067	0,8190
137	3	1	0,0233	0,2733	0,8095
151	3	1	0,0233	0,2700	0,8344
158	3	1	0,0333	0,2800	0,7670
165	3	1	0,0433	0,1533	0,5617
89	3	2	0,0533	0,1133	0,3573
97	3	2	0,0533	0,1033	0,3150
104	3	2	0,0600	0,1100	0,2874
122	3	2	0,0367	0,2800	0,7479
131	3	2	0,0267	0,2700	0,8207
137	3	2	0,0233	0,3133	0,8608
151	3	2	0,0233	0,3000	0,8535
158	3	2	0,0267	0,2667	0,8140
165	3	2	0,0433	0,1933	0,6376
89	3	3	0,0600	0,1200	0,3333
97	3	3	0,0733	0,1433	0,3171
104	3	3	0,0567	0,1200	0,3520
122	3	3	0,0467	0,3300	0,7548
131	3	3	0,0333	0,4067	0,8455
137	3	3	0,0333	0,4600	0,8635
151	3	3	0,0367	0,4333	0,8350
158	3	3	0,0467	0,4300	0,8044
165	3	3	0,0500	0,2133	0,6089

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)