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

**Efeitos das lâminas de irrigação e da adubação nitrogenada no
comportamento espectral da cultura do feijão**

Priscylla Ferraz Câmara Monteiro

**Tese apresentada para a obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem**

Piracicaba

2009

Priscylla Ferraz Câmara Monteiro
Engenheiro Agrônomo

**Efeitos das lâminas de irrigação e da adubação nitrogenada no comportamento espectral da
cultura do feijão**

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS ANGULO FILHO**

**Tese apresentada para a obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem**

Piracicaba
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Monteiro, Priscylla Ferraz Câmara

Efeitos das lâminas de irrigação e da adubação nitrogenada no comportamento
espectral da cultura do feijão / Priscylla Ferraz Câmara Monteiro. - - Piracicaba, 2009.
182 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Adubação 2. Feijão 3. Fertilizantes nitrogenados 4. Irrigação 5. Sensoriamento remoto
I. Título

CDD 635.652
M775e

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

Às pessoas mais importantes de minha vida, minha família...

Aos meus queridos Pais, Márcio de Silos Ferraz e Yamara Potel de Silos Ferraz, meus maiores exemplos, por contribuírem na formação de meus valores e princípios mais nobres e por todo o apoio, o suporte e o incentivo em todos os momentos de minha vida;

Ao meu irmão, Eduardo Ferraz, com quem mantenho estreitos laços de fraternidade e de união; ao meu sobrinho e afilhado, Matheus Zanetti Ferraz, e à minha cunhada Elisângela Zanetti Ferraz, com carinho;

Aos meus Avós, Ida Pâmio Potel e Wilson Potel, com muito carinho, pelo apoio sempre prestado;

Ao meu marido, Rodrigo Otávio Câmara Monteiro, com muito amor e admiração e aos seus Pais, Francisco Otávio Monteiro e Gláucia Maria Câmara Monteiro, com carinho;

DEDICO.

“Faça as coisas o mais simples que você puder, porém não se restrinja às mais simples.”

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente em todos os momentos da minha vida;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), através do Departamento de Engenharia Rural e do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade e pelo suporte concedidos para a realização desta tese;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

À Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa;

Ao Professor, orientador e amigo Rubens Angulo Filho, por sua capacidade, seus ensinamentos e pela confiança para a realização desta tese; aos seus familiares, Ada, Rubinho e Hernan, pela amizade e pelo carinho sempre prestados;

Ao amigo Marcelo Peske Hartwig, na época doutorando em Irrigação e Drenagem, pela ajuda indispensável durante os trabalhos experimentais;

Ao amigo Marcos Adami (INPE), pelo ensinamento e pela ajuda indispensável durante as análises laboratoriais;

Aos Professores Alexandre Cândido Xavier (UFES) e Maurício Alves Moreira (INPE), pelas valiosas sugestões apresentadas a esta pesquisa;

À Professora Sônia Maria De Stefano Piedade, do Departamento de Ciências Exatas (ESALQ/USP), pelas orientações nas análises estatísticas;

Aos Professores Carlos Alberto Vettorazzi, Décio Eugênio Cruciani, Iran José Oliveira da Silva, Gerd Sparovek, José Antônio Frizzzone, Luiz Roberto Angelocci, Marcos Vinícius Folegatti, Paulo Leonel Libardi, Peterson Ricardo Fiorio, Sérgio Nascimento Duarte, Tarlei Arriel Botrel, pelos ensinamentos;

Aos amigos Sérgio Weine Paulino Chaves e Ana Livia, Jeanedy Pazinato, Alexandre “Chiclete”, Valesca Pandolfi, Antonio Clarette Santiago Tavares e Dalva Paulus, pela amizade e pelas constantes confraternizações, durante a estada em Piracicaba, SP;

Aos meus amigos do setor de Topografia e Geoprocessamento, Rochane de Oliveira Caran, Vanda Macedo Zambello, Lúcia Monteiro Ribeiro, Hamilton José Orsini, pelas constantes confraternizações no “café da tarde”;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Antônio Agostinho Gozzo, Áureo Santana de Oliveira, Hélio de Toledo Gomes, Juarez Renó do Amaral, Osvaldo Rettore Neto e Davilmar Aparecida Collevatti, sempre presentes, com muita vontade de ajudar;

Aos funcionários da Fazenda Areão, Lino Stênico, Luiz Fernando Marchiori, José Luiz Mandro, Valdinei Ribeiro de Camargo “Piranha”, pelo apoio e pela ajuda na condução do experimento de campo;

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	21
1 INTRODUÇÃO	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 Cultura do feijão.....	29
2.1.1 Importância socioeconômica.....	30
2.1.2 Necessidade hídrica.....	31
2.1.3 Adubação nitrogenada.....	33
2.1.4 Parâmetros de desenvolvimento da cultura e componentes de produção	34
2.2 Características e fatores que influenciam a resposta espectral das culturas agrícolas	37
2.2.1 Solo.....	38
2.2.2 Estrutura do dossel	40
2.2.3 Geometria de iluminação e de visada.....	43
2.2.4 Fatores fisiológicos da cultura.....	46
2.3 Sensoriamento remoto hiperespectral (SRH).....	48
2.3.1 Índices de vegetação.....	52
2.3.2 Remoção do contínuo.....	56
3 MATERIAL E MÉTODOS	61
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	61
3.2 Caracterização do solo	62
3.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	63
3.4 Condução da cultura.....	66
3.5 Sistema e manejo da irrigação.....	66
3.6 Distribuição de água no solo	69
3.7 Produtividade da água (PA)	71
3.8 Parâmetros de desenvolvimento da cultura.....	72
3.8.1 Índice de área foliar.....	72

3.8.2 Taxa de crescimento da altura da planta (TCAP).....	74
3.9 Componentes de produção.....	74
3.9.1 Produtividade dos grãos.....	75
3.9.2 Número médio de vagens por planta	75
3.9.3 Número médio de grãos por vagem.....	75
3.10 Parâmetros biofísicos da cultura.....	75
3.10.1 Levantamento dos dados radiométricos.....	75
3.10.2 Índices de vegetação	78
3.10.3 Remoção do contínuo e análise da área e profundidade da banda de absorção	80
3.11 Análise estatística dos dados	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1 Temperatura e umidade relativa do ar	83
4.2 Evapotranspiração da cultura e lâminas aplicadas.....	85
4.3 Distribuição de água no solo.....	89
4.4 Produtividade da água (PA).....	94
4.5 Parâmetros de desenvolvimento da cultura	96
4.5.1 Índice de área foliar (IAF)	96
4.5.2 Altura da planta.....	101
4.6 Componentes de produção.....	104
4.7 Relação entre o índice de área foliar (IAF) e as demais variáveis.....	108
4.8 Análise do comportamento espectral do feijão.....	115
4.9 Correlação entre as reflectâncias e as variáveis biofísicas	119
4.10 Análise dos índices de vegetação	124
4.10.1 Comportamento do NDVI	124
4.10.2 Mapas de isolinhas segundo o índice NB_NDVI.....	127
4.11 Remoção do contínuo e análise das áreas e das profundidades das bandas	135
4.11.1 Relação entre a remoção do contínuo e as variáveis biofísicas	141
4.12 Relação entre as metodologias.....	149
5 CONCLUSÕES	153
REFERÊNCIAS	155
APÊNDICES	177

RESUMO

Efeitos das lâminas de irrigação e da adubação nitrogenada no comportamento espectral da cultura do feijão

Este trabalho teve como objetivo principal analisar, em condições de campo, o efeito de lâminas de irrigação e de doses de nitrogênio sobre o comportamento espectral da cultura do feijão, a partir de medidas de reflectância hiperespectral, na faixa de 350 a 1150 nm, e da correlação entre os parâmetros biofísicos e as variáveis agrônômicas da cultura, nessas condições. O experimento foi conduzido na área experimental de Agricultura Irrigada da Fazenda Areão, sob a responsabilidade do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – DER/ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba, SP, de setembro a dezembro de 2007. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas, alocando-se, nas parcelas, os tratamentos relacionados aos níveis de irrigação ((179,5; 256,5; 357,5 e 406,2 mm) e nas subparcelas os tratamentos relativos às doses de nitrogênio (0; 80 e 160 kg ha⁻¹), totalizando doze tratamentos em cada bloco. Como os tratamentos foram dispostos em quatro blocos (repetições), o total de parcelas experimentais foi de 48. As medidas radiométricas de campo foram adquiridas por meio do espectrorradiômetro SPECTRON SE-590, em sete datas, durante o ciclo da cultura. Foram coletados, ainda, a altura das plantas, o índice de área foliar, a produtividade de grãos, o número de grãos por vagem e o número de vagens por planta. Os índices espectrais calculados foram o NDVI e o NB_NDVI. Foi aplicada a remoção do contínuo nos espectros de reflectância para analisar a profundidade da banda e a área da banda de absorção, centrada em 665 nm. O fator *água* influenciou as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade, número de vagens por planta e número de grãos por vagem), sendo maiores os valores encontrados nas plantas que receberam maiores quantidades de água. O aumento da dose de nitrogênio não influenciou as variações das variáveis biofísicas, devido, possivelmente, ao processo de lixiviação desse nutriente para as camadas abaixo do sistema radicular da cultura. As análises dos índices de vegetação e dos parâmetros da remoção do contínuo (área e profundidade da banda de absorção) mostraram que as lâminas de irrigação afetaram o comportamento espectral do feijão no comprimento de onda de 665 nm, e que esses parâmetros não foram influenciados pelas doses de N. Os índices de vegetação (NDVI e NB_NDVI) e os parâmetros da remoção do contínuo (a profundidade da banda e a área da banda de absorção) foram eficientes na estimativa do IAF, da altura de plantas e da produtividade de grãos. Durante todo o desenvolvimento da cultura, as melhores correlações entre as variáveis biofísicas e as variáveis espectrais foram observadas nos estádios V4 e R6 de acordo com a variável analisada, sendo, portanto, estes os melhores estádios para monitorar espectralmente a cultura. Diante das metodologias utilizadas, as variáveis biofísicas foram mais bem estimadas pelo índice NB_NDVI, nos estádios V4 e R6, quando comparado ao índice NDVI e aos parâmetros da remoção do contínuo (profundidade e área da banda de absorção).

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Espectrorradiometria; Índices de vegetação; Remoção do contínuo

ABSTRACT

Effects of irrigation levels and nitrogen fertilization on the spectral behavior of bean crop

The objective of this research was to analyze the effect of irrigation levels and nitrogen fertilization on the spectral behavior, in the wavelength range of 350 to 1150 nm, of bean crop and the correlation between biophysical parameters and agronomical variables. The experiment was carried on at the “Fazenda Areão”, located at the University of São Paulo (ESALQ/USP) campus, Piracicaba, São Paulo, Brazil, from September to December, 2007. The experimental design was the randomized blocks, with split plots, with 12 treatments, 4 irrigation levels (179,5; 256,5; 357,5 e 406,2 mm) and 3 nitrogen rates (0; 80 e 160 kg ha⁻¹), and four blocks. The field radiometric data were acquired with the SPECTRON-SE 590 spectroradiometer for seven dates during the crop growing season. Plant height, leaf area index (LAI), grain yield, the pod number per plant and the grain number per pod were also acquired. The spectral indices used were NDVI and NB_NDVI. The continuum removal was applied for the reflectance spectrum, on visible region centered on 665 nm, to analyze the band area and band depth. The irrigation also influenced the biophysical variables, so the largest medium values were observed in the treatments that used the largest irrigation levels. The nitrogen fertilization did not interfere on the biophysical variables, probably due to the leaching process. The vegetation indices and continuum removal analysis showed that irrigation levels affected the spectral behavior of bean crop on 665 nm and this parameters had not been influenced by nitrogen levels. The vegetation indices (NDVI and NB_NDVI) and the continuum removal parameters (band area and band depth) were efficient in the estimate of IAF, plant height and grain yield. During all the crop development, the best correlations between biophysical variables and spectral variables were observed on V4 and R6 stages, according to the variable analyzed. In face of the methodologies used, the biophysical variables were better estimated by NB_NDVI, on V4 and R6 stages, when compared with NDVI and the continuum removal parameters.

Keywords: Remote sensing; Spectroradiometry; Vegetation indices; Continuum removal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração das três grandes fases do ciclo fenológico de uma cultura agrícola de ciclo curto, quanto aos principais componentes que influenciam a resposta espectral dos dosséis. Fonte: adaptada de Fageria (1989, p. 385) e Formaggio (1989)	38
Figura 2 – Ilustração do sombreamento de um dossel vegetal incompleto, na orientação norte-sul e coordenadas geográficas 22°42'30" S e 47°38'39" W, às 9:00 a.m. do dia 12 de outubro de 2007 - Piracicaba, SP, 2007.....	44
Figura 3 – Scanners hiperespectrais (conceito AVIRIS)	49
Figura 4 - Representação esquemática do sensoriamento remoto hiperespectral	51
Figura 5 – Representação esquemática da remoção do contínuo: a) Espectro de reflectância com os limites das bandas; b) Banda de absorção antes da remoção do contínuo; c) Banda de absorção com a remoção do contínuo. Fonte: Adaptado de Pu et al. (2003)	58
Figura 6 – Croqui da área experimental: T1– 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N0); T2– 179,5 mm e N1=80 kg ha ⁻¹ ; T3– 179,5 mm e N2=160 kg ha ⁻¹ ; T4– 256,5 mm e sem N0; T5– 256,5 mm e N1=80 kg ha ⁻¹ ; T6– 256,5 mm e N2= 160 kg ha ⁻¹ ; T7– 357,5 mm sem N0; T8– 357,5 mm e N1=80 kg ha ⁻¹ ; T9 – 357,5 mm e N2=160 kg ha ⁻¹ ; T10– 406,2 mm e sem N0; T11- 406,2 mm e N1=80 kg ha ⁻¹ ; T12- 406,2 mm e N2=160 kg ha ⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007.....	65
Figura 7 – Sistema de irrigação por aspersão em linha (Line Source Sprinkler System) – Piracicaba, SP, 2007.....	67
Figura 8 – Curvas de retenção de água no solo, ajustadas pelo modelo de van Genuchten, para as profundidades de 0,10 e 0,30 m – Piracicaba, SP, 2007.....	71
Figura 9 – Equipamento Plant Canopy Analyzer, modelo LAI-2000.....	72
Figura 10 – Unidade detectora: cabeças sensoras de 15 ° (esquerda) e de 6 ° (direita) e placa de sulfato de bário	76
Figura 11 – Unidade controladora.....	76
Figura 12 – Coletas de dados radiométricos no campo.....	77

Figura 13 – Carrinho de mão para leitura de campo, contendo: unidade controladora, microcomputador e duas baterias	77
Figura 14 – Variação da temperatura diária (máxima, mínima e média) do ambiente, durante o período experimental, compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007– Piracicaba, SP, 2007	84
Figura 15 – Variação da umidade relativa (UR) do ar diária (máxima, mínima e média) do ambiente, durante o período experimental, compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	85
Figura 16 – Evapotranspiração da cultura (ETc) do feijão estimada a partir de três fontes de dados distintas, durante o período experimental (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	86
Figura 17 – Lâminas de água aplicadas nos 4 tratamentos e estimativas da ETc diária, a partir de três fontes de dados distintas, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	87
Figura 18 – Lâminas de água aplicadas nos 4 tratamentos e ETc estimada pelos dados fornecidos da estação meteorológica da Fazenda Areão, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	88
Figura 19 – Variação da umidade volumétrica na camada de solo de 0 a 0,20 m, para as quatro lâminas de água aplicadas, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	91
Figura 20 – Variação da umidade volumétrica na camada de solo de 0,20 a 0,40 m, para as quatro lâminas de água aplicadas, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	93
Figura 21 – Variação do IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) durante o ciclo da cultura: T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e N=80 kg ha ⁻¹ ; T3 – 179,5 mm e N=160 kg ha ⁻¹ ; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e N=80 kg ha ⁻¹ ; T6 – 256,5 mm e N=160 kg ha ⁻¹ ; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e N=80 kg ha ⁻¹ ; T9 – 357,5	

- mm e N=160 kg ha⁻¹; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 - 406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹; T12 - 406,2 mm e N=160 kg ha⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007 99
- Figura 22 – Variação da altura de plantas (cm) durante o ciclo da cultura: T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T3 – 179,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T6 – 256,5 mm e N= 160 kg ha⁻¹; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T9 – 357,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 - 406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹; T12 - 406,2 mm e N=160 kg ha⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007 101
- Figura 23 – Relação entre o índice de área foliar (IAF) e a altura da planta (AP), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b), durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007 ... 110
- Figura 24 – Relação entre índice de área foliar (IAF) e a produtividade de grãos (PG), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b) durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007 111
- Figura 25 – Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o número de vagens por planta (NVP), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b) durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007 113
- Figura 26 – Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o número de grãos por vagem (NGV), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b), durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007 114
- Figura 27 – Curvas espectrais das médias de reflectância dos 12 tratamentos em cada estágio de desenvolvimento da cultura analisado, V2 (a), V3 (b), V4 (c), R6 (d), R8 (e), R9 (f) e R9 (g) – Piracicaba, SP, 2009 117
- Figura 28 – Coeficiente de correlação entre as reflectâncias espectrais de bandas estreitas e: a) irrigação; b) nitrogênio; c) IAF; d) altura da planta; e) produtividade de grãos; f) número de vagens por planta; e g) número de grãos por vagem, nos diferentes estádios fenológicos da cultura – Piracicaba, SP, 2007. R9a (maturação fisiológica); R9b (maturação de colheita) 121
- Figura 29 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R²) para estimativa do IAF do feijão por meio do índice NB_NDVI, durante o ciclo da cultura. As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação (R²<0,1) – Piracicaba, SP, 2007 129

- Figura 30 – Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa da altura de planta (AP) do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação ($R^2 < 0,1$) – Piracicaba, SP, 2007 130
- Figura 31 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa da produtividade do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação ($R^2 < 0,1$) – Piracicaba, SP, 2007 131
- Figura 32 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para a estimativa do número de vagens por planta (NVP) do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação – Piracicaba, SP, 2007..... 132
- Figura 33 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa do número de grãos por vagem (NGV) do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação – Piracicaba, SP, 2007..... 133
- Figura 34 – Espectro de reflectância original no estádio R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007 135
- Figura 35 – Contínuo removido aplicado à banda entre 550 e 800 nm para o estádio R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007 136
- Figura 36 - Remoção do contínuo aplicada à banda entre 550 e 800 nm, para os diferentes estádios fenológicos nos 12 tratamentos: T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T3 – 179,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T6 – 256,5 mm e N= 160 kg ha⁻¹; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T9 – 357,53 mm e N=160 kg ha⁻¹; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 – 406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹; T12 – 406,2 mm e N=160 kg ha⁻¹ 138
- Figura 37 – Comparação dos valores do coeficiente de determinação (R^2) dos índices de vegetação hiperespectrais, NDVI e NB_NDVI, e da remoção do contínuo, profundidade da banda (PB) e a área da banda de absorção (AB), nos diferentes estádios fenológicos da cultura do feijão para o IAF (a), altura da planta (b),

produtividade de grãos (c), número de vagens por planta (d) e número de grãos por vagem (e) – Piracicaba, SP, 2007	151
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estádios fenológicos da cultura do feijão e respectivas simbologias.....	30
Tabela 2 - Valores médios mensais de radiação global (RG), temperatura (T), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2 m de altura (U2) e precipitação mensal (P). Dados registrados no período do experimento, de setembro a dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	61
Tabela 3 - Características químicas do solo da área experimental: pH, fósforo (P), matéria orgânica (M.O.), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez total (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V) – Piracicaba, SP, 2007	62
Tabela 4 – Características físicas do solo da área experimental: umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), densidade do solo (Ds), argila, silte, areia – Piracicaba, SP, 2007	63
Tabela 5 - Esquema da Análise da Variância. Experimento conduzido de setembro a dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007	64
Tabela 6 – Valores de coeficiente de cultivo da cultura (Kc) do feijão para as condições brasileiras	69
Tabela 7 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) e dos parâmetros (α , n e m) do modelo de van Genuchten para o solo utilizado no experimento – Piracicaba, SP, 2007	71
Tabela 8 - Datas das coletas radiométricas e os respectivos estádios fenológicos	75
Tabela 9 – Valores médios de produtividade da água (PA), em gramas de grãos por m ³ de água aplicada – Piracicaba, SP, 2007	94
Tabela 10 - Resumo da análise de variância para a produtividade da água (PA) em função das lâminas de irrigação (I) e das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007.....	95
Tabela 11 – Equação de regressão para a produtividade da água (PA) do feijão em função das lâminas de irrigação (mm) – Piracicaba, SP, 2007	95
Tabela 12 - Resumo da análise de variância para o índice de área foliar (IAF) do feijão em função das lâminas de irrigação (I) e doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007	96

Tabela 13 - Valores de F da análise do desdobramento da fonte de variação “nitrogênio” dentro de cada lâmina de irrigação (N / I), para IAF aos 59 e 89 DAS do feijão – Piracicaba, SP, 2007	97
Tabela 14 – Equações de regressão da análise do desdobramento da fonte de variação nitrogênio dentro de cada lâmina de irrigação, para IAF aos 59 e aos 89 DAS do feijão em função das doses de nitrogênio – Piracicaba, SP, 2007	97
Tabela 15 - Valores de F da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio (I / N), para IAF aos 59 e aos 89 DAS do feijão – Piracicaba, SP, 2007	98
Tabela 16 – Equações de regressão da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio (N), para IAF aos 59 e aos 89 DAS do feijão, em função das lâminas de irrigação (I) – Piracicaba, SP, 2007.....	98
Tabela 17 – Equações de regressão para o índice de área foliar (IAF) aos 28, 37, 59, 77, 82 e 89 DAS do feijão em função das lâminas de irrigação (I) ou das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007	98
Tabela 18 - Resumo da análise de variância para a taxa de crescimento diário da altura da planta (TCAP) do feijão em função das lâminas de irrigação (I) e das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007	103
Tabela 19 – Equações de regressão para a taxa de crescimento diário da altura da planta (TCAP) aos 37, 49 e 69 DAS do feijão em função das lâminas de irrigação (I) – Piracicaba, SP, 2007	103
Tabela 20 – Valores médios da taxa de altura da planta (TCAP), em cm dia ⁻¹ , aos 18, 26, 37, 49, 69 e 76 DAS do feijão em função das lâminas de irrigação, em mm, e das doses de nitrogênio, em kg ha ⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007	104
Tabela 21 – Valores médios das características de produção: produtividade estimada de grãos (PG) para as densidades de plantio de 230.000 e 280.000 plantas ha ⁻¹ (P230 e P280), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) do feijão em função das lâminas de irrigação, em mm, e das doses de nitrogênio (N), em kg ha ⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007	105

Tabela 22 - Resumo da análise de variância para a produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV) em função das lâminas de irrigação (I) e das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007.....	107
Tabela 23 – Equações de regressão para a produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) do feijão em função das lâminas de irrigação (I) – Piracicaba, SP, 2007	108
Tabela 24 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre altura de planta (AP) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental – Piracicaba,SP, 2007	109
Tabela 25 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre produtividade de grãos (PG) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental – Piracicaba,SP, 2007.....	110
Tabela 26 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre número de vagens por planta (NVP) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental, Piracicaba-SP, 2007	112
Tabela 27 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o número de grãos por vagem (NGV) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental - Piracicaba-SP, 2007	113
Tabela 28 – Coeficiente de correlação (r) entre os comprimentos de onda e as variáveis da cultura do feijão, durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007	123
Tabela 29 – Resumo da análise da variância da técnica da remoção do contínuo, para a característica NDVI, em função das lâminas de irrigação (I) e doses de N – Piracicaba, SP, 2007.....	124
Tabela 30 – Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação nitrogênio dentro de cada lâmina de irrigação, para o NDVI – Piracicaba, SP, 2007.....	125
Tabela 31 - Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio, para NDVI – Piracicaba, SP, 2007.....	125
Tabela 32 – Equações de regressão linear e parâmetros observados para a relação obtida entre NDVI e lâminas de irrigação (I), nas coletas realizadas durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007.....	126

Tabela 33 – Coeficiente de determinação (R^2) e valor de F da regressão entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e o índice NDVI, nos estádios fenológicos V4 e R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007	127
Tabela 34 – Coeficientes de determinação (R^2) e comprimento de onda (nm) da relação entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e o índice NB_NDVI nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura – Piracicaba, SP, 2007.....	134
Tabela 35 – Resumo da análise da variância da técnica da remoção do contínuo, para a característica área da banda de absorção, em função das lâminas de irrigação e doses de N – Piracicaba, SP, 2007.....	139
Tabela 36 – Resumo da análise da variância da técnica da remoção do contínuo, para a característica profundidade da banda de absorção (Prof), em função das lâminas de irrigação e doses de N – Piracicaba, SP, 2007	140
Tabela 37 - Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação nitrogênio dentro de cada lâmina de irrigação, para área da banda de absorção e profundidade da banda – Piracicaba, SP, 2007.....	140
Tabela 38 - Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio, para área da banda de absorção e profundidade da banda – Piracicaba, SP, 2007.....	141

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o consumo de feijão é da ordem de 16 kg por habitante ao ano. O país destaca-se como o maior produtor e consumidor de feijão, sendo responsável por cerca de 16,3% da produção mundial. A safra de feijão no ano de 2008, segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2009), foi de 3,41 milhões de toneladas e esperam-se, para a safra de 2009, aproximadamente 3,73 milhões de toneladas, com um aumento de área plantada em torno de 9,3% e um ganho de produtividade de 11,1%, em relação ao ano de 2008 (IBGE, 2009). Pode-se dizer que a produção interna é praticamente suficiente para suprir a necessidade de consumo do país, havendo a necessidade de importar, apenas para manter o estoque dessa leguminosa. A produtividade média brasileira é da ordem de 850 kg ha^{-1} , sendo considerada baixa, quando comparada à de outros países, como a dos EUA ($\sim 1.825 \text{ kg ha}^{-1}$), a da China ($\sim 1.506 \text{ kg ha}^{-1}$), a da Indonésia ($\sim 1.009 \text{ kg ha}^{-1}$) e a de Myanmar ($\sim 935 \text{ kg ha}^{-1}$). Assim também ocorre pelo potencial produtivo da cultura, que pode ser superior a 3.000 kg ha^{-1} , desde que se incremente a irrigação (EMBRAPA, 2009a).

Os dados de estimativa de safras são muito importantes para a economia brasileira, pois permitem um planejamento adequado da economia agrícola, contornando problemas de escassez e administrando, com vantagens, o excesso de produtos. A produção de safras no Brasil, no entanto, ainda é feita de maneira subjetiva, existindo uma carência de informações precisas sobre o quanto será produzido.

Dentro dos sistemas de estimativa de safras, a variável **produtividade** é a mais difícil de determinar, porque depende de vários fatores ambientais (temperatura, radiação solar, condições hídricas e de fertilidade do solo, pragas, doenças etc), das características intrínsecas da cultura, dos tratos culturais, da densidade e da época de plantio, entre outros.

Desses fatores, destaca-se a importância da adubação nitrogenada, considerando-se o manejo adequado desse nutriente um dos mais difíceis (SANTOS et al., 2003). A aplicação de N mineral nos solos tropicais pode resultar, eventualmente, em resposta pouco eficiente pela cultura do feijão (VIEIRA, 1998; PIASKOWSKI et al., 2001). Dessa forma, técnicas de manejo que possibilitem maximizar a absorção de N pelo feijoeiro são de extrema importância, em razão do alto custo dos fertilizantes nitrogenados e das suas perdas por lixiviação, que podem representar riscos ao ambiente, pela contaminação de mananciais de água (SANTOS et al., 2003).

Outro fator importante são as exigências hídricas: o feijão necessita de, no mínimo, 300 a 500 mm de água acumulada durante o ciclo (FANCELLI, 2004), para manifestar seu potencial produtivo, dispensando a necessidade de utilizar-se a irrigação. O estresse hídrico implicará a redução da taxa fotossintética, o que resultará na perda de produtividade e na maior susceptibilidade às pragas e às doenças.

Acredita-se que as estimativas de produtividade se possam melhorar por meio da introdução de dados de sensoriamento remoto, uma vez que, nesses dados, a resposta espectral das culturas agrícolas é resultado do efeito conjugado de todos esses fatores. O uso dessa tecnologia para a agricultura, frequentemente, tem, como objetivo, medir componentes de dosséis vegetais por meio de sensores. Sabe-se, no entanto, que o emprego de imagens de satélites para estimar a produtividade das culturas requer estudos mais detalhados, a fim de entender as relações existentes entre o que é extraído das imagens de satélites e como está a planta no momento da coleta dos dados. Dessa forma, destaca-se a importância de se realizarem as coletas radiométricas diretamente em campo, por meio de experimentos controlados, para observar o efeito isolado de uma ou mais variáveis que interfiram na produtividade da cultura.

Os dados radiométricos coletados por esses sensores podem ser transformados em índices de vegetação hiperespectrais, que se relacionam com os aspectos biofísicos da vegetação. Para a avaliação dos espectros de reflectância hiperespectrais, novas metodologias de análise, que consideram feições contínuas e individuais dos espectros, vêm sendo desenvolvidas (KRUSE, 1994; MEER, 2000; SHI et al., 2003, 2004). A técnica da remoção do contínuo (CLARK; ROUSH, 1984) permite acentuar essas feições, reduzir os efeitos externos e identificar elementos. Além disso, o método permite determinar as características de absorção de cada banda (MEER, 2000).

Nesse sentido, o presente trabalho tem, por objetivo, analisar, em condições de campo, o efeito de lâminas de irrigação e de doses de nitrogênio sobre o comportamento espectral da cultura do feijão, a partir de medidas de reflectância hiperespectral, na faixa de 350 a 1150 nm, e da correlação entre os parâmetros biofísicos e as variáveis agrônômicas da cultura, nessas condições.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar os principais parâmetros agronômicos da cultura: produtividade de grãos, altura de plantas, índice de área foliar, número médio de vagens por planta e número médio de grãos por vagem;
- Avaliar a contribuição de índices hiperespectrais na estimativa das variáveis biofísicas da cultura do feijão, sendo utilizado o índice NDVI e NB_NDVI;
- Identificar o melhor estágio vegetativo da cultura do feijão para estimar as variáveis biofísicas;
- Avaliar o potencial do método da remoção do contínuo do espectro de reflectância;
- Identificar as profundidades e as áreas das bandas de absorção da clorofila (550 – 800 nm) na estimativa das variáveis biofísicas da cultura do feijão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura do feijão

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pertence à família botânica *Fabaceae*, comumente denominada leguminosa, que apresenta uma grande diversificação genética e morfológica, devido ao elevado número de variedades e cultivares. Como planta anual, seu ciclo varia entre 90 e 100 dias, dependendo da cultivar (ROSELEM; MARUBAYASHI, 1994). Para a melhor identificação dos estádios fenológicos, Getps e Fernandez (1982) propuseram as simbologias descritas na Tabela 1.

O feijão do tipo Carioca é o mais produzido no Brasil. A cultivar Pérola, pertencente ao grupo comercial Carioca, apresenta alta produtividade e pouca incidência de pragas e doenças, apresentando-se como uma boa opção para o cultivo.

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

Cada tipo de hábito de crescimento apresenta diferentes intervalos de tempo para as mesmas etapas de desenvolvimento. Da mesma forma, as recomendações técnicas para o espaçamento e a população devem ser peculiares a cada tipo de planta. No caso da cultivar Pérola, o espaçamento recomendado, em função do hábito de crescimento, é 0,45 a 0,50 m entre as linhas, enquanto a população recomendada é de 230.000 a 280.000 plantas por hectare.

A faixa ótima de temperatura do ar, considerada apta para o cultivo do feijão, é de 15 a 29,5°C, considerando-se 21 °C a temperatura média ideal para o seu cultivo (DOURADO NETO; FANCELLI, 2007). Temperaturas elevadas, acima de 35 °C, causam a redução do vingamento das vagens, enquanto baixas temperaturas, em torno de 12 °C, causam a redução do crescimento vegetativo e do florescimento da planta (EMBRAPA, 2003). A ocorrência de tais temperaturas extremas, por mais de quatro dias consecutivos, afeta a produtividade da cultura (ESTEFANEL; SCHNEIDER; BURIOL, 1994).

Tabela 1 - Estádios fenológicos da cultura do feijão e respectivas simbologias

Fase	Estádio	Descrição do início de cada estágio
Vegetativa	V ₀	Instante em que a germinação for iniciada em mais de 50% das sementes
	V ₁	Instante em que os cotilédones de 50% das plantas estiverem no nível do solo
	V ₂	Instante em que as folhas primárias de 50% das plantas estiverem completamente desenvolvidas
	V ₃	Instante em que o primeiro trifólio de 50% das plantas estiverem completamente desenvolvidos
	V ₄	Instante em que o terceiro trifólio de 50% das plantas estiverem completamente desenvolvidos
Reprodutiva	R ₅	Instante em que os primeiros botões florais são observados em 50% das plantas
	R ₆	Instante em que abrir a primeira flor em 50% das plantas
	R ₇	Instante em que são observadas as primeiras vagens em 50% das plantas
	R ₈	Instante em que são observadas as primeiras vagens cheias em 50% das plantas
	R ₉	Instante em que houver modificação da cor das vagens em 50% das plantas (maturação fisiológica)
	R ₉	Instante que é determinado pela taxa de desfolha (maturação de colheita)

Fonte: Getps e Fernandes (1982), adaptado por Fancelli (1994)

O cultivo dessa leguminosa é feito em três safras distintas: a primeira (safra das “águas”), com plantio nos meses de agosto a novembro e colheita de novembro a fevereiro; a segunda (safra da seca ou safrinha), com plantio de dezembro a março e colheita de março a junho, e a terceira (safra de inverno ou irrigada), com plantio de abril a julho e colheita de julho a outubro.

2.1.1 Importância socioeconômica

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), originário da América Central, mais provavelmente da região onde se situa o México, representa uma das principais leguminosas cultivadas e consumidas no mundo, em virtude da sua composição química e do seu alto valor nutritivo. Essa leguminosa assume grande importância social e econômica, principalmente pela geração de empregos na zona rural e urbana, e por ser considerada um alimento quase perfeito, devido ao seu alto teor de proteínas, de fibras e de carboidratos (EMBRAPA, 2009c).

De acordo com estimativas da FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura), até agosto de 2008, os principais países produtores de feijão são aqueles em

desenvolvimento, constituindo-se os Estados Unidos a exceção. Os países em desenvolvimento detêm 89,2% da produção mundial e, entre os continentes, a Ásia é o maior produtor mundial, com 45,7%, seguida das Américas (36,7%), da África (13,9%), da Europa (3,4%) e da Oceania (0,2%). A produção mundial é proveniente de apenas 8 países, que produzem, em média, quase 13 milhões de toneladas, ou seja, 67% de toda a produção mundial de feijão. A produção média, no período de 2002 a 2006, em ordem decrescente, é Brasil, 3,1 milhões de toneladas; Índia, 3,0 milhões de toneladas ; China, 1,9 milhão de toneladas; Myanmar, 1,6 milhão de toneladas; México, 1,3 milhão de toneladas; Estados Unidos, 1,1 milhão de toneladas; Uganda, 483 mil toneladas e Indonésia, 322 mil toneladas (EMBRAPA, 2009a).

Diferentemente de outras culturas, o feijão é, em quase sua totalidade, consumido internamente, não representando uma commodity de exportação significativa.

Segundo dados oficiais, a área agrícola no País totaliza 47,4 milhões de hectares. Desse total, 4,1 milhões de hectares são cultivados com feijão. O feijão só perde para a cultura da soja (21,4 milhões de hectares) e a do milho (14,4 milhões de hectares). A estimativa da área plantada cresceu 3,7% na safra de 2008/2009 e a produtividade da safra anterior foi superada em 6,6%. Esse aumento de área cultivada atribui-se aos preços, extremamente estimulantes ao produtor, aliados ao reajuste de 65,2% no preço mínimo oficial, que entrou em vigor no início da safra 2008/2009, fixado em R\$ 80,00 a saca de 60 kg (CONAB, 2009).

2.1.2 Necessidade hídrica

O emprego da irrigação na cultura do feijão promove aumento substancial de produtividade, atingindo valores que variam de 2.500 a 3.000 kg ha⁻¹, contra 1.400 a 2.000 kg ha⁻¹ em agricultura de sequeiro (EMBRAPA, 2009d). O método empregado na irrigação de culturas anuais, tais como o feijão, é o de aspersão, prevalecendo sistemas de aspersão convencional e por Pivô Central.

O feijão Pérola irrigado apresenta produtividade superior a 3.000 kg ha⁻¹. A produtividade média brasileira de feijão irrigado é de 2.300 kg ha⁻¹. Em condições de sequeiro, o feijão Pérola produz 2.400 kg ha⁻¹, significativamente superior à média brasileira (850 kg ha⁻¹). Produz entre 15 e 20% a mais que a variedade mais cultivada no País (Carioquinha) (EMBRAPA, 2009b).

No entanto o rendimento do feijoeiro é bastante afetado pela condição hídrica do solo. Deficiências ou excessos de água, nas diferentes fases do ciclo da cultura, causam redução na produtividade em diferentes proporções (SILVEIRA; STONE, 2001). O feijoeiro é uma cultura sensível ao déficit de água no solo, sendo esse fator um dos mais limitantes para a obtenção de altas produtividades. Vários estudos com a cultura do feijoeiro têm sido realizados, a fim de otimizar a exploração dessa leguminosa. Para English e Raja (1996), lâminas excessivas, além de onerarem o custo de produção, também prejudicam a cultura, por reduzirem o rendimento desta. Por outro lado, lâminas insuficientes expõem a cultura a condições de deficiência hídrica, reduzindo seu potencial produtivo. Stone e Moreira (2001) e Angulo Filho et al. (2001) trabalharam com diferentes lâminas de irrigação em feijoeiro e observaram que a maior produção da cultura esteve associada a lâminas que elevaram o teor de água do solo, aproximando-o do teor na capacidade de campo, e que, a partir daí, houve correlação entre a queda da produtividade e o aumento da lâmina de irrigação.

Libardi (1996) verificou que a redução da disponibilidade hídrica influenciou diretamente, durante a fase reprodutiva da cultura do feijão, a redução do número de vagens por planta. Também pôde observar que o déficit hídrico, nessa mesma fase, durante 10 e 17 dias, causou redução de 42,6 e 62% no rendimento, respectivamente, quando comparado ao da situação sem déficit hídrico. Frizzone (1986), Fancelli (1987), Libardi e Saad (1994), Paz et al. (1997) e Gomes et al. (2000) também apresentaram resultados semelhantes, concordando que as menores lâminas foram as que propiciaram as menores produtividades de grãos. Para Guimarães, Stone e Brunini (1996), a ocorrência de 15 dias de déficit hídrico na pré-floração, de 18 a 22 dias na floração e de 15 dias na fase de enchimento de grãos, ocasionou uma redução de 20% no rendimento do feijoeiro. Períodos de deficiência hídrica de uma semana, por ocasião do início do florescimento, podem provocar queda de 40 a 50% na produção. Posteriormente à plena fecundação, pode acarretar perdas de 25 a 32% (FANCELLI, 2004).

Embora a fase reprodutiva do feijoeiro seja a mais sensível ao déficit hídrico, na fase vegetativa também ocorre uma redução na produtividade do feijoeiro. O estresse hídrico pode provocar a redução do vigor vegetativo, do índice de área foliar e da altura das plantas, bem como da produção e da fertilidade do pólen (STONE; MOREIRA, 2001). Segundo Doorenbos e Kassan (1979), um feijoeiro com ciclo de 60 a 120 dias, para obter a produtividade máxima, necessita de 300 a 500 mm bem distribuídos de água durante o ciclo e, segundo Stone e Moreira (2001), a

quantidade de água para suprir a demanda durante o ciclo da cultura varia de 300 a 400 mm. Para Guimarães, Stone e Brunini (1996), a obtenção de altas produtividades no plantio de feijão irrigado foi alcançada com aplicações superiores a 400 mm de água. Para Guerra, Silva e Rodrigues (2000), a quantidade de água aplicada para uma produtividade superior a 4.800 kg ha⁻¹ foi em torno de 450 mm. Dourado Neto e Fancelli (2000) destacam que a limitação da produtividade, em função da deficiência hídrica está mais relacionada à distribuição da água, ao longo do ciclo da cultura, do que à quantidade total de chuvas ocorridas no período.

2.1.3 Adubação nitrogenada

A cultura do feijão é exigente em nutrientes, principalmente em decorrência do sistema radicular pouco profundo, além do ciclo curto de 90 a 110 dias (ROSOLEM; MARUBAYASHI, 1994). Devido a esse fato, os nutrientes devem ser aplicados de forma que fiquem próximos ao sistema radicular da planta, para que possam ser absorvidos no momento em que houver necessidade.

Muitos trabalhos demonstram que o nitrogênio (N) é o nutriente absorvido em maior quantidade pelo feijoeiro. Devido à fixação biológica não suprir a demanda da planta, a adubação nitrogenada frequentemente tem proporcionado expressivos aumentos na produtividade do feijoeiro. O N é o elemento da qualidade, fazendo parte da composição das proteínas, portanto seu uso, quando adequado, pode otimizar as produções e os lucros e, ao mesmo tempo, minimizar possíveis efeitos negativos sobre os solos e o meio ambiente. Silva et al. (2000) afirmam que, entre as deficiências nutricionais que ocorrem na cultura do feijão, a de N é a mais frequente, havendo necessidade de se aplicarem doses repositivas desse nutriente.

A deficiência de N proporciona a diminuição do índice de área foliar e da duração de folhas metabolicamente ativas (folhas verdes). Esse fator repercute diretamente sobre a taxa fotossintética, pois haverá uma menor área foliar para absorver a radiação fotossinteticamente ativa. Consequentemente, comprometem-se a produção de matéria seca e o rendimento dos grãos. Contudo o efeito sobre essas variáveis depende do grau da deficiência e do estágio fenológico em que ela ocorre (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Em alguns estados brasileiros, a dose de N recomendada para o feijão relaciona-se aos teores de matéria orgânica do solo, ao histórico da área, à produtividade esperada, ao preço do fertilizante nitrogenado (RAIJ et al., 1996; SOUSA; LOBATO, 2004).

A adubação nitrogenada na semeadura é estipulada de acordo com a época (das águas ou da seca) e com a cobertura antecessora; já a adubação em cobertura é recomendada com base na produção desejada, definida basicamente pelas condições de mercado (preço), pelas condições climáticas e pelo material genético, devendo ser parcelada, quando a cultura for instalada em solo com teor de argila inferior a 30% e a quantidade de nitrogênio a utilizar, superior a 60 kg ha⁻¹ (DOURADO NETO; FANCELLI, 2000).

A aplicação de até 40 kg ha⁻¹ de N na semeadura pode resultar no crescimento vigoroso da planta no início do ciclo (DINIZ et al., 1995); no entanto, recomenda-se que sejam aplicados 2/3 do adubo nitrogenado entre 30 e 45 dias após a emergência (DAE) (MEIRELLES; LIBARDI; REICHARDT, 1980). Para Miyasaka, Freire e Mascarenhas (1963) e Fancelli (1994), a adubação de cobertura não deve exceder, em mais de 40%, a aplicação de semeadura, devendo ser realizada, para o melhor aproveitamento do fertilizante, entre os 15 e os 22 DAE, podendo-se prolongar até os 36 DAE (ROSELEM, 1987). A adubação pode ser parcelada em até duas vezes, fazendo-se a primeira entre os 15 e os 20 DAE e a segunda, até os 35 DAE (ROSELEM; MARUBAYASHI, 1994).

Ao avaliar-se a aplicação de N em cobertura, no cultivo de feijão irrigado no inverno, constatou-se que a produtividade pode ser aumentada com a sua adição e que as doses aplicadas somente na semeadura não foram tão eficientes quanto as aplicadas em cobertura, constituindo a melhor época de aplicação os 25 DAE (AMBROSANO et al., 1996). No cerrado brasileiro, o feijoeiro tem respondido a altas doses de N, quando cultivado sob irrigação por aspersão, no sistema convencional de preparo do solo. Barbosa Filho e Silva (1994) e Stone e Moreira (2001) verificaram resposta positiva do feijoeiro ao N aplicado em cobertura, até a dose máxima testada (120 kg ha⁻¹).

2.1.4 Parâmetros de desenvolvimento da cultura e componentes de produção

O estudo do desenvolvimento foliar é de grande importância para a avaliação do crescimento e do desenvolvimento das plantas, uma vez que as folhas são responsáveis pela fotossíntese e pela formação de carboidratos, alocados para os órgãos vegetativos e reprodutivos da planta (BASTOS et al., 2002).

A variação temporal da área foliar em geral aumenta até um nível máximo, em que permanece por algum tempo, decrescendo em seguida, devido ao processo de senescência. Como

a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será tanto maior, quanto mais rápido a planta atingir o índice máximo de área foliar e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa (PEREIRA; MACHADO, 1987).

Jauer et al. (2003), trabalhando com a cultivar Pérola, encontraram valores médios de IAF de $4,77 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, obtendo-se o valor máximo de $6,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Resultados semelhantes foram verificados por Gomes et al. (2000), em condições irrigadas, sendo os valores máximos de IAF de $7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para a cultivar Negro Argel; $6,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, para a cultivar Carioca, e $8,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para a cultivar A 320. Já Pavani, Lopes e Pereira (2009) encontraram valores máximos de IAF variando entre 3,5 e $4,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Sant'Ana e Silveira (2008), ao avaliarem os efeitos de doses de N, aplicadas em cobertura metade aos 15 DAS, e a outra metade, aos 22 DAS, observaram que o acúmulo de matéria seca e o IAF do feijoeiro foram claramente influenciados pelas doses de N em cobertura.

Considerando que existe correlação significativa positiva entre o acúmulo de massa seca na planta toda e a produção de grãos (URCHEI et al., 2000; SORATTO et al., 2006), quanto menor for a planta e, conseqüentemente, menor for sua parte aérea, menor será a sua produtividade (ARF et al., 2004; SORATTO et al., 2006). Portanto a altura das plantas constitui um importante parâmetro do desenvolvimento da cultura.

Souza et al. (2003), em experimentos com feijoeiro cultivar Pérola e Carioca, obtiveram altura de planta de 92 cm e 70 cm, para a safra das águas e das secas, respectivamente. Meira et al. (2005) testando doses e épocas de aplicação de nitrogênio em feijoeiro irrigado, obtiveram altura média de 80,8 cm. Valério, Andrade e Ferreira (1999), testando três cultivares de feijão, Aporé, Pérola e Carioca, no que diz respeito à melhor combinação de espaçamento entre as linhas e população de plantas, encontraram médias de altura de planta de 36 cm.

O estudo dos componentes de produção, e de suas relações com a produção de grãos, permite prever alterações nos componentes ao longo dos ciclos de seleção. Pode-se dizer que tais componentes determinam o rendimento de grãos (OLIVEIRA et al., 2003).

Rezende et al. (2002), testando a uniformidade de aplicação de água para a cultivar de feijão Iapar, encontraram médias de rendimento de grãos de $2759,1 \text{ kg ha}^{-1}$, número de vagens por planta igual a 10 e número de grãos por vagem de 6,1. Esses parâmetros seguiram a mesma tendência, mostrando que a irrigação mais favorável à cultura foi a caracterizada como de alta uniformidade. Também Rezende et al. (2004) obtiveram produtividade média de 935 kg ha^{-1} para

o cultivo sem irrigação suplementar e 1239 kg ha⁻¹, para a irrigação suplementar. Moreira et al. (1996) perceberam um acréscimo do número de grãos por vagem com o incremento da lâmina de água aplicada.

Souza et al. (2003) em trabalho com componentes de rendimento do feijoeiro, obtiveram médias de número de vagens por planta de 9,3 e 5,3 e número médio de grãos por vagem foi de 3,6 e 2,5, para a safra das águas e a das secas, respectivamente. Testando diferentes populações de plantas, Souza et al. (2004) obtiveram máxima produtividade de 1.357 kg ha⁻¹ enquanto Valério, Andrade e Ferreira (1999) máxima produtividade de 1.672 kg ha⁻¹ com a cultivar Pérola.

Jadoski et al. (2003), em trabalho com manejo de irrigação do feijoeiro, obtiveram uma produtividade de 2.045 kg ha⁻¹ para a cultivar Guapo Brilhante na região de Santa Maria, RS. O número médio de vagens por planta foi de 8,8. Para Silveira et al. (2006), trabalhando com feijão irrigado, a média do número de vagens por planta foi de 10,8. Acosta-Gallegos e Adams (1987) salientam que esse componente de rendimento é determinado na fase inicial do florescimento das plantas, sendo sensível à ocorrência de déficit hídrico nesse período. Ressaltam, também, que o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem são influenciados pela população de plantas. Assim, reduzindo-se a população de plantas, induz-se um aumento desses componentes.

Quanto à adubação nitrogenada, Ferreira (1998) não observou efeito das doses de N sobre os componentes da produção e na produtividade de grãos do feijoeiro, cultivado no período de inverno. Para Rapassi et al. (2003) e Arf et al. (2004), a adubação também não afetou a produtividade de grãos de feijão. Segundo os autores, a falta de resposta à aplicação de N em cobertura deve-se, provavelmente, ao fornecimento do nutriente pelo solo aliado à fixação do N atmosférico por bactérias nativas, pois, mesmo que não tenha sido realizada a inoculação de sementes, verificou-se a presença de nódulos no sistema radicular das plantas de feijão, na área de cultivo.

A resposta da cultura à aplicação de N é controversa. Segundo Soratto et al. (2003), a aplicação de todo o nitrogênio em cobertura proporcionou maior produtividade de grãos de feijão. Esse efeito ocorreu, provavelmente, devido à maior disponibilidade do nutriente na época do florescimento da cultura, que pode ter favorecido o vingamento de vagens, resultando, assim, em maior número de vagens por planta e conseqüentemente, em maior produtividade. Buzetti et al. (1992) observaram que o aumento nas doses de N determinou o aumento linear da produtividade, enquanto Carvalho et al. (2001), estudando o efeito de fontes e de diferentes

parcelamentos do N sobre o feijoeiro de inverno, concluíram que a aplicação de N proporcionou, em média, incrementos de 38% na produtividade da cultura.

2.2 Características e fatores que influenciam a resposta espectral das culturas agrícolas

Segundo Moreira (1997), a maneira como a planta é observada, seja através de sensores, seja através do olho humano, 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 mais contribuem na resposta espectral da vegetação, tendo em vista que, nelas, se realiza quase toda a fotossíntese, ou seja a, transformação de água e gás carbônico em carboidrato. Como a folha é o principal elemento de captação da radiação solar, observa-se uma predominância de área foliar, quando comparada à de outros componentes da planta. Essa predominância destaca-se de tal forma, que outros órgãos, também aptos a realizar fotossíntese, passam a ter menor importância no sensoriamento remoto. O dossel é quase completamente composto por folhas; por isso, elas constituem 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 suas composições química, morfológica e estrutural.

Segundo Formaggio (1989), a extensão do ciclo de uma cultura, para o sensoriamento remoto ótico, pode ser subdividida em três fases fenologicamente distintas: 1^a) predominância do solo nas interações com a radiação eletromagnética – é a fase que envolve a semeadura, a germinação e o desenvolvimento inicial, em que a cultura não recobre totalmente a superfície do solo; 2^a) predominância da cobertura vegetal verde nas interações da cultura com a radiação eletromagnética – neste ponto, já se pode considerar formado o dossel, cobrindo todo o solo; na segunda metade desta fase, ocorre o florescimento e a formação de grãos; 3^a) destacam-se a maturação e a senescência — ocorre o secamento e a queda acentuada das folhas, voltando grande porcentagem do solo a ficar exposta, ocorrendo, assim, o domínio conjugado da vegetação seca e do solo exposto (Figura 1).

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), também chamados de **fatores morfológicos**; os **aspectos de geometria, de iluminação e de visada de cena** (JACKSON; PINTER, 1986; JACKSON et al., 1990; FORMAGGIO; EPIPHANIO; VALERIANO, 1995), como também **os fatores fisiológicos** (BERNARDES,

1987). Os fatores morfológicos referem-se à organização espacial das folhas, ou seja, à densidade da cobertura vegetal, à densidade do plantio, à largura da folha, à distância entre as folhas, à distribuição horizontal e vertical das folhas e ao ângulo de inserção. Já os fisiológicos compreendem aqueles de caráter funcional, ou seja, a idade da planta, o tipo e a espessura das folhas, o conteúdo de água e de nutrientes nas folhas.

Com o trabalho de Huete, Jackson e Post (1985), foi possível afirmar que o solo tem influência na resposta espectral das culturas agrícolas, tanto na fase inicial quanto na final da cultura, fases fenológicas que apresentam baixa porcentagem de cobertura vegetal no solo. Isso também se verifica na fase intermediária do ciclo, principalmente para os comprimentos de onda do infravermelho, que têm maior capacidade de penetração no dossel agrícola.

Figura 1 - Ilustração das três grandes fases do ciclo fenológico de uma cultura agrícola de ciclo curto, quanto aos principais componentes que influenciam a resposta espectral dos dosséis. Fonte: adaptada de Fageria (1989, p. 385) e Formaggio (1989)

2.2.1 Solo

Dentre os fatores do solo que afetam a radiação refletida da superfície, destacam-se a umidade, a textura (proporção de areia, silte e argila), a rugosidade da superfície, a concentração de óxidos de ferro e o conteúdo de matéria orgânica (decomposta ou não) (LILLESAND; KIEFER, 1994). Podem-se acrescentar, também, a mineralogia (estrutura de origem) e a estrutura

do solo, a presença de grandes fragmentos, as sombras e as práticas culturais (HUETE, 1988). A textura, a mineralogia, a presença de óxidos de ferro e o conteúdo de matéria orgânica são considerados como **propriedades intrínsecas**, enquanto os demais fatores, como **condições da superfície**.

De forma geral, a umidade e a cor do solo influenciam muito na reflectância, tanto na região do visível quanto na do infravermelho próximo e médio (KOLLENKARK et al., 1982; HUETE; JACKSON; POST, 1985). Solos úmidos, de coloração mais escura, apresentam uma reflectância menor que os solos secos, de coloração mais clara, na faixa de comprimento de onda de 400 a 2.600 nm (HOFFER; JOHANNSEN, 1969). À medida que a umidade do solo aumenta, a água dos primeiros centímetros superiores do solo começa a absorver seletivamente significativas quantidades de energia incidente, nas bandas de absorção da água, em 1.400 nm, em 1.900 nm e em 2.700 nm. A umidade do solo absorve mais energia radiante incidente nas regiões espectrais adjacentes a essas bandas de absorção. É importante destacar que a quantidade de energia refletida no verde, no vermelho, no infravermelho próximo e no infravermelho médio é severamente reduzida, à medida que a umidade do solo aumenta (HOFFER, 1978). Isso ocorre porque a absorção da radiação eletromagnética aumenta devido à presença da água, fazendo que a reflectância do solo decresça nessa região espectral.

Textura e umidade estão fortemente relacionadas. Solos de textura grosseira são normalmente bem drenados, resultando em um baixo conteúdo de umidade e uma reflectância mais alta; solos com drenagem ruim, de textura fina, geralmente têm reflectância mais baixa. Na maioria das vezes, o solo, quando úmido, tem sua reflectância diminuída pela metade (JACKSON; SLATER; PINTER, 1983).

A composição e o conteúdo de matéria orgânica no solo são fatores de forte influência sobre a reflectância dos solos. À medida que o teor de matéria orgânica aumenta, a reflectância do solo decresce no intervalo de comprimento de onda de 400 a 2.500 nm (HOFFER; JOHANNSEN, 1969). Segundo Baumgardner et al. (1985), a reflectância só sofre influência quando o teor de matéria orgânica contida no solo excede 2,0%, mascarando as características de absorção de outros constituintes do solo.

Os minerais presentes no solo afetam a coloração e outras propriedades espectrais, sendo os mais comuns os minerais de argila, os óxidos e os hidróxidos de ferro, os óxidos de titânio e de alumínio, os silicatos, além dos carbonatos, dos sulfatos e dos fosfatos. Enquanto os óxidos de

ferro e de titânio participam mais intensamente de interações macro e microscópicas com a radiação do visível e do infravermelho próximo, minerais de argila, carbonatos, sulfatos e fosfatos influenciam mais fortemente no infravermelho médio (IRONS; WEISMILLER; PETERSEN, 1989).

A rugosidade (macro e microscópica) atua, imprimindo uma forte componente direcional à reflectância dos solos (BARET; JACQUEMOUND; HANOCQ, 1993), que ocorre mais fortemente em meios com menor transmitância. Isso ocorre porque o lado iluminado da superfície reflete o fluxo na direção da iluminação, tanto de forma difusa quanto especular, deixando o outro lado sombreado (KIMES, 1984).

Os dados multiespectrais coletados sobre os alvos vegetais geralmente representam uma mistura complexa das contribuições espectrais de plantas individuais, de sombras e de solos. À medida que a cobertura do solo se aproxima de 100%, fechando o dossel, as variações diurnas de reflectância diminuem (KOLLENKARK et al., 1982).

2.2.2 Estrutura do dossel

Kimes e Kirchner (1983) e Bernardes (1987) afirmaram que a estrutura do dossel pode ser matematicamente descrita por parâmetros biofísicos, tais como a distribuição das plantas no terreno, a densidade do plantio, o índice de área foliar, a densidade espacial foliar e a distribuição angular das folhas (inclinação e azimute da folha). Essa distribuição espacial dos elementos da vegetação, bem como as suas densidades e orientações, definem a arquitetura do dossel.

No sensoriamento remoto, a estrutura do dossel é de extrema importância, pois descreve como as unidades individuais de espalhamento, absorção e/ou emissão estão posicionadas no dossel; assim, é um fator determinante das transferências radiativas para dentro do dossel (FORMAGGIO, 1989). Todos esses parâmetros estruturais variam, temporal e espacialmente, de acordo com o tipo de vegetação, com o estágio de desenvolvimento e com as condições da cultura (KIMES; KIRCHNER, 1983).

A densidade do plantio proporciona mudanças na resposta espectral do dossel. Algumas culturas, como citrus e café, por exemplo, apresentam dosséis incompletos, mesmo em condições de máximo desenvolvimento. Com isso, a reflectância que chega ao sensor é uma mistura complexa das contribuições espectrais de vegetação iluminada, de solo iluminado, de solo sombreado e de vegetação sombreada (RICHARDSON et al., 1975; JACKSON et al., 1979a;

JACKSON; PINTER JR; IDSO, 1979; KOLLENKARK et al., 1982). A proporção relativa desses quatro componentes varia com a cobertura vegetal, a orientação e o espaçamento das fileiras, a morfologia do dossel, a estrutura interna dos elementos que compõem o dossel, o diâmetro da copa e a altura da planta, o teor de água na planta e no solo, as condições fitossanitárias, o ângulo zenital e azimutal do sol, a latitude e o tamanho do elemento de resolução do equipamento utilizado (KOLLENKARK et al., 1982).

A distribuição angular das folhas promove mudanças na resposta espectral do dossel, devido a diferentes fatores, tais como a proporção de sombras das diferentes folhas, a disposição e a diferença na reflectância das partes dorsais e ventrais das mesmas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Dosséis compostos por folhas dispostas mais horizontalmente (ex: as folhas planófilas de muitas árvores de folhas largas) apresentam uma menor variabilidade na reflectância, em função dos ângulos zenital solar e de visada. Para dosséis compostos por folhas dispostas mais verticalmente (ex: folhas erectófilas de gramíneas), a reflectância decresce com o aumento do ângulo zenital solar na região do visível, enquanto aumenta na região do infravermelho próximo, uma vez que o sensor passa a registrar mais o espalhamento causado pelos elementos do dossel, localizados nas camadas superiores, e menos os componentes das camadas inferiores, que espalham menos a radiação eletromagnética incidente (KIMES, 1984).

Thenkabail; Smith e Pauw (2002) citaram que vegetais de arquitetura foliar planófila, como as leguminosas, contribuem, significativamente, com maior reflectância no infravermelho próximo e com maior absorvância no vermelho, em relação a vegetais de arquitetura erectófila, como as gramíneas. Para Jackson e Pinter Jr. (1986), os elementos de um dossel erectófilo captam a radiação refletida para o interior do dossel, causando uma redução na quantidade de radiação refletida verticalmente em direção a um radiômetro orientado para o nadir.

Dessa maneira, fica evidente que a orientação espacial dos elementos que compõem o dossel, ou melhor, a distribuição angular das folhas exerce grande influência sobre o fator de reflectância do mesmo. Pode-se, então, afirmar que os Fatores de Reflectância são Bidirecionais, quando existem duas geometrias envolvidas no processo de interação entre a radiação eletromagnética e uma dada superfície de um recurso natural, uma caracterizada pelos ângulos zenital e azimutal da fonte (geometria de incidência ou iluminação) e a outra, pelos ângulos zenital e azimutal do sensor (geometria de visada). O fator de reflectância bidirecional espectral é

a razão entre as radiâncias espectrais da amostra e de uma superfície lambertiana ideal nas mesmas condições de iluminação e observação (MILTON, 1987).

O índice de área foliar (IAF), determinado pela relação entre a área foliar verde total da planta (considerando apenas um lado da folha) e a área da superfície do terreno, ocupada pela mesma, tem sido utilizado como parâmetro para estimar a cobertura vegetal. Esse índice permite avaliar a capacidade e/ou a velocidade com que a parte aérea da planta (folhas) ocupa a área de solo disponível à mesma (MAGALHÃES, 1979; LUCHESI, 1987). Da fase inicial de crescimento das culturas até o estágio de completa interceptação da radiação pelas folhas, a taxa de produção de fotossintetizados aumenta até um valor máximo, em função do IAF. Quanto mais rápido a cultura atingir o IAF máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa, tanto maior será a produtividade da cultura (MAGALHÃES, 1979; LUCHESI, 1987).

Segundo Asrar, Kanemasu e Yoshida (1985), o IAF está correlacionado com a fotossíntese do dossel e com o acúmulo de matéria seca em situações em que não predomina o estresse (água, doenças, pragas etc.). Ao longo do ciclo das culturas anuais, o IAF apresenta um comportamento parabólico, com valores baixos no início do ciclo, havendo um crescimento constante dos valores até atingir um pico e, em seguida, uma queda contínua, atingindo valores baixos até o final do ciclo.

Para Formaggio (1989), é evidente que vários fatores externos, como data e densidade de plantio, cultivares, espaçamento entre linhas, precipitação, pragas, entre outros, interferem no desenvolvimento da cultura e isso fica evidente através do IAF, o que torna esse índice um dos principais indicadores do vigor da vegetação agrícola. Segundo Yoshida (1972) e Bernardes (1987), à medida que o IAF aumenta, começa a existir um autossombreamento que as folhas superiores exercem sobre as inferiores e, como consequência, a taxa fotossintética média é diminuída em toda a área foliar.

Kollenkark et al. (1982) concluíram que alguns fatores, como espaçamento, data de plantio e tratamentos culturais, para o feijão, são responsáveis por influenciar na porcentagem de cobertura, na fitomassa e no IAF. Variações nesses parâmetros agrônômicos foram evidenciadas na reflectância do dossel.

2.2.3 Geometria de iluminação e de visada

Em uma superfície lambertiana, ou isotrópica, a radiação eletromagnética é refletida igualmente em todas as direções, independentemente da direção da incidência do fluxo radiante. Entretanto a maioria dos objetos localizados na superfície da Terra não é isotrópica. Portanto, pode-se dizer que as superfícies compostas por vegetação não são lambertianas, ou seja, são anisotrópicas, e a radiação refletida é altamente dependente dos ângulos de visada e de iluminação (JACKSON; HUETE, 1991). Dados adquiridos em diferentes ângulos zenitais e azimutais de iluminação, diferentes orientações e espaçamentos entre linhas, como também em diferentes ângulos de visada do sensor, provocam alterações significativas na reflectância dos dosséis. Além disso, tal comportamento depende do comprimento de onda observado (SUITS, 1972; JACKSON et al., 1979a; KOLLENKARK et al., 1982; JACKSON et al., 1990; GLERIANI, 1994; FERRAZ, 2005).

Para Epiphany e Huete (1995), as variações no ângulo de iluminação alteram a quantidade de vegetação e/ou solo iluminados e sombreados em um dossel (Figura 2). As variações no ângulo de visada alteram a porção de vegetação/solo no campo de visada do sensor, ou seja, modificam as diferentes porções de vegetação, de solo e de sombra integradas no campo de visada do sensor.

Para uma mesma visada sobre um dossel, o gradiente de iluminação entre a camada superior e a inferior do dossel é maior com grandes ângulos zenitais de iluminação, diminuindo à medida que a iluminação se aproxima do nadir. Pode-se dizer que esse efeito é causado pelo sombreamento das camadas superiores sobre as inferiores e ocorre tanto na faixa do vermelho, quanto na do infravermelho próximo. No entanto, como a transmitância das folhas verdes é maior no infravermelho próximo do que no vermelho, o efeito do sombreamento é mais pronunciado na faixa do vermelho (COWELL, 1974; DAUGHTRY; VANDERBITT; POLLARA, 1982; KIMES, 1984; KIMES et al., 1985; JACKSON et al., 1979b; 1990).

Para as fileiras orientadas na direção norte-sul, o solo entre elas é sombreado na parte da manhã, ficando quase totalmente iluminado por volta do meio-dia; assim, a reflectância nas bandas espectrais do visível aumenta até um máximo nesse horário (JACKSON et al., 1979a). Segundo os mesmos autores, a fração de solo iluminado entre as fileiras no sentido leste-oeste tem uma menor variação do que nas fileiras norte-sul (dependendo do espaçamento e da altura das plantas), mostrando, conseqüentemente, uma menor variação na reflectância. Segundo

Jackson; Pinter e Idso (1979); Kollenkark et al. (1982); Lord, 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 se encontram totalmente iluminadas.

O espalhamento múltiplo, que são as múltiplas reflexões que ocorrem dentro do dossel, assim como o efeito do sombreamento, dependem do ângulo de iluminação. Quanto maior o ângulo zenital de iluminação, tanto maior será a facilidade de a radiação penetrar no dossel e encontrar uma camada espessa de folhas, provocando, assim, o aumento da reflectância (JACKSON et al., 1979b), devido à ocorrência do múltiplo espalhamento no interior do dossel (COLWELL, 1974). Para ângulos zenitais de iluminação menores, a radiação intercepta uma camada mais fina de folhas, determinando que a reflectância seja menor (JACKSON et al., 1979b).

Figura 2 – Ilustração do sombreamento de um dossel vegetal incompleto, na orientação norte-sul e coordenadas geográficas 22°42'30" S e 47°38'39" W, às 9:00 a.m. do dia 12 de outubro de 2007 - Piracicaba, SP, 2007

Se o sensor estiver posicionado em direção ao nadir, a radiação será proveniente de diversas camadas do dossel. Já, se a visada for lateral, será observada a maior proporção de componentes da vegetação iluminados diretamente. Sombras dentro da vegetação ou sobre a superfície do solo serão escondidas pela folhagem que é iluminada. Por conseguinte, a reflectância da vegetação tenderá a ser maior nessa situação. Ou seja, ocorre uma tendência a se

obterem maiores valores de reflectância do dossel para maiores ângulos zenitais de visada, em quaisquer ângulos de iluminação. Esse aspecto está relacionado à arquitetura e à densidade do dossel (KIMES, 1984; GLERIANI, 1994; FERRAZ, 2006).

Em dosséis mais homogêneos e com maiores IAFs, a anisotropia da vegetação tende a diminuir. Com o aumento da densidade do dossel, diminuem-se as variações de reflectância, ou seja, a vegetação torna-se mais isotrópica (KIMES et al., 1985). Segundo os mesmos autores, com a variação dos ângulos zenital e azimutal de iluminação, as maiores diferenças de reflectância ocorrem para solos expostos e para as gramíneas com baixa cobertura do solo do que para dosséis homogêneos e completos.

À medida que a vegetação atinge o seu desenvolvimento máximo, o dossel é considerado completo, correspondendo a uma cobertura vegetal próxima a 100%. Entretanto certas culturas, como o café, por exemplo, apresentam dosséis incompletos, mesmo em condições de máximo desenvolvimento: é que, devido ao grande espaçamento entre linhas, a contribuição do solo na reflectância desses dosséis é muito elevada. Segundo Jackson et al. (1979b), para esses dosséis mais esparsos, ocorre uma maior dependência em relação ao ângulo de iluminação, à orientação das fileiras de plantio e à altura das plantas, fatores que influenciam o sombreamento do solo e das próprias plantas do dossel por outras.

Não somente a variação do sombreamento influencia o comportamento espectral de dosséis incompletos, mas também as características espectrais do próprio solo. De modo geral, com a diminuição do ângulo zenital de iluminação, a influência do solo determina que a reflectância do dossel aumente no visível, em que o solo apresenta maior reflectância do que a vegetação, e diminua no infravermelho próximo, em que a reflectância do solo é menor que a da vegetação. Middleton (1991), trabalhando com dosséis incompletos, verificou a diminuição da reflectância na faixa do visível, para aumentos no ângulo zenital de iluminação.

Nesse contexto, fica evidente a dificuldade de estimar uma função de reflectância espectral da vegetação, devido à complexidade dos efeitos da iluminação sobre os elementos do dossel e/ou devido à influência do solo (KIMES, 1984; MIDDLETON, 1991). Entretanto, existem muitos trabalhos com modelagem que, colocando os dados do dossel, como IAF, ângulo de distribuição foliar, altura de plantas, espaçamento entre linhas, entre outros, é possível estimar a reflectância. Os modelos Suits (1972) e SAIL (*Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves*) (VERHOEF, 1984), consagrados em experimentos, calculam a reflectância da vegetação a partir

de variáveis biofísicas e espectrais do dossel e de parâmetros relativos à geometria de iluminação/observação.

Essa dificuldade também pode ser observada em resultados obtidos com índices de vegetação que resultam do comportamento espectral de duas ou mais regiões do espectro eletromagnético. Como os índices de vegetação são obtidos por meio de operações matemáticas normalmente entre as faixas do visível e do infravermelho próximo, é de se esperar que as diferenças entre o comportamento espectral do dossel nessas faixas causem alterações diretas nos resultados desses índices. Dosséis mais homogêneos e solo completamente exposto estão menos susceptíveis às variações nos índices; já os dosséis menos homogêneos e com menor cobertura vegetal estão sujeitos às maiores variações nos índices de vegetação, quando submetidos às diferentes geometrias de iluminação e de visada (MOREIRA, 2000).

2.2.4 Fatores fisiológicos da cultura

As variações nas respostas espectrais permitem diferenciar espécies de plantas e tipos de vegetação. Tais variações são provocadas por características próprias, como espessura, superfície (GAUSMAN, 1985), conteúdo de pigmentos e estrutura interna da folha, que são função das diferenças fisiológicas entre as espécies (GATES et al., 1965). Esses fatores influenciam nas propriedades espectrais das folhas e, por consequência, do dossel. Os sensores remotos registram a reflectância da soma desses efeitos (KNIPLING, 1970).

Moreira (1997) cita alguns fatores que podem afetar as propriedades ópticas da folha e, consequentemente, as respostas espectrais:

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 (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, em razão da degradação das clorofilas, ocorre uma menor absorção da radiação solar e, consequentemente, uma maior reflectância na região do visível. Com o avanço gradativo da

senescência, observam-se a degradação dos carotenos e a morte das células. Nessa fase, ocorre um aumento dos espaços aéreos intercelulares das folhas e, conseqüentemente, a diminuição da reflectância no infravermelho próximo (MOREIRA, 1997);

c) Doenças e pragas: alguns fungos e insetos podem influenciar a assinatura espectral de folhas que infestam.. 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;

d) Nutrientes: sabe-se que a deficiência de nutrientes no vegetal afeta, de forma bastante significativa, as propriedades ópticas das folhas. A deficiência de nitrogênio e magnésio provoca a diminuição na concentração de clorofila e, conseqüentemente, a menor absorção da radiação na região do visível, acompanhada por um acréscimo na reflectância da folha. A deficiência de N provoca clorose, ocasionando um decréscimo da reflectância na região do infravermelho próximo (THOMAS, OERTHER, 1972). Plantas cujas folhas apresentam deficiência de fósforo e cálcio absorvem energia, na região do infravermelho próximo, em índices menores do que plantas com as folhas sem deficiência. Porém, nas folhas deficientes de enxofre e de potássio, a absorção de energia, nessa mesma região do espectro, é maior do que nas folhas supridas desses nutrientes (BAUER, 1975);

e) Conteúdo de água na folha: a absorção da radiação solar pela água é pouco pronunciada na região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm), existindo dois pontos de absorção de água nessa região (centrados em 860 nm e 1240 nm) e menor ainda, na região do visível (400 a 700 nm). Carter (1991) denomina a absorção da radiação, na região do infravermelho próximo, de efeito secundário, porque não pode ser explicado somente pela propriedade absorviva da água, devendo ser incluídas influências de outros componentes das folhas, como os pigmentos e as estruturas celulares. Gates (1980) afirmou que a assinatura espectral de folhas, na região do infravermelho próximo, é o resultado da interação entre a energia incidente e o mesófilo. Assim, fatores externos às folhas, como disponibilidade de água, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nessa região.

2.3 Sensoriamento remoto hiperespectral (SRH)

Atualmente, a maioria dos satélites de observação da Terra possui sensores multiespectrais de bandas largas. Dentre os satélites que se encontram ativos, com aplicações na agricultura, estão: o satélite *LANDSAT-5*, operando com o sensor Thematic Mapper (TM); os satélites *SPOT 2, 4 e 5*, operando com o sensor High Resolution Visible (HRV), High Resolution Visible Infrared (HRVIR); o satélite *Indian Remote Sensing* (IRS), operando com o sensor Linear Imaging Self-Scanning (LISS); o satélite *CBERS-2B*, operando com os sensores Wide Field Imager (WFI) — imageador de amplo campo de visada —, com o High Resolution CCD Câmera (CCD) — câmera imageadora de alta resolução —, com o Infrared Multispectral Scanner (IRMSS) — imageador por varredura de média resolução — e com o High Resolution Camera (HRC) — câmera pancromática de alta resolução; o satélite *Terra* (EOS SER-2), operando com cinco sensores, sendo eles o ASTER — imagens de alta resolução espacial (15 a 90 m), espectral, radiométrica e radiômetro de imagens de 14 bandas, o CERES — é constituído de dois radiômetros para escanear bandas largas, o MISR — instrumento para visualizar a Terra em nove ângulos diferentes. Possui nove câmeras em cada um dos quatro comprimentos de onda. Opera, ainda, com o MODIS — resolução temporal de 1 a 2 dias, cobertura do imageamento de 2.330 km em 36 bandas espectrais, resolução espacial de 250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas) e 1000 m (29 bandas) no nadir, e com o MOPITT — é um instrumento desenvolvido para melhorar o conhecimento da baixa atmosfera e como ela interage com a terra e a biosfera oceânica (resolução espacial 22 km), e o satélite *Aqua* (EOS PM-1), operando com seis sensores, sendo eles: o AIRS — primeiro sondador hiperespectral de radiação infravermelha trabalhando em modo operacional (2.378 canais no infravermelho), o AMSR-E — mede as propriedades das nuvens, a temperatura superficial do oceano, a temperatura do vento, o fluxo de energia radioativa, a superfície da água, do gelo e da neve, o AMSU-A — mede a temperatura e a umidade atmosférica, o CERES — mede o fluxo de energia radioativa, o HSB — equipamento de banda VHF para medir a umidade atmosférica (promovido pelo INPE) e o MODIS — também mede propriedades das nuvens e os fluxos de energia radioativa, além de propriedades das partículas do aerossol, tanto em áreas cobertas quanto em áreas usadas. Para Thenkabail, Smith e Pauw (2002), existem limitações por parte desses sensores em proporcionar dados precisos de características biofísicas, a identificação de espécies vegetais e a produtividade das culturas.

Essas limitações relacionam-se tanto às características dos instrumentos, quanto às resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais.

O conhecimento científico, aliado ao desenvolvimento de novos sensores, capazes de registrar, com maior detalhe, as propriedades espectrais dos alvos na superfície terrestre, além de métodos de análise adequados, que permitem a extração de informações cada vez mais específicas e precisas, têm aperfeiçoado o estudo da vegetação e suas variáveis biofísicas por meio de técnicas de sensoriamento remoto (MÉLÉDER et al., 2003).

Um sensor imageador hiperespectral tem, como vantagem, a capacidade de adquirir imagens com um número muito maior de informações, em relação aos multispectrais (GOETZ et al., 1985; VANE et al., 1993). Tais sistemas possibilitam a construção de um espectro de reflectância praticamente contínuo para cada pixel da cena imageada (Figura 3), pois coletam dados em dezenas ou em centenas de bandas (LILLESAND; KIEFER, 1994; GREEN et al., 1998). Essas características estão relacionadas aos sistemas aerotransportados, de varredura eletrônica, como, por exemplo, o Advanced Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) (GREEN et al., 1998).

Figura 3 – Scanners hiperespectrais (conceito AVIRIS)
Fonte: Green et al. (1998)

O AVIRIS foi desenvolvido pelo Jet Propulsion Laboratory da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em 1983, como o primeiro sistema de imageamento hiperespectral. Tornou-se operacional em 1989, funcionando na faixa espectral de 400 a 2.500

nm, cobrindo, portanto, as regiões do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho médio (MIR), através de 224 bandas espectrais contínuas, cuja largura é de aproximadamente 10 nm. A plataforma atual do sistema AVIRIS é um avião ER-2, que voa a aproximadamente 20 km acima do nível do mar, a uma velocidade aproximada de 730 km h⁻¹. Uma série de novas aplicações dessa tecnologia vem sendo demonstrada, incluindo o mapeamento detalhado de minerais e rochas, da vegetação, da água em todos os seus estados físicos e o estudo de gases e de partículas atmosféricas (NASA, 2009).

O Hyperion foi o primeiro sensor orbital a produzir imagens hiperespectrais da superfície terrestre, sendo transportado a bordo do satélite *Earth Observing One* (EO-1), em uma órbita de 705 km de altitude. O satélite EO-1 foi lançado em 21 de novembro de 2000 e está inserido no “*New Millennium Program*”, conduzido pela NASA (EO-1 USER GUIDE, 2003). O volume de dados coletado pelo Hyperion é aproximadamente 75 vezes maior do que as seis bandas óticas do sensor ETM+ (THENKABAIL et al., 2004).

Cada imagem adquirida pelo sensor Hyperion/EO-1 representa 242 bandas espectrais distribuídas entre as faixas 356 e 2577 nm, ou seja, faixas do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho médio (MIR), com resolução espectral de aproximadamente 10 nm e resolução espacial de 30 m (NASA, 2009).

Na Figura 4, pode-se visualizar a diferença da resolução espectral entre os sensores multiespectrais (ex: TM/Landsat) e hiperespectrais (ex: Hyperion/EO-1). No sensoriamento remoto hiperespectral, numa mesma área, várias imagens (dezenas ou centenas) podem ser obtidas simultaneamente, o que possibilita a extração de um espectro de reflectância praticamente contínuo para cada pixel da cena. Já no espectro obtido pelo sensoriamento remoto multiespectral, não é possível reconstituir adequadamente as bandas de absorção presentes no alvo imageado, limitando as possibilidades de identificação do material.

Figura 4 - Representação esquemática do sensoriamento remoto hiperspectral
 FONTE: Galvão (1994)

O SRH, ao amostrar, de modo contínuo, todo o espectro eletromagnético entre 400 e 2.500 nm, em bandas espectrais estreitas, possibilita a caracterização quantitativa de materiais da superfície terrestre, ao contrário do sensoriamento remoto multiespectral (sensores do tipo Landsat MSS ou TM, SPOT HRV etc.), que utilizam apenas um número reduzido de bandas espectrais, cobrindo intervalos consideravelmente amplos (bandas largas) do espectro eletromagnético (dependendo do sensor, entre 60 e 300 nm de largura). Cada pixel de uma imagem de SRH possui um espectro contínuo associado, o qual representa a assinatura espectral do material superficial ou a mistura de materiais que compõem esse pixel, podendo, portanto, ser utilizado para identificá-lo (CROSTA, 1996).

Um sensor imageador hiperspectral tem um nível de resolução espectral mais próximo daquele verificado em espectrorradiômetros de campo ou de laboratório. Por disso, o surgimento desses sensores é de grande interesse para a agricultura, pois possibilita a aquisição de dados com resolução espectral suficiente para reconstituir bandas de absorção, relacionada aos conteúdos de clorofila na planta, de água nas folhas e de lignina/celulose, que podem ser parâmetros importantes na diferenciação e na identificação das culturas e de suas variedades (PEARLMAN et al., 2003).

Recentes estudos indicam as vantagens do uso de dados obtidos a partir de bandas estreitas, localizadas em regiões específicas do espectro, na obtenção de informações qualitativas

ou quantitativas da vegetação; porém, em apenas alguns deles, foram utilizados dados hiperespectrais oriundos de sensor orbital para o estudo de alvos agrícolas. Dentre os estudos realizados com os dados do sensor Hyperion, destacam-se a detecção de doença foliar em cana-de-açúcar, por meio de índices hiperespectrais (APAN et al., 2004); a discriminação de variedades de cana-de-açúcar, usando os valores de reflectância nas bandas individuais, a razão de reflectância e os índices hiperespectrais (GALVÃO; FORMAGGIO; TISOT 2005); a comparação de dados de sensores multiespectrais com dados do sensor Hyperion, na classificação de florestas (GOODENOUGH et al., 2003; THENKABAIL et al., 2004); a comparação da acurácia de classificações, obtidas pelos dados do sensor Hyperion e pelos dados multiespectrais ETM+/Landsat-7, na discriminação de alvos agrícolas (TISOT et al., 2007), e os efeitos do ângulo de visada, na discriminação de variedades de soja e na relação entre índices de vegetação e produtividade, utilizando dados do sensor Hyperion off-nadir (GALVÃO et al., 2009).

2.3.1 Índices de vegetação

Os índices de vegetação podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais, sendo obtidos pela soma, pela diferença, pela razão ou por qualquer combinação linear da reflectância ou da radiância desses intervalos de comprimento de onda. Tais índices foram desenvolvidos com a finalidade de: maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas; de normalizar ou de modelar efeitos externos (ângulo solar, ângulo de visada e as interferências atmosféricas) e internos (variações no substrato abaixo do dossel, incluindo topografia (declividade), solos (GITELSON et al., 2002) e diferenças quanto à vegetação senescente), que interferem no comportamento espectral das culturas (RUNNING et al., 1994; HUETE; JUSTICE, 1999).

Os índices mais comuns são aqueles provenientes de medidas da reflectância de dosséis da vegetação, nas faixas espectrais do vermelho (absorção de clorofila) e infravermelho próximo (estrutura interna da folha) do espectro eletromagnético. Segundo Baret et al. (1992), a radiação refletida nessas duas faixas espectrais é a mais usada para obter índices de vegetação, devido ao contraste espectral entre o solo e a vegetação e, também, ao fato de a maioria dos sensores, presentes nos satélites, operar nessas faixas espectrais.

Esses índices, obtidos por radiometria de campo, são mais precisos, pois o efeito atmosférico é mínimo, podendo-se considera-lo desprezível. No entanto, quando se utilizam

índices de vegetação obtidos por dados provenientes de sensores a bordo de satélites, o efeito atmosférico deve ser considerado e corrigido. Para Epiphanyo (1989), existem algumas vantagens em se usarem dados de radiometria de campo e, conseqüentemente, índices de vegetação, em estudos das relações biofísicas e espectrais em culturas agrícolas. Algumas delas são, por exemplo, a mínima influência da atmosfera; a utilização de sensores com alta resolução espectral; o controle melhor das relações entre as medidas espectrais e os parâmetros biofísicos, permitido pela pequena distância entre o alvo e o sensor, e a possibilidade de realizar maior número de medidas ao longo do ciclo da cultura.

Há muitos índices, e muitos são funcionalmente equivalentes, em termos de conteúdo de informação (PERRY; LAUTENSCHLAGER, 1984), e alguns proveem informações biofísicas singulares (QI et al., 1995). Muitos índices fazem uso da relação inversa entre as reflectâncias no vermelho e no infravermelho próximo, associada com a vegetação verde sadia.

Dentre vários índices, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é o índice de vegetação mais utilizado para determinar dos parâmetros biofísicos das culturas, podendo facilmente correlacionar-se a determinados parâmetros de vegetação, tais como, fitomassa, área foliar, produtividade, atividade fotossintética, porcentagem de cobertura verde, entre outros (ELVIDGE; CHEN, 1995). Trata-se de um índice muito simples, desenvolvido por Rouse et al. (1974), resultante da diferença entre a reflectância do infravermelho próximo (IVP) e a reflectância do vermelho (V), dividida pela soma das duas reflectâncias (TOWNSHEND; JUSTICE; SKOLE, 1994), conforme a eq. (1):

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

em que:

ρ_{IVP} - fator de reflectância obtido na faixa do infravermelho próximo, em nanômetros (nm) ou micrômetros (μm);

ρ_V - fator de reflectância obtido na faixa do vermelho, em nm ou μm .

Vários estudos mostraram a correlação entre o NDVI e os parâmetros biofísicos da vegetação (TUCHER, 1979; GREEN, 1987), para a estimativa da biomassa (ASRAR et al. 1984;

HATFIELD et al., 1985; BROGE; LEBLANC, 2001; BOEGH et al., 2002) e do índice de área foliar (BLACKBURN, 1998; PONZONI, 2001; MESQUITA JR, 2003; WANG et al., 2005). Quando o NDVI, ou qualquer outro índice de vegetação, passa a ser utilizado com dados hiperespectrais (HALL; HUEMMIRICH; GOWARD, 1990; MILLER; HARE; WU, 1990; BARET et al., 1992), são chamados de *índices de vegetação hiperespectrais*.

O número relatado de índices de vegetação espectrais é elevado e eles se agrupam em três categorias: (1) índices intrínsecos, (2) índices ajustados ao solo e (3) índices ajustados à atmosfera (RONDEAUX; STEVEN; BARET, 1996; BARET; GUYOT, 1991). Daughtry et al. (2000), trabalhando com a estimativa da concentração de clorofila na folha do milho, utilizaram alguns índices de vegetação espectrais, determinados a partir da baixa reflectância nos comprimentos de onda do visível e da alta reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Os autores concluíram que alguns índices de vegetação, como a relação entre o infravermelho próximo e o vermelho, minimizaram as contribuições da reflectância de fundo, enquanto outros, como a relação entre o infravermelho próximo e o verde, responderam mais à concentração de clorofila da folha.

Os autores também observaram que, para o solo e para os resíduos das culturas, os índices OSAVI — “*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*” (ROUNDÉAUX et al., 1996), eq. (2), SAVI — “*Soil Adjusted Vegetation Index*” (HUETE, 1988), eq. (3), NDVI — “*Normalized Difference Vegetation Index*” (ROUSE, et al., 1974), eq. (4) e NIR/Red — “*Simple ratio*” (JORDAN, 1969), eq. (5), apresentaram resultados semelhantes, quanto à minimização das contribuições da reflectância de fundo. Esses índices utilizam bandas correspondentes à máxima absorção da clorofila *a*, centrada em 670 nm, e a região logo após a região “red edge”, onde as características estruturais da vegetação têm maior influência na reflectância (KIM et al., 1994), centrada em 801 nm.

$$OSAVI = (1 + 0,16)(R_{801} - R_{670}) / (R_{801} + R_{670} + 0,16) \quad (2)$$

$$SAVI = (1 + L)(R_{801} - R_{670}) / (R_{801} + R_{670} + L) \quad (3)$$

$$NDVI = (R_{801} - R_{670}) / (R_{801} + R_{670}) \quad (4)$$

$$NIR/RED = R_{801} / R_{670} \quad (5)$$

em que:

L - constante no valor de 0,5, adimensional;

R₆₇₀ - fator de reflectância na banda do vermelho, centrada em 670 nm;

R₈₀₁ - fator de reflectância na banda do infravermelho próximo, centrada em 801 nm.

Stroppiana et al. (2009), obtiveram bons resultados na estimativa da concentração de nitrogênio em plantação de arroz utilizando o índice NDVI $(R_{801} - R_{670}) / (R_{801} + R_{670})$. Bons resultados também foram encontrados por Wu et al. (2008) e Daughtry et al. (2000), na estimativa da concentração de clorofila na cultura do trigo e do milho, respectivamente.

Pesquisas vêm sendo realizadas, com o intuito de determinar as melhores bandas na estimativa de variáveis biofísicas, utilizando-se dados hiperespectrais (RUILIANG PU; BIGING; LARRIEU, 2003). Para o cálculo dos índices de vegetação hiperespectrais, já existem algumas metodologias descritas na literatura, como: a) ótima reflectância de múltiplas bandas estreitas, OMNBR (THENKABAIL; SMITH; DE-PAUW, 2000; THENKABAIL et al., 2004), que é uma técnica estatística para se determinarem-se uma, duas, três, *n*-bandas estreitas que melhor estimam variáveis biofísicas; b) índice de vegetação da diferença normalizada com banda estreita, NB_NDVI (THENKABAIL, SMITH; DE-PAUW, 2000), que é a melhor combinação entre duas bandas para estimarem-se variáveis biofísicas; c) primeira e segunda derivada da reflectância (DEMETRIADES-SHAH; STEVEN; CLARK, 1990), que sugerem ser menos sensíveis às variações do solo e d) quatro índices de derivadas da vegetação verde (CHEN; ELVIDGE; GROENEVELD, 1998; ELVIDGE; CHEN, 1995). A partir das derivadas de reflectância, os autores apresentaram vários outros índices, baseados na integração dessas derivadas na região da borda do vermelho, mostrando serem menos sensíveis às variações de solo, quando comparados aos IVs comuns para a estimativa de variáveis biofísicas.

Thenkabail et al. (2004), ao utilizarem dados hiperespectrais e dados simulados do sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat-7, para classificar diversas coberturas vegetais, relataram que a eficiência da classificação dos dados hiperespectrais foi superior em relação àquela obtida pelos dados do ETM+. Comparando vários índices de vegetação hiperespectrais e multiespectrais, Xavier et al. (2006) observaram que os índices hiperespectrais foram mais eficientes para estimar a produtividade de grãos e a altura de plantas de trigo.

Nos Estados Unidos, dados hiperespectrais são muito utilizados para a caracterização de florestas naturais e existem bibliotecas espectrais para as principais espécies arbóreas que formam as tipologias da vegetação do país (SCHRAMM; VIBRANS, 2007). No Brasil, diferentemente do que ocorre nos Estados Unidos, não existem bibliotecas espectrais ricas em informações devido aos limitados recursos tecnológicos disponíveis. Mesmo diante de tais dificuldades, o Brasil vem desenvolvendo várias pesquisas nessa direção. Shimabokuro et al. (2003) obtiveram bons resultados, ao diferenciarem a floresta primária da floresta secundária em imagens Hyperion, na Floresta Nacional de Tapajós, PA. Outros estudos avaliaram o uso de imagens Hyperion para a discriminação de alvos agrícolas (TISOT et al., 2007; GALVÃO; FORMAGGIO; TISOT, 2005) e também obtiveram bons resultados.

Para Apan et al. (2004), índices de vegetação hiperespectrais coletados pelo sensor Hyperion podem ser utilizados para a detecção de doenças em canaviais. Os autores também destacam, para essa finalidade, o uso de dados do infravermelho médio (1600 nm) na formulação de tais índices.

Dentre os vários índices de vegetação desenvolvidos para se relacionar com variáveis biofísicas, destaca-se o índice de vegetação da diferença normalizada de duas bandas estreitas quaisquer (NB_NDVI; *Narrow Band-Normalized Difference Vegetation Index*) (THENKABAIL, SMITH; DE-PAUW, 2000). Para tal determinação, faz-se o uso da análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas bandas estreitas, de acordo com determinado índice hiperespectral, para estimar-se uma determinada variável biofísica. Os resultados são apresentados por meio de mapas, que mostram os valores de coeficientes de determinação para cada combinação de banda, sendo, então, possível escolher as melhores combinações entre bandas estreitas, assim como a largura da banda (THENKABAIL; SMITH; DE-PAUW, 2000; XAVIER et al., 2006).

2.3.2 Remoção do contínuo

A técnica de remoção do contínuo, proposta por Clark e Roush (1984), permite acentuar feições contínuas e individuais, reduzir os efeitos externos e identificar elementos. Segundo Meer (2000), a remoção do contínuo relacionar-se à determinação das características das feições de absorção, permitindo maximizar as feições espectrais (MUTANGA; SKIDMORE; WIEREN,

2003; HUANG et al., 2004) e determinar as características de absorção de cada banda (MEER, 2000).

A técnica consiste em remover as feições contínuas dos espectros, nos quais o contínuo é uma função matemática, utilizada para isolar bandas de absorção particulares dos espectros de reflectância, permitindo qualificar a análise espectral. A banda do contínuo expressa a absorção ocasionada por diferentes materiais presentes em uma determinada amostra (CLARK; ROUGH, 1984).

Segundo Kruse, Lefkoff e Dietz (1993), a remoção do contínuo é um meio de normalizar espectros de reflectância, para que seja possível a comparação de feições de absorção individuais, a partir de um valor de base comum, ou seja, é uma superfície envolvente, convexa, ajustada à parte superior de uma curva espectral, que utiliza segmentos retilíneos a partir da ligação dos máximos locais da curva. O processo de remoção do contínuo é realizado por meio de uma divisão dentro do espectro, para normalizar as bandas de absorção em uma referência comum, ou seja, os valores de reflectância são normalizados em 1,0, de tal forma, que os pontos dos espectros resultantes sejam ajustados entre o contínuo e os espectros menores que 1,0, onde ocorrem feições de absorção.

A Figura 5 mostra um espectro de reflectância com suas respectivas bandas de absorção e um exemplo da remoção do contínuo e da normalização das bandas de absorção.

A aplicação da técnica de remoção do contínuo no estudo da vegetação permite estimar a concentração de elementos bioquímicos nas folhas (KOKALY; CLARK, 1999; KOKALY, 2001; CURRAN; DUNGAN; PETERSON, 2001; MUTANGA; SKIDMORE; WIEREN, 2003), estimativa de biomassa (MUTANGA; SKIDMORE, 2004) e discriminar espécies florestais (KOKALY et al., 2003; SCHMIDT; SKIDMORE, 2003).

Figura 5 – Representação esquemática da remoção do contínuo: a) Espectro de reflectância com os limites das bandas; b) Banda de absorção antes da remoção do contínuo; c) Banda de absorção com a remoção do contínuo. Fonte: Adaptado de Pu et al. (2003)

Kokaly et al. (2003) aplicaram a remoção do contínuo nas bandas de absorção centradas em 680 nm (clorofila), 980 nm e 1200 nm (água na folha), obtidas pelo sensor AVIRIS, nos diferentes tipos de vegetação do Parque Nacional Yellowstone, e compararam com uma fotografia aérea do local. Concluíram que a técnica foi muito eficiente na discriminação dos diferentes vegetais do parque.

Mutanga e Skidmore (2004), trabalhando com a espécie de capim *Cenchrus ciliaries*, aplicaram a remoção do contínuo na faixa espectral entre 550 e 750 nm (banda de absorção da clorofila) e calcularam o NDVI a partir de bandas estreitas, referentes às regiões do vermelho e do infravermelho. Os resultados da análise da profundidade de banda, como também do NDVI, foram comparados com as informações de biomassa, ou seja, foi feita a correlação entre esses dados. Concluiu-se que as análises de profundidade da banda podem estimar a quantidade de fitomassa de maneira mais precisa, em relação aos resultados do NDVI.

Alvarenga (2004) aplicou a remoção do contínuo em espectros de trigo, com diferentes doses de adubação nitrogenada, com o objetivo de analisar a profundidade das bandas centradas em 672, 980 e 1195 nm. Também foram calculados os índices espectrais NDVI, NDWI e WI. Os resultados mostraram que as análises das profundidades da banda foram eficientes em mostrar que o N afetou o comportamento espectral da cultura nos 3 comprimentos de onda estudados e que as menores profundidades de banda foram detectadas nas menores doses de N enquanto, as maiores, na maior dose de N. Os resultados da análise de profundidade da banda e dos índices de vegetação foram relacionados com parâmetros biofísicos. Os melhores resultados dessa análise de regressão, entre os índices estudados e a produtividade de grãos, foram para o WI.

Breunig et al. (2007) utilizaram análises de profundidade da banda, de largura da banda, de assimetria e de área da banda para discriminar as variações espectrais, nas bandas de absorção dos dosséis de trigo, tratados com diferentes dosagens de N. Concluíram que, por meio da técnica de remoção do contínuo, foi possível diferenciar os três tratamentos de N, apresentando o parâmetro *área* os melhores resultados, diferenciando os tratamentos nas três bandas de absorção analisadas. Além disso, esse parâmetro, possibilitou inferir que ocorre um aumento da absorção de energia, com o aumento da dosagem de N.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

Esta pesquisa foi conduzida em condições de campo, no setor experimental de agricultura irrigada da Fazenda Areão, sob a responsabilidade do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – DER/ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba, SP, nas coordenadas geográficas 22° 42' 30" S e 47° 38' 39" W e à altitude aproximada de 576 m.

Segundo a classificação internacional de Köppen, o clima da região é do tipo mesotérmico C_{Wa}, ou seja, clima subtropical úmido, com estação chuvosa no verão e estiagem no inverno, com precipitação pluviométrica média anual de 1.247 mm, temperatura média do ar de 21,6 °C, umidade relativa do ar média de 74% e velocidade do vento média de 2,2 m s⁻¹.

Os dados climáticos referentes ao período do experimento, de setembro a dezembro de 2007 (Tabela 2), foram obtidos na estação meteorológica da Fazenda Areão, localizada a 30 m de distância da área experimental.

Tabela 2 - Valores médios mensais de radiação global (RG), temperatura (T), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2 m de altura (U₂) e precipitação mensal (P). Dados registrados no período do experimento, de setembro a dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

Meses	RG (cal cm ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	UR (%)	U ₂ (m s ⁻¹)	P (mm)
Setembro	451,4	22,7	69,0	1,6	1,9
Outubro	480,6	24,0	74,1	1,5	87,6
Novembro	472,7	22,2	85,3	1,7	120,5
Dezembro	532,8	23,9	83,9	1,3	179,1

Este trabalho constituiu-se de três etapas. Na primeira, no mês de junho de 2007, foram realizados testes preliminares de laboratório, como a análise química, para identificar a concentração dos elementos contidos no solo da área experimental, além de outras características de interesse, como pH, a acidez total, a soma de bases, a capacidade de troca de cátions e a saturação por bases. A análise físico-hídrica também foi realizada, com o objetivo de determinarem-se a composição granulométrica, a densidade do solo, a curva de retenção de água

no solo, a condutividade hidráulica saturada e a umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

Na segunda etapa, de 4 de setembro a 4 de dezembro de 2007, foram executados os trabalhos de preparo do solo, de semeadura, de acompanhamento e de coleta de dados durante o ciclo do feijão. O ciclo compreendeu 92 dias, desde a semeadura até a colheita.

Na terceira e última etapa, logo em seguida às colheitas, procedeu-se às medições dos parâmetros quantitativos da cultura, descritos no item 3.7.

3.2 Caracterização do solo

O solo da área experimental foi classificado, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido pela Embrapa (1999), como Nitossolo Vermelho Eutrófico, A moderado, textura argilosa, profundo e permeável, apresentando textura argilosa em todo o perfil, com um incremento de argila no horizonte B.

Para a caracterização química do solo, foram coletadas amostras, cerca de três meses antes da instalação do experimento, nas profundidades de 0,0 m - 0,20 m; 0,20 m - 0,40 m, e encaminhadas para análise, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Com base nos resultados, procedeu-se à interpretação da análise química do solo, conforme Alvarez et al. (1999) e Tomé Júnior (1997).

Tabela 3 - Características químicas do solo da área experimental: pH, fósforo (P), matéria orgânica (M.O.), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez total (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V) – Piracicaba, SP, 2007

Profundidades	pH CaCl ₂	P	M.O.	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
(m)	-	(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(mmol _c dm ⁻³)						(%)
0 – 20	5,3 ^m	16 ^m	21	4,5 ^m	42 ^a	9 ^a	34	56	90	62 ^a
20 – 40	5,4 ^m	9 ^{mb}	10	1,3 ^{mb}	35 ^m	11 ^a	31	47	78	60 ^m

Legenda: Interpretação para solos: mb - muito baixo; b - baixo; m - médio; a - alto; ma - muito alto

Para a caracterização física do solo, foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0,0 – 0,20 m, 0,20 – 0,40 m, e também encaminhadas para análise. Os resultados das determinações estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Características físicas do solo da área experimental: umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), densidade do solo (Ds), argila, silte, areia – Piracicaba, SP, 2007

Profundidades (m)	CC ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	PMP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	Ds (kg dm^{-3})	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Textura
0,00 - 0,20	0,4148	0,3472	1,49	36	37	27	argiloso
0,20 - 0,40	0,4193	0,3491	1,46	52	28	20	argiloso

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

As variáveis independentes de estudo desta pesquisa foram duas: lâminas de água (4 lâminas) e adubação nitrogenada (3 doses). Os tratamentos com lâminas de água foram $I_1 = 17,5\%$ da intensidade de aplicação do aspersor (I_{asp}); $I_2 = 187,5\% I_{asp}$; $I_3 = 417,5\% I_{asp}$ e $I_4 = 525\% I_{asp}$, o que corresponde às intensidades $I_1 = 0,35 \text{ mm h}^{-1}$, $I_2 = 3,75 \text{ mm h}^{-1}$, $I_3 = 8,35 \text{ mm h}^{-1}$ e $I_4 = 10,5 \text{ mm h}^{-1}$. Ao final do ciclo da cultura, essas intensidades de aplicação conduziram às lâminas aplicadas de 179,5 mm, 256,5 mm, 357,5 mm e 406,2 mm, já somadas a precipitação efetiva e a lâmina inicial de estabelecimento da cultura. A I_{asp} (a ser descrita no item 3.5), era igual a $2,0 \text{ mm h}^{-1}$, quando operada na pressão de serviço recomendada pelo fabricante (35 mca). Vale salientar que, até o 21º dia após a semeadura (DAS), a lâmina aplicada, em todos os tratamentos, foi igual, de maneira a estabelecer um perfil uniforme de desenvolvimento das plantas no estágio inicial da cultura. Outra lâmina que foi computada para todos os tratamentos foi a lâmina oriunda da precipitação pluvial no período do ciclo do feijoeiro. O valor da precipitação efetiva, para o período, foi de 129,9 mm. As doses de nitrogênio utilizadas foram: testemunha (0 kg ha^{-1}), 80 kg ha^{-1} e 160 kg ha^{-1} . As duas últimas foram aplicadas de forma parcelada (a ser descrita no item 3.4).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas (Tabela 5), alocando-se, nas parcelas, os tratamentos relacionados aos níveis de irrigação (4) e, nas subparcelas, os tratamentos com doses de nitrogênio (3), totalizando 12 tratamentos em cada bloco. Como os tratamentos foram dispostos em 4 blocos (repetições), o total de parcelas experimentais foram 48 (Figura 6). Cada parcela experimental apresentava uma área útil de, aproximadamente, $7,0 \text{ m}^2$, sendo 3,2 m de comprimento e 2,2 m de largura, já descontados os valores de 0,4 m para cada lado, como bordadura.

Tabela 5 - Esquema da Análise da Variância. Experimento conduzido de setembro a dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

Causa da Variação	Graus de Liberdade (GL)
Blocos	3
Lâminas de irrigação (I)	3
Resíduo A	9
Doses de nitrogênio (N)	2
I x N	6
Resíduo B	24
Total	47

Figura 6 – Croqui da área experimental: T1– 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N0); T2– 179,5 mm e N1=80 kg ha⁻¹; T3– 179,5 mm e N2=160 kg ha⁻¹; T4– 256,5 mm e sem N0; T5– 256,5 mm e N1=80 kg ha⁻¹; T6– 256,5 mm e N2= 160 kg ha⁻¹; T7– 357,5 mm sem N0; T8– 357,5 mm e N1=80 kg ha⁻¹; T9– 357,5 mm e N2=160 kg ha⁻¹; T10– 406,2 mm e sem N0; T11– 406,2 mm e N1=80 kg ha⁻¹; T12– 406,2 mm e N2=160 kg ha⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007

3.4 Condução da cultura

A cultura utilizada nesta pesquisa foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Pérola (linhagem LR 720982 CPL53), tipo carioca. A semeadura foi realizada manualmente, no dia 04 de setembro de 2007, com a orientação das fileiras no sentido norte-sul. A emergência das plantas ocorreu aos seis dias após a semeadura e a colheita aos 92 e aos 102 DAS, para os tratamentos que receberam maiores quantidades de água (T7, T8, T9, T10, T11 e T12) e menores quantidades de água (T1, T2, T3, T4, T5, T6), respectivamente. Aos 15 dias após a semeadura foi realizado o desbaste, com o intuito de deixar o plantio uniforme. O espaçamento adotado foi de 0,50 m entre linhas e 14 plantas por metro linear, correspondendo a uma densidade de plantio de 280.000 plantas por hectare. As sementes foram previamente tratadas com inseticida, fungicida e com o adubo foliar, conforme recomendações técnicas para doses e produtos adequados ao feijão. A profundidade de semeadura foi de 0,03 m da superfície do solo.

A adubação de semeadura foi de 600 kg ha⁻¹ de superfosfato simples e 120 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, aplicada a 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. A fonte de N utilizada em cobertura foi o sulfato de amônio, aplicado manualmente a uma distância lateral de 0,20 m da linha da cultura. As adubações de cobertura foram realizadas aos 7 e aos 27 dias após a emergência (DAE), correspondente aos estádios V2 e V4, respectivamente.

Foram realizadas remoções de ervas daninhas, por meio de herbicidas, de maneira que a cultura esteve sempre isenta de competidoras. O controle das plantas indesejadas foi realizado aos 11 DAE do feijão, utilizando-se herbicidas seletivos e sistêmicos, recomendados para o controle de plantas daninhas de folhas largas e de folhas estreitas.

O controle de pragas e doenças ocorreu por tratamento preventivo, com a aplicação de defensivos agrícolas, conforme a recomendação técnica para as doses e os produtos adequados à cultura do feijão.

3.5 Sistema e manejo da irrigação

A aplicação de água foi realizada com o auxílio de um sistema de irrigação por aspersão, disposto no campo segundo o sistema de “aspersão em linha” (*Line Source Sprinkler Ssystem*), de acordo com a metodologia desenvolvida por Hans et al. (1976). O sistema foi idealizado para fins experimentais e consiste na colocação de aspersores em uma única linha no centro da área experimental (Figura 7).

Figura 7 – Sistema de irrigação por aspersão em linha (*Line Source Sprinkler System*) – Piracicaba, SP, 2007

A sobreposição dos jatos e o arranjo dos aspersores em uma única linha promovem maior precipitação junto à linha de aspersão e um gradiente decrescente ao longo da direção perpendicular da área, sendo este efeito denominado-se esse efeito de “distribuição triangular da precipitação”.

A localização das parcelas experimentais ao longo da direção perpendicular à linha de aspersores, permite a obtenção de diferentes lâminas aplicadas, simulando, desse modo, diferentes lâminas de irrigação, realizadas por um sistema convencional de aspersão.

No experimento, foram utilizados 7 aspersores, com duplo bocal de 3,50 mm x 2,50 mm operando a uma pressão de 35 mca (pressão de serviço recomendada pelo fabricante) e com espaçamento de 6,0 m, produzindo um raio de alcance de 12,0 m e uma intensidade de aplicação (I_{asp}) de 2,0 mm h⁻¹. Conforme a disposição das parcelas experimentais e o arranjo dos aspersores previamente descrito, e com base em testes realizados com coletores de precipitação, foi possível determinar a lâmina de irrigação a aplicar em cada tratamento.

Para o controle do manejo da irrigação e da lâmina aplicada, foram instaladas baterias de tensiômetros, nas profundidades de 0,15 e 0,30 m, em cada tratamento de irrigação.

Fez-se, ainda, a estimativa da evapotranspiração da cultura, para orientar o manejo da irrigação e o conhecimento do consumo de água pela cultura, confrontando-a com a lâmina total aplicada durante o período experimental, em cada nível de irrigação. Para a estimativa, foram realizados os seguintes procedimentos: 1) coleta dos dados de temperatura média, máxima e mínima, da umidade relativa do ar média, máxima e mínima, da velocidade do vento a 2 m de altura e da radiação líquida e global, a partir da base de dados meteorológicos da estação

automática da Fazenda Areão da ESALQ/USP, situada a 30 m da área experimental. Por meio de sensores acoplados a um coletor de dados CR-21X, em conjunto com um conversor de sinal e transmissor/receptor de dados RF95 e UHF RECEIVER DL-3410, foi possível a coleta de informações pela comunicação dos sinais, via rádio, com o Laboratório de Aquisição de Dados do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP. Foram coletados, também, os dados meteorológicos, para o mesmo período, da Estação Automática do Posto Meteorológico do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP. Para confrontar os valores e ter maior precisão deles, foram coletados, ainda, os dados diários de evaporação do Tanque Classe “A” situado a 30 metros da área experimental; 2) estimativa do fluxo de calor no solo, da pressão de saturação de vapor, da pressão parcial de vapor e da declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, a partir dos dados coletados nas estações meteorológicas; 3) estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0), pelo método de Penman-Monteith - Padrão FAO (ALLEN et al., 1998), eq. (6), utilizando-se os dados da estação meteorológica da Fazenda Areão e da ESALQ. Utilizou-se o valor de $0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a constante psicrométrica. A estimativa da ET_0 foi realizada, também, a partir dos dados de evaporação do Tanque Classe “A”, conforme a eq. (7); 4) estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) do feijão, eq. (8), a partir da ET_0 estimada pelas três maneiras adotadas e utilizando valores de coeficiente da cultura (K_c) sugeridos na Tabela 6.

$$ET_0 = \frac{0,408s(R_n - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (6)$$

em que :

ET_0 – evapotranspiração de referência, em mm dia^{-1} ;

R_n – radiação líquida, em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$;

G – fluxo de calor no solo, em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$;

γ – constante psicrométrica, em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

T – temperatura média do ar, em $^\circ\text{C}$;

U_2 – velocidade do vento a 2 m de altura, em m s^{-1} ;

e_s – pressão de saturação de vapor, em kPa ;

e_a – pressão parcial de vapor, em kPa ;

s – declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

$$ET_0 = Ev K_p \quad (7)$$

em que:

Ev – evaporação diária do tanque classe “A”, em mm dia⁻¹;

K_p – coeficiente de tanque, adimensional.

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (8)$$

em que:

ET_c – evapotranspiração da cultura, em mm dia⁻¹;

K_c – coeficiente da cultura, adimensional.

Tabela 6 – Valores de coeficiente de cultivo da cultura (K_c) do feijão para as condições brasileiras

Estádio fenológico (F.A.O) ¹	Termina quando há	K_c ²
I	10% do desenvolvimento vegetativo	0,3 a 0,4 ⁽³⁾
II	80% do desenvolvimento vegetativo	0,7 a 0,8
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 Valores médios

³ Menores valores de K_c devem ser utilizados para umidade relativa superior a 70 % e velocidade do vento inferior a 5 m s⁻¹

3.6 Distribuição de água no solo

Fez-se o monitoramento da armazenagem, da umidade e do movimento da água no solo a partir de tensiômetros instalados (conforme item 3.5) nas parcelas experimentais. O início das leituras tensiométricas deu-se aos 17 DAS, o que correspondeu a 5 dias antes do início da diferenciação das lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos. As leituras dos tensiômetros foram realizadas diariamente, pela manhã, entre 8 e 9 horas, utilizando tensímetro de punção (medidor digital da tensão). Os valores das leituras foram convertidos em potencial mátrico de água no solo (φ_m), utilizando a eq. (9): posteriormente, por meio dos parâmetros do modelo descrito por Van Genuchten (1980), eq. (10), obtidos através das curvas de retenção de água no solo, como descrito na Tabela 7, determinaram-se os respectivos teores de umidade.

Em laboratório, para obterem-se as curvas de retenção de água no solo das camadas de 0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m (Figura 8), foram utilizadas as mesas de tensão de 10, 20, 40 e 100 cm, e a panela e a membrana de pressão, para as tensões de 100, 300, 500, 1.000, 5.000, 10.000 e 15.000 cm. Os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (Tabela 7), que descrevem as curvas de retenção de água no solo, foram obtidos a partir do programa RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (Van GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991).

$$\varphi_m = L_t + h_c \quad (9)$$

em que:

φ_m – potencial mátrico de água no solo, em cm.c.a.;

L_t – leitura no tensímetro de punção, em cm.c.a.;

h_c – pressão equivalente à altura da coluna de água no tensiômetro, cm.c.a..

$$\theta[\varphi_m] = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha |\varphi_m|)^n\right]^m} \quad (10)$$

em que:

$\theta[\varphi_m]$ - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensional;

α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em cm^{-1} ;

φ_m - potencial mátrico, em cm.

Tabela 7 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) e dos parâmetros (α , n e m) do modelo de van Genuchten para o solo utilizado no experimento – Piracicaba, SP, 2007

Camada (m)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α	m	n
0 – 0,20	0,580	0,220	0,1749	0,3057	1,440
0,20 – 0,40	0,550	0,255	0,1572	0,2549	1,3485

Figura 8 – Curvas de retenção de água no solo, ajustadas pelo modelo de van Genuchten, para as profundidades de 0,10 e 0,30 m – Piracicaba, SP, 2007

3.7 Produtividade da água (PA)

Os valores de PA , em kg m⁻³, foram determinados pela relação entre o rendimento da cultura (RC), em kg ha⁻¹, e a quantidade de água aplicada (L) nos tratamentos, ou a relação entre o rendimento da cultura e o consumo hídrico estimado da cultura (conforme item 3.5), ou seja, a quantidade de água evapotranspirada pela cultura em todo o ciclo, conforme as equações abaixo, eq. (11).

$$PA = \frac{RC}{L} \quad \text{ou} \quad PA = \frac{RC}{ET_c} \quad (11)$$

em que:

PA – produtividade da água ou eficiência do uso da água, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1}$;

RC – produtividade da cultura, em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$;

L – quantidade de água aplicada na irrigação durante o ciclo da cultura, em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$;

ET_c – evapotranspiração da cultura estimada para o ciclo total, expressa em mm;

3.8 Parâmetros de desenvolvimento da cultura

Foram analisados, ao longo do ciclo da cultura, alguns aspectos morfológicos das plantas, como o índice de área foliar (IAF) e a taxa de crescimento da altura da planta.

3.8.1 Índice de área foliar

As estimativas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas aos 21, 28, 37, 59, 77, 82 e 89 DAS, por meio de um método indireto e não-destrutivo, utilizando-se o equipamento *Plant Canopy Analyzer*, modelo LAI-2000, da LI-COR (1992) (Figura 9), Inc. Lincoln, Nebraska, EUA. Esse método é rápido, prático e eficiente, otimizando operacionalmente a estimativa do IAF, reduzindo o tempo e a dificuldade inerentes aos métodos diretos.

Figura 9 – Equipamento Plant Canopy Analyzer, modelo LAI-2000

O equipamento é constituído por duas unidades:

a) a unidade de controle (LAI-2070): possui um microprocessador interno, que coleta as medidas e realiza os cálculos de IAF, com uma memória de 16 Kb para trabalho e uma memória RAM de 64 Kb para armazenagem de dados. Os dados são transferidos para o computador através de uma interface serial RS-232;

b) o sensor óptico (LAI-2050): nesse sensor, uma lente projeta a radiação no interior do instrumento, sendo depois refletida por um espelho na direção dos detetores de silício, arranjados em formas de anéis concêntricos. Desse modo, a radiação incide em cada um dos anéis em cinco ângulos zenitais diferentes (7° , 23° , 38° , 53° e 68°), obtendo-se uma medida quantitativa da radiação penetrante no dossel, não se fazendo necessária a coleta de dados em vários horários do dia.

Como o sensor coleta a radiação solar difusa, que chega acima e abaixo do dossel da cultura, nos cinco diferentes ângulos simultaneamente, o IAF é estimado através da atenuação da radiação nesses diferentes ângulos. O procedimento de campo consistiu na realização de uma medida externa, na área acima do dossel da cultura, seguida de seis medidas internas (abaixo do dossel da cultura), em cada parcela experimental, de acordo com a tabela fornecida pelo manual do instrumento. As medidas internas foram tomadas ao longo das entrelinhas centrais de cada parcela, com o sensor sempre na mesma direção. Conforme a recomendação para plantios comerciais, a tomada de medidas em seis posições ao longo das linhas de plantio ocorreu da seguinte maneira: uma dentro da linha, outra entre as linhas de plantio e as três restantes, nas linhas centrais de cada parcela, para evitar que as mesmas plantas dominem a resposta. Tanto para as medidas externas, quanto para as internas, foi utilizada uma máscara de 45° para a cobrir a lente do sensor óptico, que direciona ou restringe a entrada da radiação, com o objetivo de evitar interferências indesejáveis, como, por exemplo, a influência do corpo do operador, ou a das plantas de parcelas vizinhas. Tal procedimento foi adotado para as 48 parcelas.

Segundo o manual do equipamento, recomenda-se seu uso com o céu nublado, com radiação difusa, para que haja pouco espalhamento da radiação eletromagnética pelas folhas. Em dias claros o espalhamento é maior, aumentando o espalhamento abaixo do dossel e subestimando o IAF. Quando as condições eram de céu claro, as medições foram realizadas em horários em que não havia radiação direta no equipamento, ou seja, no início do dia ou no final da tarde, quando o ângulo de elevação solar é baixo.

Ao final de cada coleta, os dados de IAF, armazenados pelo LAI-2000, foram transferidos para o computador e transcritos para uma planilha.

3.8.2 Taxa de crescimento da altura da planta (*TCAP*)

A altura foi obtida com uma trena, medida do colo da planta (considerando-se, como referência, o nível do solo) até a inserção do último nó superior da planta. As leituras foram realizadas em três plantas da área útil de cada parcela, sendo a média entre elas, o valor considerado da parcela.

A taxa de crescimento da altura da planta (cm dia^{-1}) foi obtida nos seguintes intervalos do ciclo: da semeadura aos 18 DAS; dos 18 aos 26 DAS; dos 26 aos 37 DAS; dos 37 aos 49 DAS; dos 49 aos 69 DAS e dos 69 aos 76 DAS. Para o primeiro intervalo, a *TCAP* foi obtida dividindo-se a altura da planta pelo número de dias de crescimento. Para os intervalos seguintes, a determinação da *TCAP* ocorreu com base na eq. (12).

$$TCAP = \frac{ALT_{(n)} - ALT_{(n-1)}}{D_{(n)} - D_{(n-1)}} \quad (12)$$

em que :

TCAP – taxa de crescimento da altura da planta, em cm dia^{-1} ;

$ALT_{(n)}$ – altura da planta no dia $D_{(n)}$ do ciclo da planta, em cm;

$ALT_{(n-1)}$ – altura da planta no dia da leitura anterior, ($D_{(n-1)}$), em cm;

$D_{(n)}$ – dias após a semeadura correspondente à data de leitura da altura da planta, em dias;

$D_{(n-1)}$ – dias após a semeadura correspondente à data da leitura anterior da altura da planta, em dias.

3.9 Componentes de produção

Foram analisados, após a colheita, os principais aspectos produtivos da cultura, tais como a produtividade dos grãos, o número médio de vagens por planta e o número médio de grãos por vagem.

3.9.1 Produtividade dos grãos

Foi obtida a partir da massa de grãos colhidos na área útil da parcela (7,0 m²) e, posteriormente, transformada em kg ha⁻¹ e corrigida para 12% de umidade, segundo a metodologia indicada por Azevedo (1984).

3.9.2 Número médio de vagens por planta

Foi determinado a partir do somatório de vagens de cinco plantas da área útil da parcela, escolhidas aleatoriamente, e o resultado, dividido por cinco (número de plantas), conforme a metodologia adotada por Loureiro, Machado e Denículi (1990).

3.9.3 Número médio de grãos por vagem

Contaram-se os grãos de dez vagens, colhidas ao acaso, das plantas da área útil da parcela e, posteriormente, o resultado foi dividido por dez (número de vagens). Os grãos foram obtidos das vagens utilizadas para a estimativa do item anterior (LOUREIRO; MACHADO; DENÍCULLI, 1990).

3.10 Parâmetros biofísicos da cultura

3.10.1 Levantamento dos dados radiométricos

As medições radiométricas foram realizadas, aproximadamente, a cada 10 dias, ou quando as condições do tempo eram favoráveis, isto é, em dias completamente livres de nuvens, conforme recomendado por Moreira (1997). Desse modo, obtiveram-se medidas radiométricas entre as 11 horas da manhã (11:00) e a 1 hora da tarde (13:00), em que o solo estava quase totalmente iluminado (JACKSON et al., 1979a), em sete datas ao longo do ciclo da cultura, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Datas das coletas radiométricas e os respectivos estádios fenológicos

Data da medição	Fase	Estádio	Descrição do estágio fenológico*
18/set/2007	Vegetativa	V2	Folhas primárias completamente desenvolvidas
29/set/2007	Vegetativa	V3	O primeiro trifólio completamente desenvolvido
10/out/2007	Vegetativa	V4	O terceiro trifólio completamente desenvolvido
29/out/2007	Reprodutiva	R6	Abertura da primeira flor
18/nov/2007	Reprodutiva	R8	Primeiras vagens cheias
23/nov/2007	Reprodutiva	R9	Modificação da cor das vagens (maturação fisiológica)
30/nov/2007	Reprodutiva	R9	Taxa de desfolha (maturação de colheita)

* A descrição de todos os estádios fenológicos refere-se a características observadas em 50% das plantas

O equipamento utilizado foi o espectrorradiômetro portátil SPECTRON SE-590, especialmente projetado para operações de medição radiométrica de campo. O aparelho contém duas unidades básicas uma controladora (coletor de dados/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 (Figura 10), também denominada de cabeças sensoras, foi ajustada para os campos de visada (*Field of View*, FOV), de 6° e 15°. A unidade detectora permite a medição de espectros de radiância na faixa de 350 a 1100 nm, com uma resolução espectral de aproximadamente 3 nm e informações sobre as características radiométricas do alvo em 252 bandas.

Figura 10 – Unidade detectora: cabeças sensoras de 15° (esquerda) e de 6° (direita) e placa de sulfato de bário

Figura 11 – Unidade controladora

A unidade controladora (Figura 11) possui um microprocessador que permite programar o sistema, através de um teclado multifuncional, para a aquisição de espectros simples, bem como permite introduzir indicadores, tais como data, hora e número de identificação, nos dados adquiridos. Esses dados são transferidos, através de uma porta serial RS-232C, diretamente para o computador.

As unidades detectoras estão ligadas à unidade controladora por cabos de conexão e permitem registrar dois espectros de forma quase simultânea, correspondendo um deles à radiância de uma amostra da área sobre o dossel da cultura (alvo) e o outro, à radiância da placa de referência (Sulfato de Bário) (Figura 10). As medidas da radiância, do alvo e da placa (par de medidas radiométricas) são utilizadas para obter o fator de reflectância.

Para as coletas, utilizou-se um mastro de alumínio desmontável, em forma de L invertido, com 3,0 m de altura e alcance de 0,9 m (Figura 12). Uma placa, contendo as duas unidades detectoras, foi fixada na extremidade da parte horizontal do mastro, através de um sistema de acoplamento rápido. Essas unidades foram montadas com seus eixos ópticos orientados de forma paralela, posicionando-se uma em direção ao dossel da cultura, com o campo de visada de 15°, e a outra, sobre a placa de referência (Sulfato de Bário) 15 cm abaixo da unidade detectora com campo de visada de 6° (Figura 10).

Para facilitar a movimentação do equipamento no campo, foi utilizado um carrinho, projetado especialmente para a situação. A unidade controladora, o microcomputador e as duas baterias auxiliares (uma para a unidade controladora e a outra para o microcomputador) foram transportados em cima desse carrinho (Figura 13) por um operador, enquanto outro operador manuseava o mastro com a unidade detectora.

Figura 12 – Coletas de dados radiométricos no campo

Figura 13 – Carrinho de mão para leitura de campo, contendo: unidade controladora, microcomputador e duas baterias

Para a realização das leituras, adotaram-se os seguintes procedimentos, de acordo com Steffen (1988):

1) 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);

2) Em seguida, a placa de referência foi redirecionada para a unidade detectora de 6°, aí permanecendo até o final da coleta dos dados;

3) O mastro foi posicionado em um local predeterminado de leitura, de forma que as medidas da reflectância do dossel do feijão fossem obtidas em dois locais diferentes e intercaladas com as medidas da placa de referência, numa mesma parcela. O FOV do ângulo nadiral de visada 0° possui o diâmetro de 0,79 m, o que equivale a uma área de 0,49 m².

Ao final das coletas radiométricas, foram observados quatro espectros para cada parcela, sendo dois da cultura e dois da placa de referência. Após o procedimento de campo, realizaram-se as análises dos dados, para gerar o fator de reflectância (FR) representativo de cada parcela. Os espectros dos FR podem ser visualizados na forma de gráfico, no qual, no eixo das abcissas (x), se observa o comprimento de onda (350 a 1100 nm de forma contínua), enquanto, no eixo das ordenadas (y), se observa o fator de reflectância, em %.

3.10.2 Índices de vegetação

De modo geral, emprega-se, no cálculo do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), o fator de reflectância (FR) das bandas do vermelho (630-700 nm) e do infravermelho próximo (760-900 nm). O FR médio, representativo de cada parcela, foi calculado por meio do programa “ESPECTRO”, cujo procedimento é o seguinte: a) a calibração dos dados, que consiste em dividir a medida da radiância, obtida sobre o dossel do feijão, pela medida da radiância da placa de referência, chegando-se, assim, ao FR de cada ponto amostral; b) a intercalibração, que consiste em dividir o FR calibrado pelo fator de calibração da placa de referência, com o objetivo de corrigir as diferenças de sensibilidade de resposta entre as duas unidades detectoras, e c) a obtenção do fator de reflectância médio, cujo objetivo é adquirir uma informação espectral mais representativa do dossel, e que tornou necessária a obtenção da média das medidas intercalibradas, para obter uma única curva espectral do FR de cada parcela.

Para a avaliação das variáveis biofísicas do feijão, após a obtenção dos valores de FR relativos às 252 bandas, foram utilizados dois índices de vegetação: NDVI e NB_NDVI. O cálculo do NDVI foi baseado no trabalho de Daughtry et al. (2000), em que esse índice utiliza o FR das bandas correspondentes à máxima absorção da clorofila *a*, centrada em 670 nm, e a reflectância na região do infravermelho próximo, centrada em 801 nm.

$$NDVI = (R_{801} - R_{670}) / (R_{801} + R_{670}) \quad (13)$$

em que:

R_{670} - fator de reflectância na banda do vermelho, centrada em 670 nm;

R_{801} - fator de reflectância na banda do infravermelho próximo, centrada em 801 nm.

Para o NB_NDVI, foi utilizado o modelo de regressão linear (Eq. 14), tendo, como variável independente, o NB_NDVI que é a diferença normalizada entre duas bandas estreitas quaisquer (THENKABAIL; SMITH; DE-PAUW, 2000).

$$B = a_0 + a_1 NB_NDVI_{ij}, \quad (14)$$

em que:

B - variável biofísica do feijão;

a_0 e a_1 – parâmetros do modelo;

NB_NDVI_{ij} – combinação de bandas estreitas, em que i e j igual a 1, 2, 3 ... 252

$$\text{Sendo que: } NB_NDVI_{ij} = \frac{NB_i - NB_j}{NB_i + NB_j}$$

em que:

NB_i e NB_j – correspondente à i -ésima e à j -ésima banda do Spectron, é a reflectância de cada banda estreita i, j ($i=j=1, \dots, n$, sendo $n=252$, número de bandas estreitas).

Para o cálculo do NB_NDVI (*Narrow Band Normalized Difference Vegetation Index*) (THENKABAIL; SMITH; DE-PAUW, 2000), usou-se a análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas bandas estreitas, de acordo com determinado índice hiperespectral, para estimar uma determinada variável biofísica. Nesse modelo, para cada coleta, foram realizadas 31.626 análises de regressão, o que equivale, nas 7 coletas, a um total de 221.382 análises de regressão. Essa simulação foi feita por meio do programa MatLab (MATLAB-MATH WORKS, 2002), que verifica, para cada estágio de crescimento da cultura, a combinação entre duas bandas estreitas que fornece os maiores valores de R^2 . Os resultados de R^2 são apresentados por meio de mapas de isolinhas, sendo então possível escolher as melhores

combinações entre bandas estreitas, assim como a largura da banda (THENKABAIL; SMITH; DE-PAUW, 2000; XAVIER et al., 2006, 2007).

Foram escolhidas, então, as regiões espectrais que apresentaram os melhores resultados, assim como o melhor estágio fenológico, com base nos valores e na frequência de ocorrência do R^2 .

3.10.3 Remoção do contínuo e análise da área e profundidade da banda de absorção

A remoção do contínuo pode ser definida como uma superfície convexa, ajustada à parte superior de uma curva espectral, que utiliza segmentos de reta a partir da ligação dos máximos locais da curva (MUTANGA; SKIDMORE, 2004). Portanto os valores máximos de reflectância da banda de absorção são normalizados em 1,0, de tal forma, que os demais pontos dos espectros resultantes sejam ajustados entre a linha do contínuo, com valores resultantes menores que 1,0, em que ocorrem feições de absorção.

A técnica de remoção do contínuo foi aplicada nos espectros de reflectância da cultura do feijão, em todas as datas de coleta (Tabela 7), em todas as parcelas. Foi selecionada apenas uma banda de absorção da radiação eletromagnética (REM), sendo ela, a banda de absorção da clorofila, com intervalo entre 550 e 800 nm. Esse intervalo foi selecionado por ser bem definido e por oferecer informações relevantes ao estudo espectral da vegetação. A banda de absorção da clorofila, por exemplo, mostra fortes relações com a biomassa, o conteúdo de clorofila e, até mesmo, o conteúdo de nitrogênio nas folhas. Esses são alguns dos motivos pelos quais muitos índices de vegetação utilizam, entre outras, essa faixa espectral (DAUGHTRY et al., 2000; KOKALY et al. 2003; MUTANGA; SKIDMORE, 2004).

Para realizar a remoção do contínuo foi utilizado o software MatLab (MatLab-Math Works, 2002). Nesse mesmo software, foram calculadas as profundidades e as áreas da banda de absorção. Assim, para a banda de absorção da clorofila (550 a 800 nm), o comprimento de onda utilizado, para verificar a profundidade da banda, foi de 665 nm, o que corresponde ao local de máxima absorção da radiação (KOKALY et al., 2003).

Para o cálculo da profundidade de banda P_d , utilizou-se a Eq.(15) (KOKALY; CLARK, 1999; NOOMEM; MEER; SKIDMORE, 2005).

$$Pd = (1 - \rho_{CR\lambda}) \quad (15)$$

em que: $\rho_{CR\lambda}$ é o fator de reflectância com o contínuo removido.

A área da banda de absorção (A_p) foi calculada pela aproximação numérica dada pela Eq. (16) (PU et al., 2003).

$$A_p = \sum_{i=m}^M \frac{(\rho_i + \rho_{i-1})}{2} (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad (16)$$

em que: A_p é a área da banda de absorção, i representa o intervalo de cálculo do limite inferior m ao limite superior da banda (M).

3.11 Análise estatística dos dados

Os dados foram interpretados a partir da análise de variância, respeitando-se o delineamento experimental adotado e, por tratar-se, neste experimento, de investigação de variáveis quantitativas (lâminas de irrigação e doses de nitrogênio), foi testada a análise de regressão para os modelos linear e polinomial de segundo grau, empregando-se o teste F ($p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$). Utilizou-se, para essas análises, o programa “SAS System for Windows-release 6.11” (SAS, 1996).

Para a regressão entre variáveis biofísicas, os modelos de regressão testados foram o linear, o polinomial de segundo grau e o potencial. Escolheu-se o modelo com base na significância dos coeficientes de regressão, em nível de 5% de probabilidade pelo teste F, no maior coeficiente de determinação (R^2) e, também, no significado biológico dos resultados estatísticos.

Para se conhecer a relação existente entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e a reflectância, nos determinados comprimentos de onda, realizou-se uma correlação entre tais fatores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Temperatura e umidade relativa do ar

A Figura 14 mostra a variação da temperatura (máxima, mínima e média) do ar, durante o ciclo do feijão, que compreendeu, entre a semeadura e a última colheita, um intervalo de 92 dias. O valor médio da temperatura máxima do ar foi 30,3 °C; já o valor médio da temperatura mínima foi 16,5 °C, no período experimental. A faixa ótima de temperatura do ar, considerada apta para o cultivo do feijão, é de 15 °C a 29,5 °C (DOURADO NETO; FANCELLI, 2007). Essa faixa determina condições para os melhores desenvolvimento e produção da cultura. Portanto, durante todo o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro, as temperaturas máxima e mínima estiveram bem próximas ao recomendado. Sob altas temperaturas, acima de 35 °C, a cultura sofre, dentre outros fatores, a redução do vingamento de vagens, enquanto em temperaturas mais baixas, em torno de 12 °C, ocorre a redução do crescimento vegetativo e do florescimento (EMBRAPA, 2003). As temperaturas acima de 30 °C podem não prejudicar o desenvolvimento vegetativo, mas provocam aceleração no processo de respiração, podendo causar o abortamento das flores. Quando essas altas temperaturas ocorrem na época de floração, o feijoeiro apresenta-se vigoroso, contudo sem a produção esperada (GONÇALVES et al., 1997). Em apenas 8,7% dos dias do experimento, a temperatura máxima esteve acima de 35 °C e, em apenas um dia, a temperatura mínima ficou abaixo de 12 °C (Figura 14). Segundo Estefanel, Schneider e Buriol (1994), a ocorrência de quatro dias consecutivos com valores de temperatura máxima do ar, igual ou superior a 30 °C, pode afetar a produtividade da cultura. Portanto, neste experimento, pôde-se observar que as temperaturas máximas diárias foram alcançadas em dias não-consecutivos, o que mostra que a cultura não sofreu influência negativa da temperatura.

A temperatura média do ar foi de 23,0 °C, durante o período experimental. Os valores médios da temperatura não excederam, em nenhum dia, o valor de 28 °C e estiveram sempre superiores a 16 °C (Figura 14). Segundo Dourado Neto e Fancelli (2000), a temperatura média ideal para a cultura do feijão corresponde a 21,0 °C. Isso reforça que, durante o período experimental, essa variável climática não foi um fator limitante, pelo contrário, foi um fator preponderante no desenvolvimento das plantas. Ferraz (2005), trabalhando com a mesma cultivar, no mesmo local, de 14 de março a 27 de junho de 2005, encontrou valores de temperatura máxima, mínima e média de 28,1 °C, 15,8 °C e 21,2 °C, respectivamente.

Figura 14 – Variação da temperatura diária (máxima, mínima e média) do ambiente, durante o período experimental, compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007– Piracicaba, SP, 2007

A Figura 15 ilustra a variação da umidade relativa (UR) do ar (máxima, mínima e média), registrada no ambiente. Observa-se que a média da UR máxima foi de 98,7% e frequentemente igual a 100%. A UR mínima e médias diárias foram, em média, de 45,4% e 75,8%, respectivamente. Ferraz (2005) encontrou valores de 100%, 53,5% e 85,6% para as UR do ar máxima, mínima e média, respectivamente, no mesmo local no entanto, no período de março a junho de 2005.

Longos períodos de alta umidade relativa do ar (superior a 80%), em torno de 10 a 18 horas, juntamente com temperaturas moderadas (entre 17 e 27 °C), podem ocasionar as principais doenças da parte aérea do feijão (DOURADO NETO; FANCELLI, 2007). Mesmo sendo observado, neste experimento, que a umidade relativa do ar esteve elevada na maior parte do ciclo da cultura, não foi detectado nenhum tipo de doença na cultura.

Figura 15 – Variação da umidade relativa (UR) do ar diária (máxima, mínima e média) do ambiente, durante o período experimental, compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

4.2 Evapotranspiração da cultura e lâminas aplicadas

Conforme a metodologia descrita no item 3.5, que trata do sistema e do manejo da irrigação, a evapotranspiração da cultura (ET_c) foi estimada de três formas, a partir de três distintas estimativas de evapotranspiração de referência (ET_o): 1) a partir dos dados meteorológicos da estação automática da Fazenda Areão da ESALQ/USP, situada a 30 m da área experimental, pelo método de Penman-Monteith – Padrão FAO; 2) a partir dos dados meteorológicos da estação automática do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP, pelo método de Penman-Monteith – Padrão FAO, e 3) a partir de dados diários de evaporação do tanque Classe “A”, situado a 30 m da área experimental. O valor do coeficiente da cultura (K_c) variou com os estádios fenológicos e os valores utilizados nas três formas de estimativa da ET_c foram iguais (descritos no item 3.5). Observa-se que a variação da ET_c no ciclo da cultura, a partir das três metodologias aplicadas, apresentou valores e tendência semelhantes (Figura 16). No entanto, ao se analisar a ET_c total acumulada, relativa ao período do ciclo do feijoeiro, observa-se que a estimativa total, para os dados da estação meteorológica da Fazenda Areão, foi inferior aos valores obtidos pelos dados da estação da ESALQ e do Tanque Classe “A”. A

estimativa da ETc no final do ciclo foi de 250,8 mm, 297,6 mm e 307,7 mm para os dados da Fazenda Areão, da ESALQ e do Tanque Classe “A”, respectivamente.

Figura 16 – Evapotranspiração da cultura (ETc) do feijão estimada a partir de três fontes de dados distintas, durante o período experimental (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

A lâmina de água aplicada no estágio inicial da cultura (até 21 DAS) foi igual para os tratamentos (Figura 17), no valor de 38,3 mm. Nesse período, não houve precipitação pluviométrica. A partir desse dia, o sistema de irrigação em linha foi instalado, com a disposição de apenas 1 linha de aspersores, situada na porção central da área experimental, de maneira que, a partir de 22 DAS, ocorreu a diferenciação entre as lâminas de água aplicadas. Portanto, durante o período compreendido entre o 23^o e o 48^o DAS, as lâminas de água aplicadas totalizaram os valores de 11,3 mm, 88,3 mm, 189,3 mm e 238,0 mm, para os tratamentos I₁, I₂, I₃ e I₄, respectivamente. É interessante ressaltar que, após os 48 DAS, adveio um período, em torno de 25 dias, em que ocorreram precipitações efetivas consideráveis e, por esse motivo, não houve necessidade de irrigação. Computando a precipitação efetiva total durante o ciclo do feijoeiro (129,9 mm) à lâmina aplicada em cada tratamento e, adicionando a lâmina de água aplicada no estágio inicial da cultura (até os 21 DAS), de 38,3 mm, cada tratamento recebeu, durante os 92

dias de ciclo da cultura, uma lâmina de água, respectivamente, de: $I_1 = 179,5$ mm; $I_2 = 256,5$ mm; $I_3 = 357,5$ mm e $I_4 = 406,2$ mm (Figura 17).

Figura 17 – Lâminas de água aplicadas nos 4 tratamentos e estimativas da ETc diária, a partir de três fontes de dados distintas, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

A maior lâmina aplicada, de 406,2 mm, está próxima das relatadas por Guerra, Silva e Rodrigues (2000) e Rocha, Guerra e Azevedo (2003), de 450 e 460 mm, respectivamente, em

Planaltina, DF. Stone et al. (2006) utilizaram lâminas totais de água de 460,4 e 437,7 mm, no primeiro e no segundo ano, respectivamente, num ciclo de 99 e 92 dias.

Tomou-se como base, para as futuras análises e comparações com as lâminas de água aplicadas, a ETc estimada a partir da ETo proveniente dos dados da Fazenda Areão, por se tratar da estação meteorológica situada mais próxima à área experimental, a cerca de 30 m de distância. Além disso, a metodologia de Penman-Monteith - Padrão FAO (ALLEN et al., 1998), para a estimativa da ETo, é considerada padrão pela comunidade científica internacional. Dessa forma, considerando os valores de Kc para cada estágio fenológico, o consumo hídrico da cultura do feijão, no período experimental, compreendido entre o dia 4 de setembro e 4 de dezembro de 2007 (92 DAS), foi 250,8 mm. Com base no consumo hídrico da cultura, observou-se que apenas a lâmina de água aplicada no tratamento I₁ (179,5 mm) sofreu déficit (Figura 18).

Figura 18 – Lâminas de água aplicadas nos 4 tratamentos e ETc estimada pelos dados fornecidos da estação meteorológica da Fazenda Areão, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

Apesar do déficit total climatológico da cultura no tratamento I₁, já esperado devido ao opção do sistema de irrigação ao manejo adotados, não ocorreu déficit de umidade na zona radicular do feijoeiro, como evidenciaram as leituras dos potenciais mátricos medidos no solo e descritos no item 4.3, que trata da distribuição da água no solo.

A maior e a menor ETcs diárias foram 6,6 e 0,2 mm, respectivamente, registradas aos 57 e aos 84 DAS. A ETc média diária foi 2,7 mm. Valadão e Klar (1996), trabalhando com a mesma cultura, na região de Botucatu-SP, encontraram um consumo hídrico médio de 348 mm e 3,75 mm dia⁻¹. Para Santos e André (1992), a evapotranspiração foi de 317,3 mm para a semeadura realizada em janeiro, na cidade de Piracicaba. Ferraz (2005), no mesmo local e no período de 14 de março a 27 de junho de 2005, encontrou uma necessidade hídrica do feijão de 126 mm, equivalente à evapotranspiração estimada da cultura. O baixo valor encontrado no trabalho deste autor, provavelmente, deve-se às condições climáticas inerentes à época do experimento, que, comparadas ao período deste trabalho, apresentaram 2 °C abaixo na temperatura máxima e média, além de 5 e 6 MJ m⁻² dia⁻¹ a menos na radiação global e líquida, respectivamente. Outro aspecto que justifica a diferença na evapotranspiração da cultura é que, enquanto, naquele trabalho, a umidade relativa média do ar (UR) foi 85,6%, neste trabalho foi 75,8%. Segundo Stone e Moreira (2001), as áreas aptas à produção de feijão devem apresentar precipitações anuais entre 500 e 1500 mm, porém a quantidade de água para suprir a demanda durante o ciclo da cultura varia de 300 a 400 mm, dependendo da capacidade de retenção de água no solo. Pesquisas desenvolvidas por Doorenbos e Pruitt (1977) mostram que o requerimento total de água para o cultivo do feijão está na faixa de 400 a 600 mm.

Em termos de volume, cada planta recebeu, em média, a quantia de 6,9 L, 9,9 L, 13,9 L e 15,8 L de água, nos tratamentos I₁, I₂, I₃ e I₄, respectivamente, nos 92 dias de cultivo. Ferraz (2005), trabalhando com o mesmo feijão, no mesmo local, no período de 14 de março a 27 de junho de 2005, com uma única lâmina de água aplicada na área experimental, encontrou um consumo médio de 5,3 L de água por planta, num ciclo de 106 dias.

4.3 Distribuição de água no solo

De maneira geral, com base no monitoramento da umidade do solo (via tensiômetro), observa-se que todos os tratamentos referentes às lâminas de irrigação estiveram, em todo o ciclo da cultura, em boas condições de umidade, tanto na camada de 0,0 a 0,20 m (Figura 19), como na de 0,20 a 0,40 m (Figura 20), contrariando, de certa forma, o monitoramento climatológico para a lâmina I₁, que apontou um déficit de água entre o aplicado e o evapotranspirado.

Observa-se que, na camada de 0,0 a 0,20 m, desde o início do monitoramento tensiométrico (17 DAS) até os 37 DAS, quando a cultura se apresentava nas primeiras fases de

desenvolvimento, somente nas lâminas I_3 e I_4 a umidade do solo se manteve próxima à capacidade de campo (CC), enquanto nas lâminas I_1 e I_2 , a umidade oscilou, chegando a atingir a umidade no ponto crítico (PC - ponto de reinício das irrigações), o que retardou o crescimento das plantas, fato este perceptível visualmente na área experimental. A partir dos 37 DAS, a umidade do solo nas parcelas que recebiam as lâminas I_1 e I_2 apresentou considerável recuperação e permaneceu próxima à CC até os 76 DAS, enquanto nas lâminas I_3 e I_4 , a partir dos 37 DAS, houve redução da umidade do solo, mais intensamente na lâmina I_3 , chegando a atingir o PC. No entanto, em ambas as lâminas, recuperou-se a umidade aos 47 DAS, por causa das altas lâminas aplicadas nesses tratamentos e pelo início de um período de precipitações computáveis e disponíveis às raízes das plantas.

Figura 19 – Variação da umidade volumétrica na camada de solo de 0 a 0,20 m, para as quatro lâminas de água aplicadas, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

Após os 76 DAS, foi possível perceber a redução de umidade em todos os tratamentos, em face do término do período chuvoso e, como a cultura já se apresentava num estágio avançado de maturação, com quantidades significativas de vagens formadas, não se efetuou mais nenhuma irrigação. Com uma leve chuva aos 83 DAS, a umidade, em todos os tratamentos, retornou à CC e, em seguida, reduziu-se levemente nos últimos dias do ciclo da cultura, a partir dos 87 DAS até os 92 DAS.

Na camada de 0,20 a 0,40 m (Figura 20), em todos os tratamentos, os valores de umidade flutuaram sempre próximos à capacidade de campo (CC), mais precisamente, entre o PC e a CC, demonstrando a melhor distribuição de água no solo nessa camada, durante o ciclo da cultura.

A umidade do solo não atingiu o ponto de murcha permanente (PMP) em nenhuma das situações (tratamentos e camadas do solo), em nenhum momento do ciclo da cultura, evidenciando que a cultura não sofreu danos fisiológicos significativos relacionados à falta de água. Entretanto, as reduções na umidade do solo, em momentos-chave do ciclo da cultura reduziram o seu potencial produtivo, fato comprovado pelas lâminas I₁ e I₂, quando dos estádios iniciais de crescimento vegetativo e do sistema radicular (entre 17 e 37 DAS).

Figura 20 – Variação da umidade volumétrica na camada de solo de 0,20 a 0,40 m, para as quatro lâminas de água aplicadas, durante o ciclo do feijoeiro (92 dias), compreendido entre 04 de setembro e 04 de dezembro de 2007 – Piracicaba, SP, 2007

4.4 Produtividade da água (PA)

Os valores de PA estão expressos na Tabela 9, em termos da quantidade produzida por unidade de água aplicada (179,5 mm nos tratamentos T1, T2 e T3; 256,5 mm nos tratamentos T4, T5 e T6; 357,5 mm nos tratamentos T7, T8 e T9, e; 406,2 mm nos tratamentos T10, T11 e T12). As lâminas de irrigação foram convertidas em volume de água aplicada por planta e, a partir da densidade populacional de plantas, foi possível determinar a PA para cada tratamento. Rockström e Barron (2007) consideram importante o uso do conceito de produtividade da água e alertam que, devido à atual política de desenvolvimento adotada no mundo, a pressão sobre os recursos hídricos para a produção de alimentos aumentará, e o consumo de água em 2050 chegará a 5.600 km³ ano⁻¹, três vezes mais que a quantidade de água utilizada na irrigação mundial.

A massa de grãos de feijão produzida por unidade de água gasta (PA) variou de 459,2 a 994,9 g m⁻³ (densidade populacional de 230.000 plantas por hectare), e de 680,3 a 1474,3 g m⁻³ (densidade populacional de 280.000 plantas por hectare) (Tabela 9).

Tabela 9 – Valores médios de produtividade da água (PA), em gramas de grãos por m³ de água aplicada – Piracicaba, SP, 2007

Tratamento	P ₂₃₀ – P ₂₈₀ ¹ (Kg ha ⁻¹)	Consumo por planta ² (L planta ⁻¹)	PA ³ (g m ⁻³)
T1	825,49 - 1004,95	7,80 – 6,41	460,1 – 681,6
T2	823,86 - 1002,96	7,80 – 6,41	459,2 – 680,3
T3	1038,79 - 1264,61	7,80 – 6,41	579,0 – 857,8
T4	2409,72 - 2933,57	11,15 – 9,16	939,6 – 1392,4
T5	2465,07 - 3000,96	11,15 – 9,16	961,2 – 1424,4
T6	2551,37 - 3106,02	11,15 – 9,16	994,9 – 1474,3
T7	3236,09 - 3939,59	15,54 – 12,77	905,4 – 1341,3
T8	3126,12 - 3805,71	15,54 – 12,77	874,6 – 1295,7
T9	2855,84 - 3476,68	15,54 – 12,77	799,0 – 1183,7
T10	2743,50 - 3339,91	17,66 – 14,51	675,4 – 1000,8
T11	2735,36 - 3330,00	17,66 – 14,51	673,4 – 997,8
T12	3274,29 - 3986,09	17,66 – 14,51	806,1 – 1194,4

¹ Produtividade estimada de grãos (PG) para as densidades de plantio de 230.000 e 280.000 plantas ha⁻¹, respectivamente

² Consumo por planta, em litros por planta, para as densidades de plantio de 230.000 e 280.000 plantas ha⁻¹, respectivamente

³ Produtividade da água, em gramas de grãos por m³ de água consumida pela cultura, para as densidades de plantio de 230.000 e 280.000 plantas ha⁻¹, respectivamente

A produtividade da água (PA) aumentou com a lâmina de irrigação até 256,5 mm, reduzindo-se, ao se aumentar-se a lâmina para 357,5 e 406,2 mm. Os maiores valores de PA,

portanto, foram observados na lâmina 256,5 mm, associados à dose de N de 160 kg ha⁻¹ (T6), variando de 994,9 a 1474,3 g de grãos de feijão produzido por m³ de água aplicada. Observou-se, portanto, que o tratamento com a lâmina de 256,5 mm foi o que utilizou mais eficientemente o recurso *água* para a conversão em produtividade. Outro aspecto é que a dose de N de 160 kg ha⁻¹ contribuiu, provavelmente, para o aumento da PA.

A interação entre I e N e as doses de N, isoladamente, não influenciaram a produtividade da água (PA) (Tabela 9), no nível de 5% de probabilidade. Já as lâminas de irrigação influenciaram, no nível de 1% de probabilidade, a PA (Tabela 10). A equação que demonstra a variação da PA, em função das lâminas de irrigação, pode ser vista na Tabela 11.

Tabela 10 - Resumo da análise de variância para a produtividade da água (PA) em função das lâminas de irrigação (I) e das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Valor de F (PA)
I	3	21,63^{**}
Regressão linear	1	9,74^{**}
Regressão quadrática	1	52,06^{**}
N	2	1,17 ^{ns}
Regressão linear	1	1,62 ^{ns}
Regressão quadrática	1	0,71 ^{ns}
I x N	6	1,28 ^{ns}
Bloco	3	0,44 ^{ns}
CV _{água} (%)	-	19,74
CV _{nitrogênio} (%)	-	14,25

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 11 – Equação de regressão para a produtividade da água (PA) do feijão em função das lâminas de irrigação (mm) – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Equação de regressão	R ² (%)
PA (kg m ⁻³)	PA = -2,2314 + 0,0226 I – 0,000037 I ²	95,22

4.5 Parâmetros de desenvolvimento da cultura

4.5.1 Índice de área foliar (IAF)

De acordo com a análise da variância (Tabela 12), a interação entre I e N influenciou o IAF, no nível de 1% de probabilidade, nas leituras realizadas aos 59 e aos 89 DAS. Quando foi feita a análise do desdobramento da fonte de variação *nitrogênio*, dentro de cada lâmina de irrigação (Tabela 13), observou-se que o nitrogênio influenciou o IAF aos 59 DAS, nos tratamentos que receberam as lâminas $I_3 = 357,5$ mm e $I_4 = 406,2$ mm, e influenciou o IAF aos 89 DAS em qualquer das lâminas aplicadas.

Tabela 12 - Resumo da análise de variância para o índice de área foliar (IAF) do feijão em função das lâminas de irrigação (I) e doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Valor de F						
		IAF 21 DAS	IAF 28 DAS	IAF 37 DAS	IAF 59 DAS	IAF 77 DAS	IAF 82 DAS	IAF 89 DAS
I	3	1,53 ^{ns}	9,00^{**}	88,95^{**}	147,27^{**}	48,74^{**}	74,62^{**}	24,59^{**}
Regressão linear	1	3,16 ^{ns}	23,05^{**}	258,66^{**}	419,14^{**}	4,26 ^{ns}	52,53^{**}	36,64^{**}
Regressão quadrática	1	1,32 ^{ns}	3,96 ^{ns}	7,86[*]	19,19^{**}	116,32^{**}	110,15^{**}	30,65^{**}
N	2	0,65 ^{ns}	0,16 ^{ns}	1,47 ^{ns}	3,32 ^{ns}	1,15 ^{ns}	1,89 ^{ns}	12,94^{**}
Regressão linear	1	0,83 ^{ns}	0,32 ^{ns}	2,68 ^{ns}	4,87 ^{ns}	2,28 ^{ns}	2,00 ^{ns}	17,53^{**}
Regressão quadrática	1	0,48 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,27	1,77 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,79 ^{ns}	8,35^{**}
I x N	6	0,78 ^{ns}	0,56 ^{ns}	1,84 ^{ns}	5,51^{**}	1,36 ^{ns}	0,75 ^{ns}	5,30^{**}
Bloco	3	4,49 ^{ns}	1,44 ^{ns}	2,55 ^{ns}	0,41 ^{ns}	3,58 ^{ns}	0,62 ^{ns}	9,32 ^{ns}
CV _{água} (%)	-	15,91	13,06	15,32	15,65	11,55	10,84	18,36
CV _{nitrogênio} (%)	-	21,25	10,39	19,74	10,09	11,61	9,71	13,09

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 13 - Valores de F da análise do desdobramento da fonte de variação “nitrogênio” dentro de cada lâmina de irrigação (N / I), para IAF aos 59 e 89 DAS do feijão – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Valor de F	
		IAF 59 DAS	IAF 89 DAS
N / I ₁	2	0.44 ^{ns}	8,58^{**}
N / I ₂	2	1.70 ^{ns}	6,42^{**}
N / I ₃	2	10,98^{**}	6,59^{**}
N / I ₄	2	6,79^{**}	7,25^{**}

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Após a análise de regressão dos modelos que melhor demonstraram a variação do IAF aos 59 e aos 89 DAS (Tabela 14), com base no teste F, observou-se que os modelos linear e polinomial quadrático se ajustaram bem à variação da característica estudada, possibilitando, portanto, a estimativa segura do IAF aos 59 e aos 89 DAS.

Tabela 14 – Equações de regressão da análise do desdobramento da fonte de variação nitrogênio dentro de cada lâmina de irrigação, para IAF aos 59 e aos 89 DAS do feijão em função das doses de nitrogênio – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Fonte de variação	Equação de regressão	R ² (%)
IAF 59 DAS	N / I ₃	IAF = 6,594167 + 0,010844 N	99,72
	N / I ₄	IAF = 7,32 - 0,017641 N + 0,000144 N ²	100,00
IAF 89 DAS	N / I ₁	IAF = 4,21 - 0,029984 N + 0,000190 N ²	100,00
	N / I ₂	IAF = 4,295 + 0,007438 N	96,28
	N / I ₃	IAF = 3,4575 - 0,023234 N + 0,000159 N ²	100,00
	N / I ₄	IAF = 1,9967 + 0,007688 N	91,00

Para a análise do desdobramento da fonte de variação *irrigação*, dentro de cada dose de nitrogênio, observou-se que, em todas as doses de nitrogênio, as lâminas de irrigação influenciaram o IAF aos 59 e aos 89 DAS (Tabela 15). As equações de regressão para a variação do IAF aos 59 e aos 89 DAS em função das lâminas de irrigação, dentro de cada dose de N, estão expressas na Tabela 16.

Tabela 15 - Valores de F da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio (I / N), para IAF aos 59 e aos 89 DAS do feijão – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Valor de F	
		IAF 59 DAS	IAF 89 DAS
I / N ₁	3	61,85**	15,96**
I / N ₂	3	75,36**	16,31**
I / N ₃	3	111,54**	12,33**

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 16 – Equações de regressão da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio (N), para IAF aos 59 e aos 89 DAS do feijão, em função das lâminas de irrigação (I) – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Fonte de variação	Equação de regressão	R ² (%)
IAF 59 DAS	I / N ₁	IAF = -8,633509 + 0,072796 I – 0,000083 I ²	99,61
	I / N ₂	IAF = -13,687763 + 0,108780 I – 0,000142 I ²	98,22
	I / N ₃	IAF = -10,042913 + 0,076137 I – 0,000075 I ²	97,33
IAF 89 DAS	I / N ₁	IAF = -0,428884 + 0,040879 I – 0,000086 I ²	96,92
	I / N ₂	IAF = -4,483650 + 0,064325 I – 0,000117 I ²	54,03
	I / N ₃	IAF = -2,453868 + 0,057670 I – 0,000109 I ²	90,71

Praticamente, em todas as leituras do IAF (aos 28, 37, 59, 77, 82 e 89 DAS), à exceção da leitura aos 21 DAS, as lâminas de irrigação (I) influenciaram significativamente, no nível de 1% de probabilidade, o índice de área foliar (IAF) (Tabela 12). As doses de nitrogênio (N) influenciaram o IAF, no nível de 1% de probabilidade, somente aos 89 DAS (último dia de leitura, que correspondeu a 3 dias antes do final do ciclo do feijoeiro). A estimativa da variação do IAF aos 28, 37, 59, 77, 82 e 89 DAS, pode ser obtida pelas equações de regressão linear e polinomial quadrática, obtidas a partir da análise de regressão (Tabela 17).

Tabela 17 – Equações de regressão para o índice de área foliar (IAF) aos 28, 37, 59, 77, 82 e 89 DAS do feijão em função das lâminas de irrigação (I) ou das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Equação de regressão	R ² (%)
IAF 28 DAS	IAF = 1,1637 + 0,0017 I	85,34
IAF 37 DAS	IAF = 1,4997 – 0,0062 I – 0,000025 I ²	99,88
IAF 59 DAS	IAF = -10,7881 + 0,0859 I – 0,0001 I ²	99,21
IAF 77 DAS	IAF = -8,9687 + 0,1017 I – 0,00017 I ²	82,46
IAF 82 DAS	IAF = -4,3363 + 0,0687 I – 0,00012 I ²	72,67
IAF 89 DAS	IAF = 3,303750 + 0,004430 N	67,72

As variações temporais dos valores médios do índice de área foliar (IAF), definido como a razão entre a área foliar do dossel e a área de solo por ele ocupado ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), durante o ciclo da cultura do feijão, estão apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Variação do IAF ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) durante o ciclo da cultura: T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T3 – 179,5 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T6 – 256,5 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T9 – 357,5 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 – 406,2 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T12 – 406,2 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$ – Piracicaba, SP, 2007

Os valores de IAF foram semelhantes para o manejo do nitrogênio (Figura 21), à exceção do último dia monitorado (89 DAS), quando os tratamentos com maior aplicação de N (160 kg ha^{-1}) apresentaram maiores valores de IAF. Diferentemente do que foi observado neste

experimento, Sant'Ana e Silveira (2008), ao trabalhar com a avaliação da resposta do feijoeiro irrigado ao nitrogênio em cobertura, observou que a adubação nitrogenada influenciou, significativamente ($p < 0,05$), o IAF até os 66 DAS.

Já o fator *água* influenciou as variações do IAF, encontrando-se os maiores valores nas plantas que receberam maiores quantidades de água, concordando com os resultados apresentados por Stone e Moreira (2001) e Angulo Filho et al. (2001). Como a lâmina de água aplicada no estágio inicial da cultura foi igual para todos os tratamentos, ocorrendo a diferenciação da lâmina de irrigação somente a partir dos 22 DAS, a diferença de IAF entre os tratamentos tornou-se evidente somente a partir dos 37 DAS (Figura 21), sendo mais significativa essa diferença aos 59 DAS. Por esses valores, pôde-se observar que o Tratamento 9 (357,5 mm de água e 160 kg ha⁻¹ de N) apresentou o máximo IAF de 8,30 m² m⁻² aos 59 DAS. O menor IAF foi de 1,39 m² m⁻², observado no Tratamento 2 (179,5 mm de água e 80 kg ha⁻¹ de N), concordando que as menores lâminas foram as que propiciaram o menor desenvolvimento da cultura (FRIZZONE, 1986; FANCELLI, 1987; LIBARDI; SAAD, 1994; PAZ et al., 1997; GOMES et al., 2000). Essa observação também está de acordo com a de Oliveira e Silva (1990), quando afirmam que o IAF do feijoeiro irrigado cresce com o desenvolvimento da cultura, atingindo um valor máximo, em torno dos 55 dias após a emergência (DAE), o que corresponde ao final da floração e ao início da formação das vagens. Para Pavani, Lopes e Pereira (2009), os maiores valores de IAF ocorreram entre 66 e 69 DAE, período de enchimento de grãos. URCHEI et al. (2000) também detectaram o máximo IAF aos 58 DAE (durante o florescimento).

Jauer et al. (2003), trabalhando com a cultivar Pérola, em quatro densidades de semeadura, identificaram não ter havido diferença significativa no IAF entre os tratamentos, apresentando um valor médio de 4,77 m² m⁻². A cultivar atingiu o maior valor de IAF aos 48 DAE (6,7 m² m⁻²), no período de formação das vagens. Resultados semelhantes foram obtidos por Gomes et al. (2000), em condições irrigadas, sendo os valores máximos de IAF de 7 m² m⁻² para a cultivar Negro Argel; 6,8 m² m⁻², para a cultivar Carioca e 8,6 m² m⁻², para a cultivar A 320. Já Pavani, Lopes e Pereira (2009) encontraram valores máximos de IAF variando entre 3,5 e 4,4 m² m⁻².

4.5.2 Altura da planta

As variações temporais dos valores médios de altura da planta (AP) (cm), durante o ciclo da cultura do feijão, estão apresentadas na Figura 22.

Figura 22 – Variação da altura de plantas (cm) durante o ciclo da cultura: T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T3 – 179,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T6 – 256,5 mm e N= 160 kg ha⁻¹; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T9 – 357,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 - 406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹; T12 - 406,2 mm e N=160 kg ha⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007

Os valores médios de AP (Figura 22) mostram que, até os 26 DAS, as lâminas de irrigação e as doses de N não provocaram efeitos sobre a altura da planta. Da mesma forma que aconteceu com o IAF, a AP somente apresentou diferença entre os tratamentos após os 37 DAS,

haja vista que a lâmina de água aplicada no estágio inicial da cultura foi igual para todos os tratamentos, ocorrendo a diferenciação na lâmina de irrigação somente a partir dos 22 DAS.

Já a partir dos 26 DAS até os 49 DAS (fase de vigor vegetativo), houve um aumento expressivo na AP das parcelas que receberam maiores lâminas de água (357,5 e 406,2 mm), atingindo um valor máximo de 57,4 cm de altura no tratamento T11 (406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹). A menor altura desse período foi observada no Tratamento 1 (179,5 mm de água e 0 kg ha⁻¹ de N) com 27,25 cm. Horn et al. (2000), avaliando espaçamentos e populações de plantas de feijão cultivar Pampa, verificaram a altura de 48 cm para espaçamentos de 50 cm entre linhas. Valores bem acima aos encontrados neste trabalho foram observados por Souza, Andrade e Muniz (2003), encontraram crescimento constante da altura de planta de 92 cm e 70 cm para a safra das águas e safra das secas, respectivamente e, por Meira et al. (2005), que obtiveram altura média de plantas de 80,8 cm em feijoeiro irrigado.

Quanto às doses de N, não houve uma clara evidência de aumento na AP com o aumento da adubação nitrogenada. Pode ser observado, aos 37 DAS, um leve aumento da AP com o aumento da dose de N, para os tratamentos que receberam as maiores lâminas de água (357,5 e 406,2 mm). No entanto, aos 49 DAS, observou-se que, para essas lâminas, a dose de 80 kg ha⁻¹ de N proporcionou, à cultura, uma maior AP. A partir dos 49 DAS, verificou-se uma redução na AP, devido à cultura ter atingido o pico de crescimento vegetativo e ter entrado na fase reprodutiva. Observa-se que, a partir dessa fase, as doses de N não produziram efeito sobre a cultura. Em média, os menores valores de AP foram encontrados na menor lâmina de irrigação (179,5 mm), no entanto o menor valor foi encontrado na lâmina de irrigação de 256,5 mm e 160 kg ha⁻¹ (T6), aos 18 DAS, o que não significa ainda nenhum efeito dos tratamentos, pois a cultura tinha emergido há cerca de 12 dias.

Soratto et al. (2006) também constataram que a aplicação de N em cobertura em épocas distintas (20, 30 e 40 DAS) não proporcionou efeito significativo sobre a altura de plantas, provavelmente porque o tempo não foi suficiente para proporcionar efeito sobre o número de flores. Para Soratto et al. (2003), a aplicação de todo o nitrogênio feito em cobertura, proporcionou maior produtividade de grãos de feijão. Souza, Andrade e Alves (2004), testando níveis de adubação para a cultivar Iapar 81, no estado do Paraná, obtiveram altura máxima de plantas de 43,6 cm.

A partir das variações temporais dos valores médios da AP, determinou-se a taxa de crescimento diário da altura da planta (TCAP), para cada tratamento. Conforme a análise da variância (Tabela 18), a interação entre I e N e as doses de N, isoladamente, não influenciaram a TCAP, no nível de 5 % de probabilidade. Já as lâminas de irrigação influenciaram a TCAP aos 37, 49 e 69 DAS (Tabela 18). As equações que demonstram a variação da TCAP, em função das lâminas de irrigação, podem ser vistas na Tabela 19.

Tabela 18 - Resumo da análise de variância para a taxa de crescimento diário da altura da planta (TCAP) do feijão em função das lâminas de irrigação (I) e das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Valor de F					
		TCAP 18 DAS	TCAP 26 DAS	TCAP 37 DAS	TCAP 49 DAS	TCAP 69 DAS	TCAP 76 DAS
I	3	1,77 ^{ns}	2,06 ^{ns}	37,30^{**}	5,11^{**}	32,34^{**}	1,00 ^{ns}
Regressão linear	1	1,63 ^{ns}	0,24 ^{ns}	105,11^{**}	12,57^{**}	93,17^{**}	0,24 ^{ns}
Regressão quadrática	1	2,14 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,07 ^{ns}	2,86 ^{ns}	1,58 ^{ns}
N	2	0,86 ^{ns}	0,44 ^{ns}	1,34 ^{ns}	1,59 ^{ns}	1,38 ^{ns}	1,00 ^{ns}
Regressão linear	1	0,72 ^{ns}	0,87 ^{ns}	1,76 ^{ns}	1,32 ^{ns}	0,09 ^{ns}	1,50 ^{ns}
Regressão quadrática	1	0,99 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,92 ^{ns}	1,85 ^{ns}	2,67 ^{ns}	0,50 ^{ns}
I x N	6	0,61 ^{ns}	0,74 ^{ns}	2,25 ^{ns}	1,67 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,00 ^{ns}
Bloco	3	0,10 ^{ns}	3,85 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,31 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,00 ^{ns}
CV _{água} (%)	-	9,03	22,03	36,30	41,36	-25,98	-694,16
CV _{nitrogênio} (%)	-	8,50	21,81	16,44	21,64	-15,24	-693,63

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 19 – Equações de regressão para a taxa de crescimento diário da altura da planta (TCAP) aos 37, 49 e 69 DAS do feijão em função das lâminas de irrigação (I) – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Equação de regressão	R ² (%)
TCAP 37 DAS	TCAP = -0,9788 + 0,0072 I	93,93
TCAP 49 DAS	TCAP = 0,3362 + 0,002893 I	81,99
TCAP 69 DAS	TCAP = 0,2591 - 0,00458 I	96,04

Conforme a Tabela 20, os maiores valores de TCAP foram encontrados nas lâminas de 357,5 e 406,2 mm, aos 37 e 49 DAS, encontrando-se o maior valor ($1,97 \text{ cm dia}^{-1}$) no período entre 26 e 37 DAS, no tratamento T12, correspondente à aplicação de 406,2 mm e 160 kg ha^{-1} . O menor valor encontrado ($0,28 \text{ cm dia}^{-1}$), no mesmo período (fase de crescimento vegetativo), foi observado no tratamento T1, correspondente à aplicação de 179,5 mm e sem adubação nitrogenada. Após os 49 DAS, a cultura apresentou uma redução na taxa de crescimento diário da altura das plantas (valores expressos em negativo), principalmente nos tratamentos relativos às maiores lâminas aplicadas.

Tabela 20 – Valores médios da taxa de altura da planta (TCAP), em cm dia^{-1} , aos 18, 26, 37, 49, 69 e 76 DAS do feijão em função das lâminas de irrigação, em mm, e das doses de nitrogênio, em kg ha^{-1} – Piracicaba, SP, 2007

DAS	T1*	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
18	0,57	0,53	0,58	0,53	0,54	0,52	0,55	0,56	0,59	0,56	0,57	0,59
26	0,56	0,62	0,58	0,68	0,65	0,82	0,54	0,63	0,64	0,69	0,69	0,62
37	0,28	0,42	0,44	0,83	0,74	0,50	1,69	1,86	1,92	1,65	1,85	1,97
49	0,77	0,82	0,77	1,09	1,22	1,37	1,34	1,28	1,02	1,67	1,79	1,29
69	-0,58	-0,69	-0,67	-0,71	-0,82	-0,76	-1,37	-1,42	-1,38	-1,59	-1,76	-1,57
76	-0,00	0,108	-0,02	0,15	0,08	-0,04	0,06	0,05	0,29	0,03	0,16	0,12

* T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T3 – 179,5 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T6 – 256,5 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T9 – 357,5 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 – 406,2 mm e $\text{N}=80 \text{ kg ha}^{-1}$; T12 – 406,2 mm e $\text{N}=160 \text{ kg ha}^{-1}$

4.6 Componentes de produção

As características de produção analisadas, para observar o efeito dos tratamentos, foram: produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV). (Tabela 21). Observou-se que, para a PG, houve uma ligeira tendência de aumento da produtividade, com o aumento da dose de N aplicada, à exceção dos tratamentos T7, T8 e T9 (357,5 mm), nos quais o aumento de N provocou a redução da PG. Resultados semelhantes foram observados por Ferreira (1998), Rapassi et al. (2003) e Arf et al. (2004), em que a adubação não afetou a produtividade de grãos de feijão. Já em relação às lâminas de irrigação, a PG aumentou consideravelmente com o aumento daquela, de modo substancial nas três maiores lâminas (256,5; 357,5 e 406,2 mm), concordando com Stone e Moreira (2001) e Angulo Filho (2001). O maior valor de PG encontrado, na densidade populacional de plantas, adotada neste experimento ($280.000 \text{ plantas ha}^{-1}$), foi de $3.986,09 \text{ kg ha}^{-1}$ no tratamento T12, correspondente à maior lâmina

de irrigação (406,2 mm) e à maior dose de N (160 kg ha⁻¹), enquanto o menor valor de PG foi de 1.002,96 kg ha⁻¹, na menor lâmina aplicada (179,5 mm) e na dose de 80 kg ha⁻¹ de N (T2), evidenciando um aumento aproximado de 297 % na PG, quando aumentada a lâmina de irrigação em 226,7 mm. As menores lâminas foram as que propiciaram as menores produtividades de grãos, resultados semelhantes aos obtidos por Frizzzone (1986), Fancelli (1987), Libardi e Saad (1994), Paz et al. (1997) e Gomes et al. (2000). Angulo Filho et al. (2001), trabalhando com a cultivar IAC – Carioca 80, verificaram que a irrigação proporcionou um aumento de 372% na produtividade de grãos em relação à testemunha (sem irrigação). A produtividade máxima encontrada pelos autores foi de 2540 kg ha⁻¹ com a aplicação de 373,4 mm de lâmina de água. Rezende et al. (2002) encontraram médias de rendimento de grãos de 2759,1 kg ha⁻¹. Também Rezende et al. (2004) obtiveram produtividade média de 935 kg ha⁻¹ para o cultivo sem irrigação suplementar e 1239 kg ha⁻¹ com irrigação suplementar.

Tabela 21 – Valores médios das características de produção: produtividade estimada de grãos (PG) para as densidades de plantio de 230.000 e 280.000 plantas ha⁻¹ (P₂₃₀ e P₂₈₀), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) do feijão em função das lâminas de irrigação, em mm, e das doses de nitrogênio (N), em kg ha⁻¹ – Piracicaba, SP, 2007

Tratamento	P ₂₃₀ – P ₂₈₀ (Kg ha ⁻¹)	NVP	NGV
T1*	825,49 - 1004,95	8,73	3,66
T2	823,86 - 1002,96	8,43	3,49
T3	1038,79 - 1264,61	8,23	3,76
T4	2409,72 - 2933,57	11,50	3,87
T5	2465,07 - 3000,96	11,08	3,66
T6	2551,37 - 3106,02	11,40	3,85
T7	3236,09 - 3939,59	16,60	4,26
T8	3126,12 - 3805,71	17,05	4,17
T9	2855,84 - 3476,68	16,80	4,08
T10	2743,50 - 3339,91	13,00	4,61
T11	2735,36 - 3330,00	12,63	4,59
T12	3274,29 - 3986,09	15,03	4,35

* T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T3 – 179,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T6 – 256,5 mm e N= 160 kg ha⁻¹; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T9 – 357,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 – 406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹; T12 – 406,2 mm e N=160 kg ha⁻¹

As lâminas de irrigação aumentaram, significativamente, o NVP até a lâmina de 357,5 mm. A partir desta até a lâmina de 406,2 mm, observou-se uma redução no NVP. Paz et al. (1997) concluíram que o número de vagens por planta é um dos parâmetros que apresenta maior sensibilidade aos diferentes níveis de disponibilidade de água. Loureiro et al. (1990) e Libardi (1996) também afirmam que qualquer deficiência hídrica, nas fases críticas de florescimento e formação dos grãos, compromete muito o rendimento produtivo da cultura, principalmente, com a redução do número de vagens por planta. Verificou-se que o NVP apresentou uma média de 12,54, sendo o maior valor de 17,05 vagens por planta, encontrado no tratamento T8 (357,5 mm e 80 kg ha⁻¹ de N), enquanto o menor foi de 8,23, na menor lâmina aplicada (179,5 mm) e na dose de 160 kg ha⁻¹ de N (tratamento T3). Resultados semelhantes foram obtidos por Silveira et al. (2006), verificando uma média de 10,8 vagens por planta, em experimento com feijoeiro irrigado cultivar Pérola, sob diferentes sistemas de preparo do solo e rotação de culturas. Souza et al. (2003), obtiveram médias de número de vagens por planta de 9,3 e 5,3, para a safra das águas e das secas, respectivamente. Os resultados também conferem com os dados obtidos por Rezende et al. (2002) e Jadoski et al. (2003).

O NGV aumentou com as lâminas de irrigação, observando-se o maior valor de 4,59 grãos por vagem no tratamento T11 (406,2 mm e 80 kg ha⁻¹ de N), enquanto o menor valor foi de 3,49, na menor lâmina aplicada (179,5 mm) e na dose de 80 kg ha⁻¹ de N (tratamento T2). Esses baixos valores de NGV estão relacionados, provavelmente, com o excesso de umidade no período de preenchimento das vagens e do ciclo final da cultura até a colheita, o que prejudicou a produtividade da cultura. O acréscimo do NGV, em função do aumento das lâminas de irrigação, também foi observado por Moreira, Silveira e Stone (1996). Esses mesmos autores afirmam que o NGV é o componente de produção mais afetado pela lâmina de água, principalmente quando a cultura está no período reprodutivo, ou seja, a ocorrência de um déficit hídrico durante esse período irá provocar uma alta percentagem de abscisão das flores e o abortamento de óvulos, reduzindo, assim, o número de grãos por vagem da cultura.

Conforme a análise da variância (Tabela 22), não se verificou efeito da interação entre I e N, como também das doses de N, isoladamente, sobre os componentes de produção, no nível de 5% de probabilidade. Já as lâminas de irrigação influenciaram, no nível de 1 % de probabilidade, todos os componentes de produção (PG, NVP e NGV) (Tabela 22).

O aumento da dose de nitrogênio não promoveu o aumento da produtividade de grãos, assim, como, a do número de grãos por vagem, convergindo para os resultados observados na literatura (ARF et al., 2004; RAPASSI et al., 2003). Ferreira (1998) também não observou efeito de doses de N nos componentes da produção e na produtividade de grãos do feijoeiro cultivado no período de inverno. Segundo os autores, a justificativa de tal resultado repousa no alto teor de matéria orgânica do solo que, diante da mineralização, liberaria quantidades suficientes de N para atender às necessidades da planta. Normalmente, quando se aumenta a dose de N, as plantas produzem maior número de vagens, sem, contudo, aumentar o número de grãos por vagem.

Buzetti et al. (1992) observaram que o aumento nas doses de N aumentou linearmente a produtividade, ou seja, 4,33 kg de grãos de feijão para cada kg de N aplicado. Carvalho et al. (2001), também no Município de Selvíria, MS, estudando o efeito de fontes e diferentes parcelamentos do N em feijoeiro de inverno, concluíram que a aplicação de 75kg ha⁻¹ de N proporcionou, em média, incrementos de 38% na produtividade da cultura.

Tabela 22 - Resumo da análise de variância para a produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV) em função das lâminas de irrigação (I) e das doses de nitrogênio (N) – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Valor de F		
		PG (kg ha ⁻¹)	NVP	NGV
I	3	75,69^{**}	8,07^{**}	8,51^{**}
Regressão linear	1	178,38^{**}	16,80^{**}	24,24^{**}
Regressão quadrática	1	48,18^{**}	3,27 ^{ns}	1,28 ^{ns}
N	2	1,03 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,78 ^{ns}
Regressão linear	1	0,77 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,88 ^{ns}
Regressão quadrática	1	1,30 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,69 ^{ns}
I x N	6	1,38 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,84 ^{ns}
Bloco	3	0,56 ^{ns}	0,70 ^{ns}	1,37 ^{ns}
CV _{água} (%)	-	16,73	34,37	11,74
CV _{nitrogênio} (%)	-	12,24	22,70	7,03

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

As equações que demonstram a variação da PG, do NVP e do NGV, em função das lâminas de irrigação, podem ser vistas na Tabela 23.

Tabela 23 – Equações de regressão para a produtividade de grãos (PG), número de vagens por planta (NVP) e número de grãos por vagem (NGV) do feijão em função das lâminas de irrigação (I) – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Equação de regressão	R ² (%)
PG (kg ha ⁻¹)	$PG = -7407,0482 + 63,8905 I - 0,0915 I^2$	99,78
NVP	$NVP = 3,8550 + 0,0290 I$	69,42
NGV	$NGV = 2,8841 + 0,0038 I$	94,95

4.7 Relação entre o índice de área foliar (IAF) e as demais variáveis

A importância da área foliar é amplamente conhecida, por constituir um parâmetro indicativo da produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação da energia luminosa e da sua conversão em energia química. Considerando que existe uma correlação significativa positiva entre o acúmulo de massa seca (na parte aérea e na planta toda) e a produção de grãos (URCHEI et al., 2000; SORATTO et al., 2006), menor massa de planta pode produzir menor quantidade de fotoassimilados, o que resulta em menor número de vagens produtivas por planta, menor número de grãos por vagem e, conseqüentemente, menor produtividade (ARF et al., 2004; SORATTO et al., 2006). O fato demonstra que plantas mais robustas, com mais ramificações e que produzem maior número de estruturas reprodutivas, acarretam maiores produtividades de grãos. Portanto, com o objetivo de conhecer a relação entre o IAF e as demais variáveis da cultura, nas 7 coletas de IAF realizadas durante o ciclo da cultura, foram feitas análises de regressão simples, polinomial quadrática e potencial, verificando-se que os modelos linear e potencial apresentaram melhor adequação para explicar a relação entre o IAF e as variáveis *altura da planta*, *produtividade de grãos*, *número de vagens por planta* e *número de grãos por planta*.

Assim, na comparação dos dois modelos, apesar de ambos apresentarem comportamento estatístico significativo pelo teste F ($p < 0,01$), optou-se pelo modelo linear, por apresentar maiores valores do coeficiente de determinação (R^2). Para a variável *altura da planta* (AP), o modelo linear foi significativo nos estádios V4, R6 e R8, ou seja, nas coletas 3, 4 e 5, respectivamente (Tabela 24). Nas demais coletas (1, 2, 6 e 7), ambos os modelos, linear e potencial, não foram significativos, no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 24 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre altura de planta (AP) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	24/09	20	V3	0,0289 ^{ns}	AP = 0,114IAF + 9,93	0,0244	0,0006
2 ^a	01/10	27	V3	1,8544 ^{ns}	AP = 0,878IAF + 13,68	0,1969	0,0388
3 ^a	10/10	36	V4	89,1150 ^{**}	AP = 7,671IAF + 12,28	0,8121	0,6595
4 ^a	01/11	58	R6	165,1782 ^{**}	AP = 3,698IAF + 23,32	0,8846	0,7826
5 ^a	19/11	76	R8	26,0197 ^{**}	AP = 1,683IAF + 12,07	0,6011	0,3613
6 ^a	24/11	81	R9	0,6101 ^{ns}	AP = 0,398IAF + 19,29	0,1144	0,0131
7 ^a	01/12	88	R9	0,4421 ^{ns}	AP = -0,283IAF + 21,90	0,0976	0,0095

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Com base na relação entre os valores de IAF e AP (Tabela 24), nos sete dias de coleta, verificou-se que os coeficientes de determinação (R²), nas 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 6^a e 7^a coletas de dados, foram de 0,06%, 3,8%, 65,9%, 78,2%, 36,1%, 1,3% e 0,9%, respectivamente. Somente no estádio R6, ocorreu uma boa correlação entre os valores de IAF e de AP. No estádio V4, a mesma relação foi regular, enquanto, nos demais estádios, o IAF e a AP apresentaram uma relação ruim. No entanto, para obter-se uma melhor precisão nas estimativas de AP, deve-se utilizar a equação da AP do estádio R6, por possuir o maior R².

Observando-se os resultados da correlação, contidos na Tabela 24, pode-se notar que os estádios de desenvolvimento da cultura V4 e R6 foram os que apresentaram maiores valores para o coeficiente de correlação linear (r), indicando uma forte correlação positiva entre as variáveis analisadas. A partir desses resultados, pode-se afirmar que houve uma relação positiva entre a AP e o IAF, nos estádios V4 e R6, apresentando ajustes adequados para o estudo dessa relação e permitindo, de maneira significativa, a estimativa da AP a partir dos valores do IAF.

Os resultados da regressão do IAF com a AP (Tabela 24) indicaram que os melhores estádios da cultura, para estimar-se a altura da planta, utilizando o IAF, foram o V4 (36 DAS) e o R6 (58 DAS) (Figura 23).

Figura 23 – Relação entre o índice de área foliar (IAF) e a altura da planta (AP), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b), durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

Para a relação entre as variáveis IAF e *produtividade de grãos* (PG), além dos estádios V4, R6 e R8, que apresentaram comportamento estatístico significativo ($p < 0,01$), o estágio V3 (27 DAS) também o apresentou ($p < 0,05$) (Tabela 25). Nos demais estádios, V3 (20 DAS) e R9 (81 e 88 DAS), o modelo utilizado não foi significativo, no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 25 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre produtividade de grãos (PG) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	24/09	20	V3	0,054 ^{ns}	PG = 215,52IAF + 2657,7	0,0346	0,0012
2 ^a	01/10	27	V3	5,8056 *	PG = 1591IAF + 172,39	0,3348	0,1121
3 ^a	10/10	36	V4	25,5246 **	PG = 805,02IAF + 1185	0,5974	0,3569
4 ^a	01/11	58	R6	115,6767 **	PG = 376,64IAF + 887	0,8459	0,7155
5 ^a	19/11	76	R8	14,7264 **	PG = 489,15IAF + 457,66	0,4924	0,2425
6 ^a	24/11	81	R9	0,1571 ^{ns}	PG = -66,896IAF + 3113,1	0,0583	0,0034
7 ^a	01/12	88	R9	1,8974 ^{ns}	PG = -190,69IAF + 3546,1	0,1989	0,0396

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Com base na relação entre os valores de IAF e PG, nos sete dias de coleta, verificou-se que os coeficientes de determinação (R²) foram de 0,1%, 11,2%, 39,6%, 72%, 24,3%, 0,3% e 4%, nas 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 6^a e 7^a coletas de dados, respectivamente. Somente no estágio R6 (58 DAS), ocorreu uma boa relação entre os valores de IAF e AP. Mesmo apresentando valores de R²

baixos, as equações de regressão linear simples (RLS) dos estádios V3 (27 DAS), V4 (36 DAS) e R8 (76 DAS), foram significativas no nível de 1% de probabilidade.

Portanto, por meio de todas as equações de RLS, pôde-se verificar que, em geral, tiveram uma correlação entre regular e ruim. Com isso, para obter-se uma melhor precisão na estimativa de produtividade, deve-se utilizar a equação que possui o maior R^2 , neste caso, a equação do estádio R6 (58 DAS).

Na Tabela 25, pode-se observar que os estádios V4 (36 DAS) e R6 (58 DAS) foram os que apresentaram maiores valores para o coeficiente de correlação linear (r). A partir desses resultados, pode-se afirmar que houve uma relação positiva entre PG e IAF, nas coletas 3 e 4, apresentando ajustes adequados para o estudo desta relação e permitindo de maneira significativa, a estimativa da PG, por meio dos valores do IAF.

Os resultados da regressão do IAF com a PG (Tabela 25) indicaram que os melhores estádios da cultura para estimar-se a produtividade de grãos foram o V4 (36 DAS) e o R6 (58 DAS) (Figura 24).

Figura 24 – Relação entre índice de área foliar (IAF) e a produtividade de grãos (PG), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b) durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

A relação entre as variáveis IAF e *número de vagens por planta* (NVP), apesar de apresentar valores baixos de R^2 nos estádios V4 (36 DAS), R6 (58 DAS) e R8 (76 DAS), demonstrou comportamento estatístico significativo (Tabela 26). Nos demais estádios, o modelo utilizado não foi significativo, no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 26 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre número de vagens por planta (NVP) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental, Piracicaba-SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	teste F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	24/09	20	V3	0,0026 ^{ns}	NVP = 0,1753IAF + 12,382	0,0077	6 ⁻⁰⁵
2 ^a	01/10	27	V3	2,3102 ^{ns}	NVP = 3,8482IAF + 6,0646	0,2186	0,0478
3 ^a	10/10	36	V4	9,4116 ^{**}	NVP = 2,0564IAF + 8,288	0,4121	0,1698
4 ^a	01/11	58	R6	29,3441 ^{**}	NVP = 1,0289IAF + 7,1789	0,6241	0,3895
5 ^a	19/11	76	R8	3,9132 [*]	NVP = 1,0299IAF + 7,5039	0,28	0,0784
6 ^a	24/11	81	R9	1,0331 ^{ns}	NVP = -0,6293IAF + 15,027	0,1483	0,022
7 ^a	01/12	88	R9	2,2808 ^{ns}	NVP = -0,771IAF + 15,358	0,2173	0,0472

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Com base na relação entre os valores de IAF e NVP, nos sete dias de coleta, verificou-se que os coeficientes de determinação (R²), nas 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 6^a e 7^a coletas de dados, foram de 0,06%, 4,78%, 16,98%, 38,95%, 7,8%, 2,2% e 4,7%, respectivamente. Nota-se que, independentemente dos valores baixos de R², as equações de RLS dos estádios V4 (36 DAS) e R6 (58 DAS), relativas às coletas 3 e 4, respectivamente, foram significativas, no nível de 1% de probabilidade.

Portanto, as equações de RLS permitem afirmar que IAF e NVP tiveram, de modo geral, uma correlação ruim. No entanto, para obter-se uma melhor precisão nas estimativas do número de vagens por planta, deve-se utilizar a equação do NVP do estádio R6 (58 DAS), por apresentar o maior valor de R².

Na Tabela 26, podem-se observar os estádios V4 (36 DAS) e R6 (58 DAS) como os que apresentaram maiores valores para o coeficiente de correlação linear (r). Tais resultados permitem afirmar que houve uma relação positiva entre NVP e IAF, nas coletas 3 e 4, apresentando ajustes adequados para o estudo da relação e permitindo, de maneira significativa, a estimativa do NVP, a partir dos valores do IAF.

Os resultados da regressão do IAF com o NVP (Tabela 26) indicaram que os melhores estádios da cultura para estimar o número de vagens por planta (NVP), utilizando o IAF, foram o V4 (36 DAS) e o R6 (58 DAS) (Figura 24).

Figura 25 – Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o número de vagens por planta (NVP), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b) durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

A relação entre as variáveis IAF e *número de grãos por vagem* (NGV), apesar de apresentar valores baixos de R^2 nos estádios V3 (27 DAS), V4 (36 DAS), R6 (58 DAS) e R9 (81 e 88 DAS), demonstrou comportamento estatístico significativo (Tabela 27). Nos demais estádios, V3 (20 DAS) e R8 (76 DAS), o modelo utilizado não foi significativo, no nível de 5% de probabilidade.

Tabela 27 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o número de grãos por vagem (NGV) e o IAF da cultura do feijão, durante o período experimental - Piracicaba-SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	teste F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	24/09	20	V3	3,0963 ^{ns}	GV = 0,6512IAF + 3,4515	0,2512	0,0631
2 ^a	01/10	27	V3	19,4208 **	GV = 1,0693IAF + 2,2296	0,5449	0,2969
3 ^a	10/10	36	V4	32,9000 **	GV = 0,3593IAF + 3,2856	0,6458	0,417
4 ^a	01/11	58	R6	29,9844 **	GV = 0,1155IAF + 3,4266	0,6282	0,3946
5 ^a	19/11	76	R8	0,3513 ^{ns}	GV = -0,0357IAF + 4,2027	0,0871	0,0076
6 ^a	24/11	81	R9	15,4233 **	GV = -1,0581IAF + 8,2176	0,5011	0,2511
7 ^a	01/12	88	R9	4,8890 *	GV = -0,122IAF + 4,4767	0,31	0,0961

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Com base na relação entre os valores de IAF e NGV, nos sete dias de coleta, verificou-se que os coeficientes de determinação (R^2), nas 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 6^a e 7^a coletas de dados, foram de 6,31%, 29,69%, 41,7%, 39,46%, 0,76%, 25,11% e 9,61%, respectivamente.

Portanto, com base nas equações de RLS, pode-se dizer que IAF e NGV tiveram, de modo geral, uma correlação ruim. No entanto, para obter-se uma melhor precisão nas estimativas do número de grãos por vagem, deve-se utilizar a equação do NGV do estágio V4 (36 DAS), por apresentar maior valor de R^2 .

Na Tabela 27, pode-se observar que os estádios V4 (36 DAS) e R6 (58 DAS) (Figura 25) apresentaram os maiores valores para o coeficiente de correlação linear (r). Pode-se afirmar que houve uma relação positiva entre NGV e IAF, nas coletas 3 e 4, apresentando ajustes adequados para o estudo da relação e permitindo, de maneira significativa, a estimativa do número de grãos por vagem (NGV), a partir dos resultados encontrados para o IAF.

Diferentemente das outras variáveis, a maior correlação foi notada na coleta 3, apresentando um coeficiente de determinação de 41,7%, o que evidenciou ser o estágio V4 (36 DAS) o mais apropriado para estimar-se o NGV, a partir do IAF.

Figura 26 – Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o número de grãos por vagem (NGV), obtida nos estádios V4 (a) e R6 (b), durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

Tendo como base, as relações observadas entre o índice de área foliar (IAF) e as variáveis *altura de planta* (AP), *produtividade de grãos* (PG), *número de vagens por planta* (NVP) e *número de grãos por vagem* (NGV), pôde-se inferir que o estágio R6 (58 DAS), na fase de máximo IAF, foi o que melhor evidenciou, mais apropriadamente, essas relações, com exceção da variável NVP, cuja estimativa, a partir do IAF, se mostrou melhor no estágio V4 (36 DAS).

4.8 Análise do comportamento espectral do feijão

A Figura 27 mostra, por meio das curvas espectrais, a variação do Fator de Reflectância (FR), observado nas 252 bandas, ao longo do desenvolvimento da cultura, em função dos tratamentos *lâminas de irrigação* e das doses de nitrogênio, ou seja, apresenta o comportamento espectral médio dos doze tratamentos, para cada estágio da cultura analisado.

Observa-se que a variação do FR na região do visível (400 a 700 nm), para os diferentes tratamentos, apresentou uma tendência semelhante. No início do desenvolvimento da cultura (Figuras 27a e b), provavelmente devido à baixa porcentagem de cobertura vegetal e à grande influência da reflectância do solo (HUETE; JACKSON; POST, 1985), os valores do FR na região do visível são maiores do que nos demais estágios de desenvolvimento da cultura, reiterando os resultados obtidos por Formaggio (1989), Moreira (1997) e Angulo Filho et al. (2001).

Vale lembrar que a lâmina de água aplicada no estágio inicial da cultura (até 21 DAS) foi igual para todos os tratamentos, por isso, não houve diferença entre as curvas de reflectância aos 14 e aos 21 DAS (Figuras 27a e b). Com o desenvolvimento da cultura (Figuras 27 c, d, e, f) aumentaram a quantidade de fitomassa e o índice de área foliar, proporcionando um incremento na quantidade de clorofila das folhas e, conseqüentemente, a maior absorção da radiação por estas (WOOLLEY, 1971; TUCKER, 1973). Com isso, os valores do FR na região do visível diminuíram até o início da maturação, como também observado por Formaggio (1989) e Angulo Filho et al. (2001). Após esse período, o FR aumentou gradativamente, até o ponto em que a cultura estava completamente madura. Esse aumento no valor do FR é explicado pela senescência da maioria das folhas, as quais se encontravam amareladas, devido à degradação das clorofilas. Assim diminuindo a clorofila e, conseqüentemente, a absorção da radiação solar pelo dossel da cultura do feijão, aumentou progressivamente, o FR na região do visível, também influenciado pelo aumento da reflectância do solo, tal qual ocorreu no início do ciclo da cultura.

Figura 27 – Curvas espectrais das médias de reflectância dos 12 tratamentos em cada estágio de desenvolvimento da cultura analisado, V2 (a), V3 (b), V4 (c), R6 (d), R8 (e), R9 (f) e R9 (g) – Piracicaba, SP, 2009

A vegetação apresentou uma curva espectral caracterizada por um pico de absorção, na região do azul (400 a 500 nm), e outro, na região do vermelho (600 a 700 nm), ambos devido à presença das *clorofilas a* e *b*, os mais importantes pigmentos vegetais a absorverem a luz azul e a luz vermelha — a *clorofila a* nos comprimentos de onda 430 e 660 nm e a *b* nos comprimentos de onda 450 e 650 nm (FARABEE, 1997) — e um decréscimo na eficiência de absorção (leve pico de reflectância) na região verde do espectro eletromagnético (500 a 600 nm), em aproximadamente 540 nm (Figuras 27 c, d, e, f, g).

Aos 22 DAS, ocorreu a diferenciação da lâmina de água aplicada, portanto, aos 36 DAS (Figura 27c,) já se pôde observar a diferença entre os tratamentos. Verifica-se que os tratamentos T1, T2 e T3, por estarem submetidos à menor lâmina de água, e apresentarem menor desenvolvimento vegetativo e maior exposição do solo, obtiveram os menores valores do FR na região do infravermelho próximo (IVP), quando comparados aos demais tratamentos (Figura 27c e d), o que reitera os resultados obtidos por Angulo Filho et al. (2001). Pode-se ainda visualizar, na Figura 27d, que os tratamentos que receberam maior lâmina de água (T10, T11 e T12) apresentaram maior reflectância na região do IVP (700 a 950 nm), o que justifica o maior IAF ($8,30 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$) encontrado no T9 aos 59 DAS. O estresse hídrico determina que se diminua a concentração de clorofila, provocando um desarranjo nas estruturas internas das folhas e, conseqüentemente, maior reflectância na região do vermelho (RIPPLE, 1985), o que também justifica maiores valores do FR na região do visível. À medida que se aumentavam as lâminas de água, ocorriam maior desenvolvimento vegetativo da cultura, maior índice de área foliar e menor

exposição do solo, diminuindo os valores do FR na região do visível (T7, T8, T9, T10, T11, T12) (Figuras 27c e d).

É importante ressaltar que, após os 48 DAS, ocorreu um período, em torno de 25 dias, em que houve precipitações efetivas consideráveis, não havendo necessidade de irrigação. Por isso, os tratamentos que tiveram o desenvolvimento prejudicado, por estarem recebendo a menor lâmina de água (T1, T2, T3), apresentaram recuperação no desenvolvimento vegetativo e, por conseguinte, redução na exposição do solo (Figura 27e), diminuindo-se os valores do FR na região do visível.

Os tratamentos submetidos às maiores lâminas de água apresentaram maior desenvolvimento vegetativo e um ciclo mais curto. Na Figura 27g, é possível visualizar que esses tratamentos apresentaram um aumento da reflectância na região do visível, o que caracteriza o final do ciclo da cultura, confirmando os resultados verificados por Formaggio (1989) e Moreira (1997).

Na transição da região do vermelho para a região do infravermelho próximo (700 a 800 nm) do espectro eletromagnético, há um acentuado aumento na reflectância, o qual se mantém ao longo da faixa do infravermelho próximo. Tal aumento da reflectância está relacionado à estrutura interna celular da folha, onde ocorrem múltiplas reflexões e refrações (MOREIRA, 2000). Essa mudança abrupta da curva espectral é causada por efeitos combinados da forte absorção pela clorofila e do espalhamento interno na folha, sendo chamada de “borda vermelha” (COLINS, 1978) e talvez constitua uma das feições mais estudadas na curva espectral da vegetação (SCHLERF; ATZBERGER, 2001). Os valores da reflectância aumentaram na medida em que a quantidade de folhas aumentou, até atingir um ponto máximo, assumindo o comportamento espectral típico de vegetação verde vigorosa, que ocorreu aos 55 DAS (Figura 27d). Esse valor máximo foi determinado na época em que a cultura apresentou a máxima absorção da radiação solar na região do vermelho. A partir dessa fase, observou-se a diminuição do FR, devido à fase de senescência da cultura do feijão, quando ocorreram o amarelecimento, o secamento e a queda das folhas, causando a degradação da clorofila (Figuras 27e, f, g). No final do ciclo, as folhas secaram e caíram, restando apenas os tecidos de sustentação e as vagens, o que tornou o comportamento espectral semelhante ao do início do ciclo.

A Figura 27g mostra que os tratamentos que receberam maior quantidade de água (T7, T8, T9, T10, T11 e T12) entraram em senescência antes do que aqueles que receberam menor

quantidade de água, ocorrendo uma maior reflectância na região do vermelho e uma menor reflectância na região do infravermelho próximo, quando comparados aos outros tratamentos.

Analisando os doze tratamentos, pode-se afirmar que eles apresentaram, em datas diferentes, um valor máximo do FR na banda do infravermelho próximo. Os tratamentos T10, T11 e T12, submetidos à maior lâmina de água (406,2 mm), apresentaram o maior desenvolvimento vegetativo em relação aos demais tratamentos, apresentando uma maior produção de fitomassa e maiores valores do FR, alcançados aos 55 DAS (Figura 27d). Os tratamentos T7, T8 e T9, que receberam uma lâmina de 357,5 mm, apresentaram, durante todo o ciclo, uma menor quantidade de fitomassa e, conseqüentemente, menores valores do FR do que os tratamentos anteriormente descritos, atingindo os valores máximos de FR também aos 55 DAS (Figura 27d). Em seguida, observaram-se, nos tratamentos T4, T5 e T6, submetidos a uma lâmina de água de 256,5 mm, valores de FR máximos alcançados aos 75 DAS (Figura 27e). Por fim, os tratamentos T1, T2 e T3, submetidos à menor lâmina de água (179,5 mm), apresentaram os menores valores do FR, se comparados aos demais tratamentos, observando-se aos 75 DAS, os valores máximos do FR. Quando a suspensão da irrigação ou o estresse hídrico ocorreram no início do desenvolvimento vegetativo, a reflectância na região do infravermelho próximo foi menor do que na testemunha, durante todo ciclo da cultura (KNIPLING, 1970; BAUER et al., 1980; RIPPLE, 1985), conforme observado nesta pesquisa.

Dessa maneira, é possível afirmar que as maiores lâminas empregadas corresponderam às maiores fitomassas e, como consequência, aos maiores valores do FR na região do infravermelho próximo.

Os tratamentos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11 e T12 são provenientes da interação entre a irrigação (I) e o nitrogênio (N). Os resultados da análise da variância apresentados anteriormente evidenciaram que as doses de N não influenciaram significativamente, no nível de 1% de probabilidade, as variáveis biofísicas. Portanto, como o N não foi significativo, os fatores de reflectância não foram influenciados pela variação de N.

4.9 Correlação entre as reflectâncias e as variáveis biofísicas

Foi realizada, em determinadas bandas, a correlação entre as reflectâncias e as variáveis independentes (irrigação e nitrogênio) e dependentes (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem), durante o ciclo da cultura.

Cada curva do gráfico representa uma data de coleta, ou seja, um estágio de desenvolvimento fenológico (Figura 28).

Na Figura 28, pode-se visualizar que o padrão das curvas de correlação, para as variáveis analisadas, nos diferentes estádios fenológicos, foram distintas. No estágio V2, para todas as variáveis, as correlações são as mais próximas de zero, independente do comprimento de onda. Isso acontece porque a cultura estava no estágio inicial de desenvolvimento, apresentando baixa quantidade de biomassa e, conseqüentemente, registrando-se uma grande influência do solo na resposta espectral.

Figura 28 – Coeficiente de correlação entre as reflectâncias espectrais de bandas estreitas e: a) irrigação; b) nitrogênio; c) IAF; d) altura da planta; e) produtividade de grãos; f) número de vagens por planta; e g) número de grãos por vagem, nos diferentes estádios fenológicos da cultura – Piracicaba, SP, 2007. R9a (maturação fisiológica); R9b (maturação de colheita)

A variável *nitrogênio* (Figura 28b) não apresentou correlação com a reflectância, para todos os estádios de desenvolvimento da planta. Pode-se dizer, portanto, que a variável *nitrogênio* não depende linearmente da reflectância, ou seja, as duas variáveis não estão relacionadas. Esses resultados reiteram o item 4.5.1, em que a análise de variância mostrou que as doses de N não influenciaram significativamente, no nível de 1% de probabilidade, todas as variáveis biofísicas, entre elas, o índice de área foliar (IAF). Portanto, fica evidente que o IAF e o nitrogênio não tiveram relação. Diante do exposto, a variável *nitrogênio* não fará parte das futuras análises.

Nos estádios V3, V4, R6, e R8, para todas as variáveis (Figura 28), à exceção das variáveis *altura de planta* e *grãos por vagem*, pôde-se observar, na região do visível (400 a 700 nm), com exceção da região do verde (550 nm), que as correlações são negativas, ou seja, à

medida que a reflectância aumenta, diminui a variável. Isso é resultado dos pigmentos da planta, que absorvem a radiação. As variáveis *altura da planta* e *número de grãos por vagem* apresentaram certa variação no estágio V3, em que se pôde observar que, na região do visível, as correlações ficam negativas, inclusive na região do verde, diferindo das demais variáveis. A variável *número de grãos por vagem* também apresentou diferença no estágio R8, ocorrendo correlações positivas na região do visível. Os valores negativos máximos de “r” foram encontrados no estágio R6, para todas as variáveis, com exceção de *número de grãos por vagem*, cujos valores negativos máximos de “r” se encontraram em V4. Todos os valores foram observados na região do vermelho, no comprimento de onda em torno de 680 nm, o qual representa a máxima absorção de radiação pelos pigmentos fotossintetizantes, como já verificado por Xavier et al. (2006).

Na região do verde, os valores são positivos, pois as folhas refletem um pouco de radiação nesse intervalo de onda; portanto, à medida que a reflectância aumenta, aumenta também a variável. O pico de correlação, na região verde, ocorre no estágio V4, enquanto na do infravermelho próximo, nos estádios V4 (irrigação, altura da planta, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e R6 (IAF e produtividade de grãos), nos quais a planta apresenta folhas verdes e saudáveis, como também maior desenvolvimento foliar (IAF).

Na região da borda vermelha, entre 680 e 800 nm, pôde-se observar um aumento significativo dos valores de “r”, devido ao aumento da reflectância da vegetação na região (COLLINS, 1978). Essa mudança abrupta da curva foi causada por efeitos combinados da forte absorção pela clorofila e do espalhamento interno da folha.

Na Tabela 28, pode-se observar que os maiores valores positivos de coeficiente de correlação (r) foram encontrados entre os comprimentos de onda (λ) 730 e 943 nm. Para as variáveis independentes (irrigação e nitrogênio), observou-se que a variável *irrigação* apresentou o maior valor de “r” positivo, observado no estágio V4, com valor de 0,94, enquanto a variável *nitrogênio* apresentou um valor de 0,24 no estágio V3, o que corresponde a uma fraca correlação. Para as variáveis dependentes, os maiores valores de “r” positivos foram observados no IAF, na altura da planta e na produtividade de grãos, nos estádios R6, V4 e R6, com valores de 0,90, 0,88 e 0,83, respectivamente, indicando uma forte correlação com o comprimento de onda, em torno de 902 nm. Xavier et al. (2006), trabalhando com a cultura do trigo, também observaram que a produtividade da cultura teve uma forte correlação com o comprimento de onda de 902 nm,

observando-se o valor máximo positivo de “r” de 0,72 (estádio espigamento I). Para a variável *altura da planta*, o valor máximo positivo, observado pelos autores, foi de 0,62, no comprimento de onda de 813 nm (fase de alongamento). As outras variáveis, *número de vagens por planta* e *número de grãos por vagem*, apresentaram uma correlação moderada com os comprimentos de onda de 735 e 943 nm, respectivamente, no estágio de desenvolvimento V4. Resultados similares foram encontrados por Yang e Chen (2004), para vários parâmetros biofísicos.

O valor absoluto do coeficiente de correlação (r), para as variáveis *irrigação* e IAF foi maior do que para as outras variáveis.

Tabela 28 – Coeficiente de correlação (r) entre os comprimentos de onda e as variáveis da cultura do feijão, durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

Variáveis	Estádio	Comprimento de onda (nm)	R
(Independentes)	-	-	-
Irrigação	V4	937	0,94
Nitrogênio	V3	823	0,25
(Dependentes)	-	-	-
IAF	R6	902	0,90
Altura da planta	V4	902	0,88
Produtividade de grãos	R6	906	0,83
Número de vagens por planta	V4	735	0,61
Número de grãos por vagem	V4	943	0,67

Nos estádios R9-a e R9-b (Figura 28), as correlações são de menor magnitude, talvez como reflexo da fase de maturação fisiológica e da senescência. Nesses processos, à medida que diminui a quantidade de clorofila, refletem-se maiores quantidades de luz verde (550 nm) e vermelha (650 nm), resultando na aparência amarelada e marrom, maturação e senescência, respectivamente. Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho foram observados por Thenkabail et al. (2000) e Xavier et al. (2006).

De acordo com os resultados apresentados, fica evidente que V4 e R6, constituíram os estádios que apresentaram a maior correlação, entre os comprimentos de onda e as variáveis, nessa ordem.

4.10 Análise dos índices de vegetação

Com o intuito de determinarem-se as melhores bandas do espectro eletromagnético na estimativa das variáveis biofísicas, utilizando-se dados hiperespectrais, fez-se o uso do NDVI e da análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas bandas estreitas (NB_NDVI), para se estimarem-se as variáveis biofísicas.

4.10.1 Comportamento do NDVI

A Tabela 29 apresenta o resumo da análise da variância, para os valores do NDVI, obtidos nas sete coletas de dados radiométricos. Os resultados obtidos mostraram que a irrigação influenciou, significativamente, esse índice, em todos os dias de coleta, com exceção da coleta 5 (75 DAS). O efeito do nitrogênio mostrou-se não-significativo, nos valores de NDVI, durante todo o ciclo da cultura. Essa constatação pode estar associada à elevada precipitação que ocorreu no período experimental, restringindo, dessa forma, a possibilidade de influências significativas do N, devido ao possível processo de lixiviação desse nutriente para as camadas abaixo do sistema radicular da cultura. Portanto, estes resultados não estão de acordo com Stroppiana et al. (2009), que obtiveram bons resultados na estimativa da concentração de nitrogênio em plantação de arroz utilizando este mesmo índice.

Tabela 29 – Resumo da análise da variância da técnica da remoção do contínuo, para a característica NDVI, em função das lâminas de irrigação (I) e doses de N – Piracicaba, SP, 2007

Fonte	GL	NDVI ₁	NDVI ₂	NDVI ₃	NDVI ₄	NDVI ₅	NDVI ₆	NDVI ₇
I	3	3.35 ^{ns}	4.08*	2287.655**	1077.159**	3.53 ^{ns}	12.39**	95.31**
Regressão linear	1	1.44 ^{ns}	11.59**	6588.158**	2383.765**	0.81 ^{ns}	15.66*	229.86**
Regressão quadrática	1	2.57 ^{ns}	0.08 ^{ns}	57.60*	742.615**	9.05*	20.88**	47.43**
N	2	1.15 ^{ns}	3.04 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.18 ^{ns}	1.85 ^{ns}	0.96 ^{ns}	0.16 ^{ns}
Regressão linear	1	1.75 ^{ns}	4.06	0.02 ^{ns}	0.08 ^{ns}	2.83 ^{ns}	0.4 ^{ns}	0.13 ^{ns}
Regressão quadrática	1	0.56 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.39 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.87 ^{ns}	1.48 ^{ns}	0.20 ^{ns}
I x N	6	1.88 ^{ns}	2.29 ^{ns}	11.69**	3.85**	0.548 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.40 ^{ns}
Bloco	3	3.33 ^{ns}	0.33 ^{ns}	1.81 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.78 ^{ns}	0.04 ^{ns}	1.51 ^{ns}
CV _{água}	(%)	15.69	17.11	3.51	4.29	7.29	12.51	9.57
CV _{nitrogênio}	(%)	15.55	12.80	5.50	3.92	3.83	8.74	10.27

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

A interação entre I e N influenciou, significativamente, o NDVI, aos 36 e aos 55 DAS, (Tabela 28). Quando feita a análise do desdobramento da fonte de variação N, dentro de cada lâmina de irrigação (Tabela 30), observou-se que o N influenciou o NDVI em qualquer das lâminas aplicadas (36 DAS) e também influenciou o NDVI na lâmina $I_4 = 406,5$ mm (55 DAS).

Tabela 30 – Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação nitrogênio dentro de cada lâmina de irrigação, para o NDVI – Piracicaba, SP, 2007

Fonte	G.L.	NDVI ₃	NDVI ₄
		36 DAS	55 DAS
N / I1	2	8,44^{**}	3,07 ^{ns}
N / I2	2	10,38^{**}	0,99 ^{ns}
N / I3	2	7,87^{**}	2,29 ^{ns}
N / I4	2	8,58^{**}	5,36^{**}

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Para a análise do desdobramento da fonte de variação *irrigação*, dentro de cada dose de nitrogênio, observou-se que, em todas as doses de N, as lâminas de irrigação influenciaram o NDVI₃ e o NDVI₄ (Tabela 31).

Tabela 31 - Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio, para NDVI – Piracicaba, SP, 2007

Fonte	G.L.	NDVI ₃	NDVI ₄
		Coleta 3	Coleta 4
I / N1	3	202,32^{**}	383,47^{**}
I / N2	3	403,51^{**}	428,67^{**}
I / N3	3	349,79^{**}	484,61^{**}

Foi realizada uma análise de regressão entre o NDVI e as lâminas de irrigação, sendo escolhido o modelo linear, em virtude de apresentar o melhor ajuste às relações em estudo, em todas as coletas realizadas. Para quase todos os dias de coleta (com exceção das coletas 1 e 5, aos 14 DAS e aos 75 DAS), as variáveis apresentaram correlação significativa ($p < 0,01$) Tabela 32.

Tabela 32 – Equações de regressão linear e parâmetros observados para a relação obtida entre NDVI e lâminas de irrigação (I), nas coletas realizadas durante o período experimental – Piracicaba, SP, 2007

Característica	Equação de regressão	r	R ² (%)
NDVI ₂	NDVI ₂ = 0,000408 I + 0,324350	0,93	86,63
NDVI ₃	NDVI ₃ = 0,002683 I – 0,230230	0,98	96,00
NDVI ₄	NDVI ₄ = 0,002647 I – 0,023342	0,86	73,77
NDVI ₆	NDVI ₆ = -0,000637 I + 0,976538	0,65	42,13
NDVI ₇	NDVI ₇ = -0,001532 I + 1,103369	0,90	80,39

A Tabela 32 revela altos valores para o coeficiente de correlação (r) e para o coeficiente de determinação (R²), principalmente no NDVI₂ e NDVI₃, indicando uma forte correlação entre as variáveis *irrigação* e NDVI. Observou-se, ainda, que de 42,13% (NDVI₆) a 96% (NDVI₃) da variação do NDVI, na cultura do feijão, são explicados pelas lâminas de irrigação.

Entre os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, os dois que apresentaram maior correlação entre o NDVI e as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) foram V4 e R6, confirmando os resultados apresentados no item 4.9, em que se evidencia que V\$ e R6 foram os estádios que apresentaram uma maior correlação entre os comprimentos de onda e as variáveis (Tabela 33). Os valores de R² mais baixos foram observados nos estádios V2 e R9, sendo esse resultado causado, provavelmente, pela baixa resposta espectral da vegetação, em relação à resposta do solo captada pelo sensor.

Entre os diferentes estádios (V4 e R6), verifica-se que o V4 apresentou melhores resultados na estimativa das variáveis, *altura de plantas*, *número de vagens por planta* e *número de grãos por vagem* (Tabela 33). As variáveis IAF e *produtividade* apresentaram melhores resultados no estádio R6.

Pode-se dizer que o índice NDVI foi capaz de explicar em 82%, 81%, 78%, 48% e 38%, a variação da altura da planta, da produtividade, do IAF, do número de grãos por vagem e do número de vagens por planta, respectivamente.

Daughtry et al. (2000) e Thenkabail et al. (2000) encontraram melhores relações entre o NDVI e as variáveis IAF e *produtividade de grãos*, em culturas agrícolas, do que as evidenciadas neste trabalho.

Tabela 33 – Coeficiente de determinação (R^2) e valor de F da regressão entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e o índice NDVI, nos estádios fenológicos V4 e R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007

Variáveis biofísicas	Estádios fenológicos			
	V4 (36 DAS)		R6 (55 DAS)	
	Valor de F	R^2 (%)	Valor de F	R^2 (%)
IAF	157,9619**	77	164,2903**	78
Altura da planta	217,8393**	82	96,2556**	68
Produtividade	53,3384**	54	196,0129**	81
Vagens por planta	28,1129**	38	25,3943**	36
Grãos por vagem	41,9581**	48	17,6347**	28

DAS – dias após a semeadura

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

* em negrito é apresentado os maiores valores de R^2 para cada variável analisada

4.10.2 Mapas de isolinhas segundo o índice NB_NDVI

A seguir, apresentam-se mapas de isolinhas de R^2 , segundo o índice NB_NDVI, para todas as combinações de bandas estreitas, nos comprimentos de onda λ_i e λ_j , com largura de banda de $(\Delta\lambda)$ 3 nm, na estimativa de cada variável biofísica da cultura do feijão com base nas medidas radiométricas obtidas nos diferentes estádios fenológicos. Os gráficos mostram apenas os valores significativos de R^2 ($p < 0,05$). As regiões em branco identificam aquelas em que o NB_NDVI não teve relação significativa com a determinada variável.

A Figura 29 apresenta os mapas de isolinhas para a estimativa do IAF do feijão. Aos 14 e aos 25 DAS, para todas as variáveis, os valores de R^2 foram considerados baixos ($R^2 < 0,50$), para a maioria das combinações entre duas bandas estreitas analisadas (Figura 29a, b). Esses resultados foram causados, provavelmente, pela baixa resposta espectral da vegetação, comparada à resposta do solo, pois, nesses estádios (V2 e V3), a quantidade de biomassa verde é baixa e o solo fica mais exposto, tendo grande influência sobre a resposta espectral do dossel.

Portanto, quando se analisam os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura para essa variável (Figura 29), verifica-se que aqueles que apresentaram melhores resultados (maiores valores de R^2), na estimativa do IAF, foram V4 (36 DAS) e R6 (55 DAS), podendo estar associados ao fato de que, nesses estádios, a cultura apresentava folhas verdes e saudáveis, como também pouca influência do solo sobre resposta espectral. Comparando esses dois estádios fenológicos (V4 e R6), o V4 (36 DAS) apresentou melhores resultados na estimativa do IAF, pois as regiões com valores de R^2 significativos são maiores, assim como seus valores. Porém esses

resultados não estão de acordo com o item 4.9, em que o estágio R6 foi o que apresentou uma melhor correlação entre a variável IAF e a reflectância. Portanto, posteriormente, serão analisados os coeficientes de determinação (R^2) da relação entre o IAF e o índice NB_NDVI, nesses dois estádios de desenvolvimento da cultura (V4 e R6), para definir qual é o melhor deles para estimar-se o IAF, a partir do NB_NDVI.

Os maiores valores de R^2 foram para o NB_NDVI, calculados com NB1 (comprimento de onda no eixo das abcissas) variando, aproximadamente, de 750 a 950 nm e NB2 (comprimento de onda no eixo das ordenadas), entre 400 e 700 nm. Pode-se visualizar que tais combinações ocorreram entre bandas da região do visível e do infravermelho próximo e, geralmente, quanto maior o IAF, menor a reflectância na faixa do visível e maior a reflectância no infravermelho próximo. Na região do visível, os comprimentos de onda correspondem às regiões do azul (média absorção da radiação pelos pigmentos da planta) verde (baixa absorção da radiação pelos pigmentos da planta), e vermelho (alta absorção da radiação pelos pigmentos da planta); outra região é a da borda do vermelho ($\lambda \sim 700\text{nm}$ a 800nm), com rápido aumento da reflectância, sendo sensível ao estresse da vegetação (THENKABAIL et al., 2004) e a região do infravermelho próximo, caracterizada pela resposta da reflectância devido à estrutura das folhas e à quantidade de folhas.

Outra região que apresentou maiores valores de R^2 foi NB1, variando de 600 a 700 nm, além de NB2, variando de 500 a 600 nm, combinação entre bandas do vermelho e bandas da região do verde.

Figura 29 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa do IAF do feijão por meio do índice NB_NDVI, durante o ciclo da cultura. As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação ($R^2 < 0,1$) – Piracicaba, SP, 2007

Como o sensor visualizou, praticamente, a folha e sua reflectância nos determinados comprimentos de onda estão diretamente ligadas ao IAF. De acordo com o item 4.7, que apresenta a análise de regressão e os valores de correlação entre o IAF e as demais variáveis, os maiores valores de R^2 foram observados nos estádios V4 e R6. Diante disso, espera-se que os resultados da análise espectral, para esses estádios fenológicos, sejam semelhantes entre IAF e as demais variáveis, ou seja, as regiões de R^2 no mapa de isolinhas devem ser semelhantes assim como a magnitude de R^2 .

Nesse contexto, e de acordo com o item 4.9, o qual apresenta a correlação entre as reflectâncias e as variáveis biofísicas, para a análise das demais variáveis serão apresentados apenas os mapas de isolinhas referentes aos estádios V4 e R6.

Portanto, para a estimativa da altura da planta do feijão, com base no NB_NDVI, a análise é semelhante à da variável IAF. De acordo com o item 4.7, essas duas variáveis (AP e IAF) apresentam forte correlação, de 0,81 e 0,88, nos estádios V4 e R6, respectivamente.

As diferentes coletas (estádio V4 e R6) permitiram verificar que o estágio V4 apresentou melhores resultados na estimativa da altura da planta (Figura 30a). Tais resultados estão de acordo com o item 4.9, que registra o estágio V4 como o que apresentou uma melhor correlação entre a variável *altura da planta* e a reflectância. Os maiores valores de R^2 foram para o NB_NDVI, calculados com NB1 variando, aproximadamente, de 750 a 950 nm, e NB2, entre 400 e 700 nm. Outra região que apresenta maiores valores de R^2 é NB1, variando de 500 a 600 nm, além de NB2, variando de 400 a 550 nm, representando a combinação entre bandas do verde e bandas da região do azul e do verde.

Figura 30 – Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa da altura de planta (AP) do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação ($R^2 < 0,1$) – Piracicaba, SP, 2007

Para a estimativa da produtividade do feijão, com base no NB_NDVI, a análise é semelhante à da variável IAF. De acordo com o item 4.7, essas duas variáveis (produtividade e IAF) apresentaram correlação regular e forte, de 0,60 e 0,85, nos estádios V4 e R6, respectivamente. A Figura 31 apresenta esses dois estádios fenológicos, tendo apresentado melhores resultados, na estimativa da produtividade, o estágio R6 (Figura 31b), confirmando os resultados obtidos na estimativa do IAF (Figura 29), como também os do item 4.9, em que o estágio R6 apresentou uma melhor correlação entre a produtividade e a reflectância.

Os maiores valores de R^2 foram para o NB_NDVI calculados com NB1 variando, aproximadamente, de 750 a 950 nm e NB2, entre 400 e 700 nm, que representa a combinação entre bandas do visível e do infravermelho próximo. Outra região que apresenta valores maiores de R^2 (Figura 30b) é NB1, variando de 600 a 700 nm, além de NB2, variando de 500 a 600 nm, combinação entre bandas do vermelho e bandas da região do verde.

Figura 31 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa da produtividade do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação ($R^2 < 0,1$) – Piracicaba, SP, 2007

Para a estimativa do número de vagens por planta do feijão, com base no NB_NDVI, a análise é semelhante à da variável IAF, porém essas variáveis (número de vagens por planta e IAF) apresentam correlação moderada entre si (item 4.7), mostrando diferenças na magnitude de R^2 nos mapas de isolinhas (Figura 32). Essas duas variáveis apresentaram uma correlação de 0,41 e 0,62, nos estádios V4 e R6, respectivamente (item 4.7). A Figura 32 apresenta esses dois estádios fenológicos, tendo apresentado os melhores resultados na estimativa do número de

vagens por planta (NVP) o R6, pois as regiões com valores de R^2 significativos são maiores, assim como seus valores.

Os maiores valores de R^2 foram para o NB_NDVI, calculados com NB1 variando, aproximadamente, de 750 a 950 nm e NB2, de 400 a 700 nm. Outras regiões que apresentam altos valores de R^2 são NB1, variando de 600 a 700 nm, e NB2, variando de 500 a 600 nm, que representam a combinação entre bandas do vermelho e bandas da região do verde.

Figura 32 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para a estimativa do número de vagens por planta (NVP) do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação – Piracicaba, SP, 2007

Para a estimativa do número de grãos por vagem (NGV) do feijão, com base no NB_NDVI, a análise é também semelhante à da variável IAF, porém tais variáveis apresentam correlação moderada entre si (item 4.7), de 0,65 e 0,63, nos estádios V4 e R6, respectivamente. A Figura 33 apresenta esses dois estádios de desenvolvimento, tendo apresentado os melhores resultados na estimativa de NGV o estádio V4 (Figura 33a). Esse resultado também foi observado na correlação entre NGV e reflectância (item 4.9), que apresentaram uma melhor correlação no estádio V4.

Os maiores valores de R^2 foram para o NB_NDVI, calculados com NB1 variando, aproximadamente, de 500 a 600 nm, e o NB2, variando de 400 a 500 nm, que representa a combinação entre bandas do verde com bandas da região do azul. Outra região que apresenta maiores valores de R^2 é para NB1 entre 700 e 750 nm e NB2 entre 400 e 500 nm, que representam a combinação entre bandas do infravermelho próximo e bandas da região do azul.

Figura 33 - Mapas de isolinhas dos coeficientes de determinação (R^2) para estimativa do número de grãos por vagem (NGV) do feijão por meio do índice NB_NDVI, para os estádios V4 (a) e R6 (b). As regiões em branco foram as que não apresentaram correlação – Piracicaba, SP, 2007

A Tabela 34 apresenta os coeficientes de determinação (R^2) da relação entre as variáveis biofísicas (IAF, AP, produtividade, NVP e NGV) e o índice NB_NDVI, nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura. Em geral, os melhores valores de R^2 , em todo o desenvolvimento da cultura, foram observados nos estádios V4 e R6, de acordo com a variável analisada. Por outro lado, os valores de R^2 mais baixos foram observados nos estádios V2 e R9, tendo este resultado sido causado, provavelmente, pela baixa resposta espectral da vegetação frente à resposta do solo, pois, nesses estádios, a quantidade de biomassa verde é baixa e o solo tem grande influência na resposta espectral. As únicas relações entre NB_NDVI e as variáveis biofísicas que não foram significativas, no nível de 5%, foram as referentes ao estágio V2. Resultados similares foram observados, por Xavier et al. (2006), na cultura do trigo, em que o estágio espigamento I foi o que melhor estimou a altura e a produtividade de grãos, pois, corresponde ao período de pleno desenvolvimento vegetativo da cultura e, os estádios afilhamento e maturação, foram os que apresentaram menores valores de R^2 , que correspondem aos períodos de início e fim do desenvolvimento da cultura.

O índice NB_NDVI foi capaz de explicar em 86%, 86%, 84%, 47% e 53%, a variação do IAF, da altura da planta, da produtividade de grãos, do número de vagens por planta e do número de grãos por vagem, respectivamente. Os melhores resultados foram observados nas bandas da região do visível, para as variáveis IAF e *altura da planta*, e na região do infravermelho próximo, para as variáveis *produtividade de grãos*, *número de vagens por planta* e *número de grãos por vagem*. Como se esperava, as relações entre o índice de vegetação e as variáveis IAF e *produtividade* foram positivas, respondendo esses índices crescentemente à

biomassa verde (IAF), que, por sua vez, está associada positivamente à produtividade (ASRAR et al., 1984).

Tabela 34 – Coeficientes de determinação (R^2) e comprimento de onda (nm) da relação entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e o índice NB_NDVI nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura – Piracicaba, SP, 2007

Variável dependente	Estádio	Variável independente (NB_NDVI)				R²
		V (400 a 700 nm)		IVP (701 a 950 nm)		
IAF	V2	-	-	839	855	0,16
	V3	407	469	-	-	0,50
	V4		611	714	-	0,83
	R6	508	643	-	-	0,86
	R8	420	-	-	942	0,42
	R9	-	-	759	783	0,61
	R9	611	614	-	-	0,57
Altura	V2	469	483	-	-	0,28
	V3	-	-	753	762	0,44
	V4	-	561	732	-	0,86
	R6	593	608	-	-	0,81
	R8	533	550	-	-	0,57
	R9	-	-	829	839	0,46
	R9	-	-	792	810	0,40
Produtividade	V2	425	435	-	-	0,32
	V3	404	433	-	-	0,42
	V4	-	-	762	783	0,63
	R6	-	-	759	765	0,84
	R8	-	-	792	823	0,68
	R9	-	-	829	839	0,62
	R9	539		726		0,60
Vagens por planta	V2	428	458			0,25
	V3	525	539			0,45
	V4			756	780	0,42
	R6		634	705		0,47
	R8			789	880	0,43
	R9	527	550			0,23
	R9	536		726		0,39
Grãos por vagem	V2			940	943	0,25
	V3	404	477			0,38
	V4	449	502			0,53
	R6			768	771	0,41
	R8			795	842	0,42
	R9	533	541			0,48
	R9			783	813	0,52

V – região do visível;

IVP – região do infravermelho próximo;

R^2 – maiores valores do coeficiente de determinação encontrados

* em negrito é apresentado os maiores valores de R^2 para cada variável analisada

4.11 Remoção do contínuo e análise das áreas e das profundidades das bandas

Nesta pesquisa, foram utilizados os valores originais dos espectros normalizados, no comprimento de onda selecionado, como o local de máxima absorção.

A normalização das características de absorção da região do vermelho do espectro eletromagnético (550 - 800 nm), utilizando a remoção do contínuo, realça as características de absorção e aumenta a escala dos valores nessa região, tornando possível uma melhor diferenciação entre os tratamentos. A Figura 34 mostra os espectros originais dos tratamentos *lâminas de irrigação e doses de nitrogênio*, no estágio R6, da cultura do feijão. As diferenças entre os tratamentos são totalmente evidenciadas nos espectros de remoção do contínuo (Figura 35), quando comparados aos espectros originais (Figura 34). A remoção do contínuo reduz os efeitos externos e maximiza as feições espectrais (MUTANGA et al., 2003).

Figura 34 – Espectro de reflectância original no estágio R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007

Figura 35 – Contínuo removido aplicado à banda entre 550 e 800 nm para o estádio R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007

A Figura 36 ilustra os resultados da aplicação do contínuo para o intervalo espectral entre 550 e 800 nm, em que ocorre a absorção da energia por parte da clorofila, para realizar a fotossíntese (SCHMIDT; SKIDMORE, 2003). Conforme mencionado anteriormente, a banda entre 550 e 800 nm foi centrada no comprimento de onda de 665 nm, estando a amplitude dessa banda de absorção diretamente associada ao teor de clorofila. Além disso, o desenvolvimento fenológico do feijão pode ser acompanhado pelos espectros de reflectância normalizados, também apresentados na Figura 36.

A análise da Figura 36 permite observar que os diferentes tratamentos puderam ser identificados na banda de absorção utilizada. A lâmina de água aplicada no estádio inicial da cultura foi igual para todos os tratamentos. Portanto, conforme a Figura 36a, não houve diferença significativa entre os tratamentos, pois a vegetação estava no seu estádio inicial de desenvolvimento vegetativo, apresentando, conseqüentemente, menor quantidade de biomassa verde, o que resultou em maiores valores de reflectância nessa faixa de absorção.

A partir dos 22 DAS, ocorreu a diferenciação na lâmina de água aplicada, o que mostra que a banda de absorção entre 550 e 800 nm já começara a apresentar maior profundidade, devido ao aumento da lâmina de irrigação (Figura 36b). Os tratamentos que receberam maior quantidade de água apresentaram maior profundidade e maior área de banda de absorção (Figuras 36c e d). Na Figura 36d, pode-se observar que, realmente, os tratamentos que receberam menor quantidade de água, independente da dose de N, foram os que tiveram maior reflectância.

Após os 50 DAS, devido às precipitações consideráveis em torno de 25 dias, não houve necessidade de irrigações. Portanto todos os tratamentos receberam a mesma quantidade de água e, com isso, recuperaram-se bem os tratamentos que estavam recebendo menores quantidades de água (Figura 36e). Na mesma figura, é possível visualizar que todos os tratamentos apresentaram aumento na absorção da radiação eletromagnética, quando comparados à data anterior.

É importante ressaltar que, mesmo havendo um período de precipitações efetivas, ocorreu um atraso no ciclo da cultura, nos tratamentos que receberam menor quantidade de água. Esses tratamentos tiveram um ciclo maior, ocasionando uma colheita tardia (Figuras 36f e g).

Figura 36 - Remoção do contínuo aplicada à banda entre 550 e 800 nm, para os diferentes estádios fenológicos nos 12 tratamentos: T1 – 179,5 mm e sem dose de nitrogênio (N); T2 – 179,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T3 – 179,5 mm e N=160 kg ha⁻¹; T4 – 256,5 mm e sem N; T5 – 256,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T6 – 256,5 mm e N= 160 kg ha⁻¹; T7 – 357,5 mm e sem N; T8 – 357,5 mm e N=80 kg ha⁻¹; T9 – 357,53 mm e N=160 kg ha⁻¹; T10 – 406,2 mm e sem N; T11 – 406,2 mm e N=80 kg ha⁻¹; T12 – 406,2 mm e N=160 kg ha⁻¹

Em geral, verifica-se que a banda de absorção entre 550 e 800 nm é importante para estudar pigmentos fotossintetizantes, por ser independente do conteúdo de água (MUTANGA et al., 2003; MUTANGA et al., 2005). Normalmente, essa banda apresenta maior profundidade com o aumento da adubação nitrogenada, indicando maior IAF e, possivelmente, uma melhor condição nutricional. Isso pode estar associado ao maior desenvolvimento ou à maior disponibilidade de pigmentos clorofilados, que causam o aumento na absorção da radiação eletromagnética na banda (CURRAN; DUNGAN; PETERSON, 2001; SCHIMIDT e SKIDMORE, 2003). Mas, diferentemente dos resultados obtidos por Mutanga et al. (2003), que estudaram gramíneas tratadas com 3 doses de N, e para os quais à medida que aumentou a concentração de N, ocorreu um aumento da absorção da radiação eletromagnética (REM), neste estudo, a concentração de N não teve influência sobre a profundidade da banda de absorção porque todos os tratamentos focaram de forma praticamente igual na lixiviação.

Mesmo que essa banda de absorção não esteja diretamente ligada ao conteúdo de água nas folhas, o déficit hídrico em uma planta causa a degradação de proteínas e de pigmentos fotossintetizantes, o que torna a folha menos apta a absorver radiação eletromagnética na região espectral do visível, resultando no aumento dos valores do FR (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007). Em outras palavras, a falta de água traz, como consequência, a diminuição da absorção de nutrientes, a degradação de alguns tecidos e a diminuição do porte da planta, ocasionando a diminuição da absorção da REM.

As Tabelas 35 e 36 apresentam o resumo da análise da variância para a técnica da remoção do contínuo. Nessas tabelas, pode-se observar que a irrigação influenciou, significativamente, a área da banda de absorção, em todas as coletas. Já a profundidade da banda de absorção (Prof) foi influenciada pela irrigação, em todas as coletas, com exceção da Coleta 5 (75 DAS). Tanto a área quanto a profundidade da banda de absorção, não foram influenciadas significativamente pelas doses de N.

Tabela 35 – Resumo da análise da variância da técnica da remoção do contínuo, para a característica área da banda de absorção, em função das lâminas de irrigação e doses de N – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Area_1	Area_2	Area_3	Area_4	Area_5	Area_6	Area_7
		14 DAS	25 DAS	36 DAS	55 DAS	75 DAS	80 DAS	87 DAS
Irrigação	3	1.60 ^{ns}	4.10[*]	2408.974^{**}	1068.801^{**}	4.38[*]	15.88^{**}	87.51^{**}
Regressão linear	1	0.15 ^{ns}	10.74^{**}	6918.196^{**}	2404.968^{**}	0.01 ^{ns}	22.87^{**}	214.49^{**}
Regressão quadrática	1	2.33 ^{ns}	0.07 ^{ns}	64.26^{**}	709.04^{**}	11.18^{**}	23.66^{**}	38.63^{**}
N	2	1.16 ^{ns}	2.98 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.43 ^{ns}	3.12 ^{ns}	1.17 ^{ns}	0.32 ^{ns}
Regressão linear	1	0.04 ^{ns}	5.94 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.04 ^{ns}	5.20 ^{ns}	1.07 ^{ns}	0.32 ^{ns}
Regressão quadrática	1	0.28 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.88 ^{ns}	0.82 ^{ns}	1.04 ^{ns}	1.26 ^{ns}	0.32 ^{ns}
I x N	6	2.76 ^{ns}	2.18 ^{ns}	13.28^{**}	5.45^{**}	0.57 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.42 ^{ns}
Bloco	3	1.64 ^{ns}	0.40 ^{ns}	1.30 ^{ns}	0.95 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.04 ^{ns}	1.67 ^{ns}
CV _{água} (%)	-	80.74	40.16	5.80	6.21	10.26	16.96	14.47
CV _{nitrogênio} (%)	-	66.69	29.78	8.86	5.19	5.25	12.18	15.20

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 36 – Resumo da análise da variância da técnica da remoção do contínuo, para a característica profundidade da banda de absorção (Prof), em função das lâminas de irrigação e doses de N – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Prof_1	Prof_2	Prof_3	Prof_4	Prof_5	Prof_6	Prof_7
		14 DAS	25 DAS	36 DAS	55 DAS	75 DAS	80 DAS	87 DAS
Irrigação	3	3.51 ^{ns}	3.87*	103.31**	1076.06**	3.41 ^{ns}	9.87**	91.58**
Regressão linear	1	1.58 ^{ns}	9.90*	305.54**	2293.38**	0.81 ^{ns}	10.33*	216.48**
Regressão quadrática	1	3.71 ^{ns}	0.09 ^{ns}	3.11 ^{ns}	814.12**	8.35*	18.68**	54.48**
N	2	1.59 ^{ns}	2.97 ^{ns}	1.16 ^{ns}	0.39 ^{ns}	1.35 ^{ns}	0.93 ^{ns}	0.05 ^{ns}
Regressão linear	1	2.04 ^{ns}	5.90 ^{ns}	2.02 ^{ns}	0.72 ^{ns}	2.06 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.01 ^{ns}
Regressão quadrática	1	1.13 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.64 ^{ns}	1.62 ^{ns}	0.09 ^{ns}
I x N	6	2.05 ^{ns}	2.18 ^{ns}	4.35**	2.14 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.44 ^{ns}	0.36 ^{ns}
Bloco	3	3.23 ^{ns}	0.35 ^{ns}	1.72 ^{ns}	0.44 ^{ns}	0.83 ^{ns}	0.02 ^{ns}	1.36 ^{ns}
CV _{água} (%)	-	37.25	26.51	21.30	5.09	6.67	11.85	9.80
CV _{nitrogênio} (%)	-	36.14	19.10	18.93	5.74	3.60	8.52	10.79

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

A interação entre I e N influenciou a área da banda de absorção, aos 36 e aos 55 DAS, respectivamente (Tabela 35), e a profundidade da banda, aos 36 DAS (Tabela 36). Quando se fez a análise do desdobramento da fonte de variação N dentro de cada lâmina de irrigação (Tabela 37), observou-se que o N influenciou a área da banda de absorção aos 36 DAS, em qualquer uma das lâminas aplicadas, e influenciou a área da banda de absorção aos 55 DAS, nos tratamentos que receberam as lâminas I₁ = 179,5 mm e I₄ = 406,5 mm, e influenciou a Prof. aos 36 DAS no tratamento que recebeu a lâmina I₃ = 357,5 mm.

Tabela 37 - Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação nitrogênio dentro de cada lâmina de irrigação, para área da banda de absorção e profundidade da banda – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Área_3	Área_4	Prof_3
		36 DAS	55 DAS	36 DAS
N / I1	2	6,24**	3,91*	2,74 ^{ns}
N / I2	2	15,20**	1,10 ^{ns}	1,13 ^{ns}
N / I3	2	9,12**	3,17 ^{ns}	9,79**
N / I4	2	9,76**	8,61**	0,55 ^{ns}

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Para a análise do desdobramento da fonte de variação da irrigação, dentro de cada dose de nitrogênio, observou-se que, em todas as doses de N, as lâminas de irrigação influenciaram a Área aos 36 e 55 DAS e a Prof., aos 36 DAS (Tabela 38).

Tabela 38 - Valor de F da análise do desdobramento da fonte de variação irrigação dentro de cada dose de nitrogênio, para área da banda de absorção e profundidade da banda – Piracicaba, SP, 2007

Fonte de variação	Grau de liberdade	Área_3	Área_4	Prof_3
		36 DAS	55 DAS	36 DAS
I / N1	3	219,36**	445,37**	27,15**
I / N2	3	429,40**	521,70**	51,23**
I / N3	3	409,41**	577,00**	61,12**

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

* Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

** Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

A técnica da remoção do contínuo mostrou-se eficiente na discriminação dos tratamentos utilizados, concordando com Kokaly et al. (2003).

4.11.1 Relação entre a remoção do contínuo e as variáveis biofísicas

É importante entender até que ponto os produtos obtidos de medidas espectrais se correlacionam com as variáveis biofísicas, uma vez que essas variáveis são fundamentais nos modelos de produtividade. Para tanto, realizou-se a análise de regressão das variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) com as profundidades e as áreas da banda de absorção, para o intervalo espectral entre 550 e 800 nm, em cada uma das datas de coleta dos dados radiométricos.

De modo geral, a relação das profundidades e das áreas das bandas de absorção com as variáveis biofísicas foi semelhante à relação encontrada entre os índices NDVI e NB_NDVI e as variáveis biofísicas. Os maiores R^2 foram obtidos nos estádios V4 e R6.

Na relação entre as variáveis *índice de área foliar* (IAF) e *profundidade da banda* (PB) (Tabela 39) e entre o IAF e a *área da banda de absorção* (AB) (Tabela 40), verifica-se que os maiores valores de R^2 foram obtidos nos estádios V4 e R6, mostrando uma boa relação entre IAF e PB (75% e 76%, respectivamente) e entre IAF e AB (78% e 79%, respectivamente). Os demais estádios apresentaram uma relação ruim, tanto entre IAF e PB, quanto entre IAF e AB.

Nota-se que, independentemente dos valores baixos de R^2 , com exceção dos estádios V4 e R6, que apresentaram boa relação, as equações de regressão linear simples foram significativas em 1% de probabilidade, com exceção do estágio V2, que não foi significativo.

Portanto, para obter-se uma melhor precisão na estimativa de IAF, a partir de PB e AB, devem-se utilizar as equações do estágio R6, por possuírem os maiores valores de R^2 .

Tabela 39 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o índice de área foliar (IAF) e as profundidades da banda de absorção (PB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	18/09	14	V2	0,1586 ^{ns}	IAF = 0,1215PB + 0,861	0,0583	0,0034
2 ^a	29/10	25	V3	12,8032 ^{**}	IAF = 1,0658PB + 1,2387	0,4666	0,2177
3 ^a	10/10	36	V4	140,6523 ^{**}	IAF = 7,01PB – 0,093	0,8681	0,7536
4 ^a	29/10	55	R6	146,709 ^{**}	IAF = 2,4984PB + 0,7077	0,8725	0,7613
5 ^a	18/11	75	R8	23,4165 ^{**}	IAF = 14,012PB – 7,7385	0,5808	0,3373
6 ^a	23/11	80	R9	34,4178 ^{**}	IAF = 6,4304PB – 1,2763	0,6542	0,428
7 ^a	30/11	87	R9	33,7219 ^{**}	IAF = 4,5894PB + 0,5813	0,6504	0,423

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 40 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o índice de área foliar (IAF) e as áreas da banda de absorção (AB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	18/09	14	V2	0,1672 ^{ns}	IAF = 0,0032AB + 0,871	0,06	0,0036
2 ^a	29/10	25	V3	13,8171 ^{**}	IAF = 0,021AB + 1,3877	0,4806	0,231
3 ^a	10/10	36	V4	161,0614 ^{**}	IAF = 0,0447AB + 1,0309	0,8819	0,7778
4 ^a	29/10	55	R6	168,3311 ^{**}	IAF = 0,1184AB + 0,7523	0,8862	0,7854
5 ^a	18/11	75	R8	30,043 ^{**}	IAF = 0,1914AB - 3,6525	0,6286	0,3951
6 ^a	23/11	80	R9	47,7837 ^{**}	IAF = 0,0913AB + 0,5165	0,7138	0,5095
7 ^a	30/11	87	R9	35,1756 ^{**}	IAF = 0,0764AB + 1,504	0,6582	0,4333

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Para a relação entre as variáveis *altura da planta* (AP) e PB (Tabela 41) e entre AP e AB (Tabela 42), verifica-se que os maiores valores de R^2 foram obtidos nos estádios V4 e R6, observando-se, no estádio V4, ótima relação entre AP e PB (82%), como também entre AP e AB (83%). Já no estádio R6, as mesmas relações, AP e PB, e AP e AB, foram regulares, de 65% e 69%, respectivamente. Nos demais estádios, tais relações foram ruins.

No entanto, para obter-se uma melhor precisão na estimativa de IAF, a partir de PB e AB, deve-se utilizar a equação do estádio V4, por possuir os maiores valores de R^2 .

Tabela 41 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre a altura da planta (AP) e as profundidades da banda de absorção (PB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	18/09	14	V2	1,1981 ^{ns}	AP = 1,5074PB + 9,724	0,1594	0,0254
2 ^a	29/09	25	V3	8,6228 ^{**}	AP = 4,0478PB + 13,469	0,3974	0,1579
3 ^a	10/10	36	V4	214,3563 ^{**}	AP = 24,543PB + 14,785	0,9074	0,8233
4 ^a	29/10	55	R6	84,5255 ^{**}	AP = 27,163PB + 22,036	0,8047	0,6476
5 ^a	18/11	75	R8	8,3578 ^{**}	AP = 26,487PB - 3,5762	0,3922	0,1538
6 ^a	23/11	80	R9	0,096 ^{ns}	AP = 1,5599PB + 19,59	0,0458	0,0021
7 ^a	30/11	87	R9	5,7766 [*]	AP = -6,8475PB + 25,45	0,3341	0,1116

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 42 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre a altura da planta (AP) e as áreas da banda de absorção (AB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	18/09	14	V2	1,5012 ^{ns}	AP = 0,0427AB + 9,8329	0,1778	0,0316
2 ^a	29/09	25	V3	8,6779 ^{**}	AP = 0,0778AB + 14,064	0,3984	0,1587
3 ^a	10/10	36	V4	25,5246 ^{**}	AP = 0,4357AB + 18,033	0,9106	0,8292
4 ^a	29/10	55	R6	115,6767 ^{**}	AP = 0,4634AB + 25,14	0,8297	0,6884
5 ^a	18/11	75	R8	14,7264 [*]	AP = 0,282AB + 7,7088	0,3307	0,1094
6 ^a	23/11	80	R9	0,1571 ^{ns}	AP = -0,0221AB + 21,691	0,05	0,0025
7 ^a	30/11	87	R9	1,8974 [*]	AP = -0,123AB + 24,328	0,3648	0,1331

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Para a relação entre a variável *produtividade de grãos* (PG) e a PB (Tabela 43) e entre a PG e a AB (Tabela 44), verifica-se que os maiores valores de R² foram obtidos nos estádios V4 e R6, observando-se, no estádio R6, uma boa relação entre PG e PB (79%); já entre PG e AP, foi observada uma ótima relação (82%). Quanto ao estádio V4, as mesmas relações, PG e PB e PG e AB, foram ruins, de 56% e 53%, respectivamente. Nos demais estádios, essas relações foram ruins.

No entanto, para obter-se uma melhor precisão na estimativa da produtividade de grãos, a partir de PB e AB, deve-se utilizar a equação do estádio R6, por possuir os maiores valores de R².

Tabela 43 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre a produtividade de grãos (PG) e as profundidades da banda de absorção (PB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	18/09	14	V2	0,4208 ^{ns}	PG = -1239PB + 3097,6	0,0954	0,0091
2 ^a	29/10	25	V3	8,3605 ^{**}	PG = 4256,9PB + 1077,4	0,3922	0,1538
3 ^a	10/10	36	V4	57,3879 ^{**}	PG = 2874,9PB + 1285	0,7450	0,5551
4 ^a	29/10	55	R6	178,3053 ^{**}	PG = 3205,9PB + 424,23	0,8916	0,7949
5 ^a	18/11	75	R8	9,4467 ^{**}	PG = 9891,2PB – 6064,7	0,4128	0,1704
6 ^a	23/11	80	R9	0,0422 ^{ns}	PG = -341,47PB + 3126,3	0,03	0,0009
7 ^a	30/11	87	R9	15,3066 ^{**}	PG = -3378,1PB + 5113,2	0,4997	0,2497

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 44 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre a produtividade de grãos (PG) e as áreas da banda de absorção (AB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	18/09	14	V2	0,0167 ^{ns}	PG = -6,2845AB + 2877,1	0,02	0,0004
2 ^a	29/10	25	V3	8,5261 ^{**}	PG = 82,253AB + 1697,6	0,3955	0,1564
3 ^a	10/10	36	V4	52,5509 ^{**}	PG = 49,843AB + 1693,1	0,7302	0,5332
4 ^a	29/10	55	R6	205,7158 ^{**}	PG = 53,79AB + 824,66	0,9040	0,8173
5 ^a	18/11	75	R8	5,3724 [*]	PG = 97,825AB – 1516	0,3234	0,1046
6 ^a	23/11	80	R9	1,0131 ^{ns}	PG = -21,525AB + 3659,5	0,1466	0,0215
7 ^a	30/11	87	R9	18,3511 ^{**}	PG = -59,388AB + 4522,7	0,5340	0,2852

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Para a relação entre a variável *número de vagens por planta* (NVP) e a PB (Tabela 45) e entre NVP e a AB (Tabela 46), verifica-se que, nos estádios V4 e R6, foram observados os maiores valores de R², comparativamente com os demais estádios. Apesar de os valores de R² dos estádios V4 e R6 serem baixos, as equações de regressão linear simples desses estádios, foram significativas, a 1% de probabilidade. Nesses dois estádios de desenvolvimento da cultura, observou-se uma relação ruim entre NVP e PB (38% e 34%, respectivamente) e entre NVP e AB

(38% e 37%, respectivamente). Nos demais estádios, observou-se uma relação ruim, tanto entre IAF e PB, quanto IAF e AB, resultando valores muito baixos de R^2 .

No entanto, para obter-se uma melhor precisão na estimativa do número de vagens por planta, a partir de PB e AB, deve-se utilizar a equação do estádio V4, por possuir os maiores valores de R^2 .

Tabela 45 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o número de vagens por planta (NVP) e as profundidades da banda de absorção (PB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	18/09	14	V2	0,0975 ^{ns}	VP = 2,2165PB + 12,092	0,0458	0,0021
2 ^a	29/10	25	V3	10,9631 ^{**}	VP = 17,633PB + 5,2012	0,4387	0,1925
3 ^a	10/10	36	V4	28,7296 ^{**}	VP = 8,8592PB + 7,7195	0,62	0,3844
4 ^a	29/10	55	R6	23,8614 ^{**}	VP = 7,7812PB + 6,6534	0,5845	0,3416
5 ^a	18/11	75	R8	2,7467 ^{ns}	VP = 21,062PB – 6,4423	0,2373	0,0563
6 ^a	23/11	80	R9	0,4187 ^{ns}	VP = -3,9643PB + 15,763	0,0949	0,009
7 ^a	30/11	87	R9	9,2741 ^{**}	VP = -10,254PB + 19,412	0,4096	0,1678

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 46 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o número de vagens por planta (NVP) e as áreas da banda de absorção (AB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	18/09	14	V2	0,2231 ^{ns}	VP = 0,085AB + 12,151	0,0693	0,0048
2 ^a	29/10	25	V3	11,6267 ^{**}	VP = 0,346AB + 7,6967	0,4492	0,2018
3 ^a	10/10	36	V4	28,1752 ^{**}	VP = 0,1558AB + 8,9267	0,6163	0,3798
4 ^a	29/10	55	R6	26,8250 ^{**}	VP = 0,1337AB + 7,5065	0,6069	0,3683
5 ^a	18/11	75	R8	1,1188 ^{ns}	VP = 0,1726AB + 4,8371	0,1539	0,0237
6 ^a	23/11	80	R9	1,5977 ^{ns}	VP = -0,0995AB + 16,285	0,1833	0,0336
7 ^a	30/11	87	R9	11,2061 ^{**}	VP = -0,1823AB + 17,676	0,4426	0,1959

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Para a relação entre a variável *número de grãos por vagem* (NGV) e PB (Tabela 47) e entre NGV e AB (Tabela 48), verifica-se que, diferentemente das outras análises, os estádios V4 e R9 apresentaram maiores valores de R^2 e que, independentemente de esses valores serem baixos, as equações de regressão linear simples dos estádios V4 e R9 foram significativas em 1% de probabilidade. Nesses dois estádios de desenvolvimento da cultura, observou-se uma relação ruim entre NGV e PB (48% e 33%, respectivamente) e entre NGV e AB (47% e 33%, respectivamente). Nos demais estádios, observou-se uma relação ruim, tanto entre IAF e PB, quanto entre IAF e AB, resultando valores muito baixos de R^2 .

No entanto, para obter-se uma melhor precisão na estimativa do número de grãos por vagem, a partir de PB e AB, deve-se utilizar a equação do estádio V4, por possuir os maiores valores de R^2 .

Tabela 47 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o número de grãos por vagem (NGV) e as profundidades da banda de absorção (PB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R^2
1 ^a	18/09	14	V2	2,2840 ^{ns}	GV = -1,1688PB + 4,2631	0,2175	0,0473
2 ^a	29/10	25	V3	5,1179 [*]	GV = 1,4183PB + 3,4381	0,3164	0,1001
3 ^a	10/10	36	V4	41,8653 ^{**}	GV = 1,0999PB + 3,43	0,6903	0,4765
4 ^a	29/10	55	R6	16,8505 ^{**}	GV = 0,7688PB + 3,4468	0,5178	0,2681
5 ^a	18/11	75	R8	0,2097 ^{ns}	GV = 0,6667PB + 3,4274	0,0671	0,0045
6 ^a	23/11	80	R9	7,4688 ^{**}	GV = -1,7397PB + 5,4435	0,3738	0,1397
7 ^a	30/11	87	R9	22,3274 ^{**}	GV = -1,5958PB + 5,098	0,5717	0,3268

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R^2 – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

Tabela 48 – Equações de regressão linear simples e parâmetros para a relação observada entre o número de grãos por vagem (NGV) e as áreas da banda de absorção (AB) para o intervalo entre 550 e 800 nm, centrada em 665 nm – Piracicaba, SP, 2007

Coleta	Data	DAS	Estádio	Valor de F	Equação de Regressão	r	R ²
1 ^a	18/09	14	V2	0,0316 ^{ns}	GV = -0,0036AB + 4,0444	0,0265	0,0007
2 ^a	29/10	25	V3	5,1270 [*]	GV = 0,0272AB + 3,6476	0,3167	0,1003
3 ^a	10/10	36	V4	40,8614 ^{**}	GV = 0,0193AB + 3,58	0,6859	0,4704
4 ^a	29/10	55	R6	17,6499 ^{**}	GV = 0,0129AB + 3,5413	0,5266	0,2773
5 ^a	18/11	75	R8	0,1488 ^{ns}	GV = -0,0071AB + 4,3446	0,0566	0,0032
6 ^a	23/11	80	R9	12,5273 ^{**}	GV = -0,028AB + 5,0836	0,4626	0,214
7 ^a	30/11	87	R9	22,7558 ^{**}	GV = -0,0264AB + 4,773	0,5753	0,331

DAS – dias após a semeadura

r – coeficiente de correlação;

R² – coeficiente de determinação;

^{ns} Não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{*} Significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo teste F

^{**} Significativo em nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F

A Tabela 49 apresenta um resumo dos coeficientes de determinação (R²) da relação entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e os índices profundidade da banda e a área da banda de absorção, nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

Tabela 49 – Coeficiente de determinação (R²) da regressão entre as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem) e os parâmetros “profundidade da banda de absorção (PB)” e “área da banda de absorção (AB)”, nos estádios fenológicos V4 e R6 da cultura do feijão – Piracicaba, SP, 2007

Variável biofísica	R ² (%)			
	Profundidade da banda (PB)		Área da banda (AB)	
	V4	R6	V4	R6
IAF	75	76	78	79
Altura da planta	82	65	83	69
Produtividade de grãos	55	79	53	82
Número de vagens por planta	38	34	38	37
Número de grãos por vagem	48	33 (estádio R9)	47	33 (estádio R9)

* em negrito é apresentado os maiores valores de R² para cada variável analisada

Diante dos resultados apresentados, quando se analisam os diferentes estádios fenológicos para a profundidade e a área da banda de absorção, verifica-se que aqueles que apresentaram melhores resultados (maiores valores de R²), na estimativa das variáveis biofísicas,

foram os estádios V4 (36 DAS) e R6 (55 DAS). Neles, a cultura apresentava folhas verdes e saudáveis, pouca influência do solo na resposta espectral da cultura e já se percebiam diferenças significativas entre os tratamentos aplicados. O estádio R6 (55 DAS) apresentou o maior IAF ($8,30 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e a maior média de IAF ($5,21 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) durante o ciclo da cultura, mas, mesmo assim, apenas duas variáveis apresentaram maiores valores de R^2 nesse estádio, o *IAF* e a *produtividade de grãos*, convergindo para os resultados obtidos por meio das outras metodologias, NDVI e NB_NDVI.

A profundidade da banda e a área da banda de absorção foram capazes de explicar em 76 e 79%, 82 e 83%, 79 e 82%, 38 e 38%, 48 e 47%, a variação do IAF, da altura da planta, da produtividade de grãos, do número de vagens por planta e do número de grãos por vagem, respectivamente.

Alvarenga (2004) não obteve uma boa relação entre a produtividade do trigo e a profundidade da banda de absorção, centrada em 672 nm. A profundidade da banda explicou 28% da produtividade de grãos do trigo. Mutanga et al. (2004), encontraram valores de R^2 superiores a 81%, na estimativa da biomassa da grama, por meio de índices de profundidade da banda.

Analisando-se os resultados obtidos, percebe-se que a remoção do contínuo é uma técnica que maximiza os efeitos das feições de absorção espectral, segundo Huang et al. (2004). Desse modo, pequenas variações nos espectros de reflectância podem ser diferenciadas (MEER, 2000), ampliando-se as diferenças estatísticas (SCHMIDT; SKIDMORE, 2001, 2003), e aumentando-se a capacidade de seu uso em previsão de safras.

4.12 Relação entre as metodologias

Na Figura 37, apresentam-se os valores de R^2 dos índices hiperespectrais NDVI, NB_NDVI, e da remoção do contínuo, profundidade da banda (PB) e área da banda de absorção (AB), para a estimativa das variáveis biofísicas da cultura do feijão (IAF, altura da planta, produtividade de grãos, número de vagens por planta e número de grãos por vagem). Com relação a todas as variáveis biofísicas, observa-se que o índice NB_NDVI apresentou melhores resultados, com diferença significativa, em relação aos demais parâmetros analisados (NDVI, AB, PB), em todos os estádios de desenvolvimento da cultura. Para as variáveis *IAF* (Figura 37a), *produtividade de grãos* (Figura 37c) e *número de vagens por planta* (Figura 37d), os maiores

valores de R^2 foram observados no estágio R6 e no índice NB_NDVI, apresentando o estágio R6, para as duas primeiras variáveis, maiores valores de R^2 em todos os parâmetros analisados; já, para a variável *número de vagens por planta*, os demais parâmetros apresentaram melhores valores no estágio V4. As variáveis *altura da planta* (Figura 37b) e *número de grãos por vagem* (Figura 37e) relacionaram-se melhor, com todos os parâmetros estudados, no estágio V4.

Diante dos resultados da análise da profundidade da banda, da área da banda, como também do NDVI, comparados com as informações das variáveis biofísicas, ou melhor, a correlação entre estes dados, concluiu-se que a área da banda e o NDVI puderam estimar as variáveis biofísicas de maneira mais precisa, em relação aos resultados da profundidade da banda. Resultados diferentes foram obtidos por Mutanga e Skidmore (2004), em que as análises de profundidade da banda, apresentaram melhores resultados na estimativa da quantidade de fitomassa, quando comparados aos resultados obtidos pelo NDVI.

A Figura 37 mostra que as variáveis biofísicas analisadas foram mais bem estimadas pelo índice NB_NDVI. Os melhores estágios para estimar as variáveis biofísicas foram o V4 e o R6, em que a cultura estava bem desenvolvida e com grande quantidade de folhas verdes e saudáveis.

Figura 37 – Comparação dos valores do coeficiente de determinação (R^2) dos índices de vegetação hiperespectrais, NDVI e NB_NDVI, e da remoção do contínuo, profundidade da banda (PB) e a área da banda de absorção (AB), nos diferentes estádios fenológicos da cultura do feijão para o IAF (a), altura da planta (b), produtividade de grãos (c), número de vagens por planta (d) e número de grãos por vagem (e) – Piracicaba, SP, 2007

5 CONCLUSÕES

O efeito das lâminas de irrigação sobre a cultura do feijão foi mais pronunciado do que as doses de nitrogênio. O fator *água* influenciou as variáveis biofísicas (IAF, altura da planta, produtividade, número de vagens por planta e número de grãos por vagem), encontrando-se valores maiores nas plantas que receberam maiores quantidades de água. O aumento da dose de nitrogênio não influenciou as variáveis biofísicas, devido, provavelmente, ao processo de lixiviação desse nutriente para as camadas abaixo do sistema radicular da cultura;

As diferentes lâminas de água influenciaram o comportamento espectral da cultura do feijão, nos diferentes comprimentos de onda, e, conseqüentemente, nos valores de NDVI, de NB_NDVI, de profundidade da banda e de área da banda de absorção, de forma significativa, nos diferentes estádios fenológicos, durante o ciclo da cultura;

As doses de nitrogênio não influenciaram o comportamento espectral da cultura do feijão, e, conseqüentemente, os valores de NDVI, de NB_NDVI, de profundidade da banda e de área da banda de absorção, durante todo o ciclo da cultura;

A resposta espectral da cultura do feijão segue os padrões típicos da vegetação verde, sofrendo alterações, de acordo com as variações na quantidade de biomassa do dossel, causadas pela influência das lâminas de irrigação;

A partir do dossel da cultura do feijão, foi possível estabelecer relações significativas entre as variáveis espectrais, obtidas por sensoriamento remoto, e as variáveis biofísicas da cultura, evidenciando que os parâmetros espectrais servem como bons descritores das condições de vigor e de desenvolvimento da cultura do feijão;

Os índices de vegetação, NDVI e NB_NDVI, foram eficientes na estimativa do IAF, da altura de plantas e da produtividade de grãos;

Os parâmetros da técnica da remoção do contínuo, a profundidade e a área da banda de absorção, foram eficientes na estimativa do IAF, da altura de plantas e da produtividade de grãos;

Durante todo o desenvolvimento da cultura, as melhores correlações entre as variáveis biofísicas (IAF, altura de plantas, produtividade de grãos) e as variáveis espectrais (NDVI, NB_NDVI, profundidade da banda de absorção e área da banda de absorção) foram observadas nos estádios V4 e R6, constituindo-se, portanto, estes os melhores estádios para monitorar espectralmente a cultura.

Por meio das metodologias apresentadas, concluiu-se que as variáveis biofísicas foram melhores estimadas pelo índice NB_NDVI, nos estádios V4 e R6, quando comparadas ao índice NDVI e aos parâmetros da remoção do contínuo (profundidade e área da banda de absorção).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 328 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARENGA, B.S. **Espetro-radiometria de campo em trigo submetido a diferentes isolados bacterianos e adubações nitrogenadas**. 2004. 114 p. Dissertação de (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ALVAREZ, V.V.H.; NOVAES, R.F. de; BARROS, N.F. de; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. Interpretações dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T. G.; ALVAREZ, V.V.H. (Ed.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. cap. 5, p. 25-32.

AMBROSANO, E.J.; WUTKE, E.B.; AMBROSANO, G.M.B.; BULISANI, E.A.; BORTOLETTO, N.; MARTINS, A.L.M.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; DE SORDI, G. Efeito do nitrogênio no cultivo de feijão irrigado no inverno. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, p. 338-341, 1996.

ANGULO FILHO, R.; CUNHA, C.A.H. da; RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A. Comportamento espectral da cultura do feijão (IAC - Carioca 80) irrigado com diferentes lâminas de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Fóz do Iguaçu - PR. **Anais Fóz do Iguaçu**: INPE, 2001. p. 3-10.

APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.25, n. 2, p. 489-498, 2004.

ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; SÁ, M.E.; BUZETTI, S.; NASCIMENTO, V. Manejo do solo, água e nitrogênio no cultivo de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 131-138, 2004.

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, Jun. 1984.

AZEVEDO, J.A. **Efeito de diferentes lâminas de água e doses de adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1984. 85 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1984.

BARBOSA FILHO, M.P.; SILVA, O.F. da. Aspectos agro-econômicos da calagem e da adubação nas culturas de arroz e feijão irrigados por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 11, p. 1657-1667, 1994.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.

BARET, F.; JACQUEMOUND, S.; HANOCQ, J.F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 7, n. 1, p. 65-82, 1993.

BARET, F.; JACQUEMOUND, S.; GUYOT, G.; LEPRIEUR, C. Modelled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 41, n. 2/3, p. 133-142, 1992.

BAUER, M.E. **The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops**. West Lafayette: Purdue University, Laboratory for Application of Remote Sensing, 1975, v. 27, p. 271-304. (LARS Technical Report, 122075).

BAUER, M.E.; VANDERBILT, V.C.; ROBINSO, B.F.; DAUGHTRY, S.T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 14., 1980, Hamburg. **Proceedings...** Hamburg: 1980. p. 56-73.

BAUMGARDNER, M.F.; SILVA, L.F.; BIEHL, L.L.; STONER, E.R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 1-44, 1985.

BERNARDES, M.S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafos, 1987. p. 12-48.

BLACKBURN, G.A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evolution of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 66, n. 3, p. 273-285, 1998.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; 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.

BREUNIG, F.M.; CAMARGO, F.F.; ADAMI, M.; MANTELLI, L.R.; COSTA, M.C.; PONZONI, F.J.; FREITAS, J.G. Aplicação da remoção do contínuo para a discriminação espectral de diferentes dosagens de Nitrogênio aplicadas ao trigo (*Triticum aestivum* L. – IAC-370). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 91-98.

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, n. 2, p. 156-172, May 2001.

BUZETTI, S.; ROMEIRO, P.J.M.; ARF, O.; SÁ, M.E.; GUERREIRO NETO, G. Efeito da adubação nitrogenada em componentes da produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em diferentes densidades. **Cultura Agrônômica**, v.1, p.11-19, 1992.

CARTER, G.A. Primary; secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, Davis, v. 78, n. 7, p. 916-924, 1991.

CARVALHO, M.A.C.; ARF, O.; SÁ, M.E.; BUZETTI, S.; SANTOS, N.C.B.; BASSAN, D.A.Z. Produtividade e qualidade de sementes de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob influência de parcelamentos e fontes de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.617-624, 2001.

CHEN, Z.; ELVIDGE, C.D.; GROENEVELD, D.P. Monitoring seasonal dynamics of arid land vegetation using AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 65, p. 255-266, 1998.

CLARK, R.N.; ROUSH, T.L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, New Jersey, v. 89, n. B7, p. 6329-6340, July 1984.

COLLINS, W. Remote sensing of crop type and maturity. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, New York, v. 1, p.43-55, 1978.

COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 3, p. 175-183, 1974.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Comparativo da área, produção e produtividade safra 2006/2007 e safra 2008/2009**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 03 mar. 2009.

CURRAN, P.J.; DUNGAN, J.L.; PETERSON, D.L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, p. 349-359, 2001.

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.

DAUGHTRY, C.S.T.; WALTHALL, C.L.; KIM, M.S.; COLSTOUN, E.B.; MCMURTREY III, J.E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 74, p. 229-239. 2000.

DEMETRIADES-SHAH, T.; STEVEN, M.D.; CLARK, J.A. High resolution derivative spectra in remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 33, p. 55-64, 1990.

DINIZ, A.R.; ANDRADE, M.J.B.; BUENO, L.C.S.; CARVALHO, J.G. Resposta da cultura do feijão à aplicação de nitrogênio (semeadura e cobertura) e de molibdênio foliar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995. Viçosa. **Resumos expandidos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. v. 3, p. 1225-1227.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. **Crop response to water**. Roma: FAO, 1979. 194p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L. Nutrição, adubação e calagem. In: _____. **Produção de feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. cap. 2, p. 49-85.

_____. Ecofisiologia e fenologia. In: _____. **Produção de feijão**. Piracicaba: Livrocere, 2007. cap. 1, p. 23-46:

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. 54, n. 1, p. 38-48, 1995.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informações, 1999. 412 p.

_____. **Feijão: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 203 p.

_____. **Análise da cultura do feijão no contexto mundial**. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/eventosenoticias/anteriores/anteriores2008/081222.htm>> Acesso em: 12 mar. 2009a.

_____. **Feijão pérola é mais resistente e tem alta produtividade**. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/1996/julho/bn.2004-11-25.6708888229/>> Acesso em: 05 fev. 2009b.

_____. **Introdução e importância econômica**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoPrimSegSafrasulMG/index.htm>> . Acesso em: 10 mar. 2009c.

_____. **Recomendações técnicas para o cultivo do feijão**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro/index.htm>>. Acesso em: 03 mar. 2009d.

ENGLISH, M.; RAJA, S. N. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 1-14, 1996.

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).

EPIPHANIO, J.C.N.; HUETE, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on Sun/sensor geometry and its effect on *f*APAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 51, n. 3, p. 351-360, 1995.

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A. Probabilidade de ocorrência de temperaturas máximas do ar prejudiciais aos cultivos agrícolas em Santa Maria. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 57-63, 1994.

FAGERIA, N.K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília: EMBRAPA, CNPAF, 1989. 425 p. (Documentos, 18).

FANCELLI, A.L. **Cultura do feijão**. Piracicaba: FEALQ; ESALQ, 1987. 138 p.

_____. **Tecnologia para a produção do feijoeiro**. Piracicaba: SEBRAE, 1994. 154 p.

_____. Feijão: a diferença aparece no manejo. In: FNP CONSULTORIA & AGROINFORMATIVOS. **AGRIANUAL 2004**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2004. p. 376-378.

FARABEE, M.J. **Photosynthesis**. 1997. Disponível em: <<http://gened.emc.maricopa.edu/bio/bio181/BIOBK/BioBo-okPS.html>>. Acesso em: 10 ago. 2009.

FERRAZ, P. **Influência da geometria de iluminação e do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

FERREIRA, E.C. **Efeito de doses e parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1998. 30p. Monografia (Graduação) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista “Julho de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 1998.

FAO. Disponível em: <<http://apps.fao.org>>. Acesso em: 17 mar. 2005.

FORMAGGIO, A.R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e feijão**. 1989. 161 p. 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.; VALERIANO, M.M. Comportamento espectral (450-2500nm) e mineralogia de argila de alguns solos tropicais brasileiro. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, 7., 1995, Puerto Valarta. **Anais...** Puerto Valarta: INPE, 1995.

FRIZZONE, J.A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação**. 1986. 133p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

GALVÃO, L.S. **Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectros** 181 p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, 1994.

GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 523-534, 2005.

GALVÃO, L.S.; ROBERTS, DAR A.; FORMAGGIO, A.R.; NUMATA, I.; BREUNIG, F.M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, p. 846-856, 2009.

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

GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHALETER, J.C.; WEINDER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 51, n. 11, p. 1725-1734, 1985.

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

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, p. 76-87, 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.

GOETZ, A.F.H.; VANE, G.; SOLOMON, J.E.; ROCK, B.N. “Imaging spectrometry for Earth remote sensing”, **Science**, Washington, v. 228, n. 4704, p. 1147-1152. 1985.

GOMES A.A.; ARAÚJO, A.P.; ROSSIELLO, R.O.P.; PIMENTEL, C. Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 1927-1937, 2000.

GONÇALVES, S.L.; WREGE, M.S.; CARAMORI, P.H.; MARIOT, E.J.; ABUCARUB NETO, M. Probabilidade de ocorrência de temperaturas superiores a 30° C no florescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado na safra das águas no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 5, n. 1, p. 99-107, 1997.

GOODENOUGH, D. G.; DYK, A.; NIEMANN, O.; PEARLMAN, J. S.; CHEN, H.; HAN, T.; MURDOCH, M.; WEST, C. Processing Hyperion and ALI for forest classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 6, p. 1321-1331, 2003.

GREEN, C.F. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation absorbed solar radioation. **Agricultural and Forest and Meteorology**, New York, v. 41, p. 207-248, Dec. 1987.

GREEN, R.O.; EASTWOOD, M.L.; SATURE, C.M.; CHRIEN, T.G.; ARONSSON, M.; CHIPPENDALE, B.J.; FAUST, J.A.; PAURI, B.E.; CHOVIT, C.J.; SOLIS, M.; OLAH, M.R.; WILLIAMS, O. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 65, n. 2, p. 227-248, 1998.

GUERRA, A.F.; SILVA, D.B. da; RODRIGUES, G.C. Manejo de irrigação e fertilização nitrogenada para o feijoeiro na Região dos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1229-1236, 2000.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. II. Produtividade e componentes agronômicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 31, n. 7, p. 481-488. jul. 1996.

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

HALL, F.G.; HUERMIRICH, K.F.; GOWARD, S.N. Use of narrow-band spectra to estimate the fraction of absorbed photosynthetically active radiation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 32, n. 1, p. 47-54, 1990.

HANS, R.J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V.P.; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 426-429, 1976.

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, n. 1, p. 167-175. 1985.

HOFFER, R.M. Biological; physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. (Ed.). **Remote sensing the quantitative approach**. New York: McGraw Hill, 1978. chap. 5, p. 228-289.

HOFFER, R.M.; JOHANSEN, C.J. Ecological potentials in spectral signatures analysis. In: JOHNSON, P.L. **Remote sensing in ecology**. Athens: University of Georgia Press, 1969. p. 1-16.

HORN, F.L.; SCHUCH, L.O.B.; SILVEIRA, E.P.; ANTUNES, I.F.A.; VIEIRA, J.C.; MARCHIORO, C.; MEDEIROS, D.F.; SCHWEENGBER, J.E. Avaliação de espaçamento e populações de plantas de feijão visando à colheita mecanizada direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 41-46, jan. 2000.

HUANG, Z.; TUERNER, B.J.; DURY, S.J.; WALLIS, I.R.; FOLEY, W.J. Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis. **Remote Sensing of Environment**. New York, v. 93, p. 18-29, 2004.

HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, p. 295-309, 1988.

HUETE, A.R.; JUSTICE, C. **MODIS vegetation index (MOD13): algorithm theoretical basis document**, Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 1999. Disponível em <<http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/#vegetation-indices>>. Acesso em: 01 out. 2007.

HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, n. 1, p. 37–53, 1985.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 maio 2009.

IRONS, J.R.; WEISMILLER, R.A.; PETERSEN, G.W. Soil reflectance. In: ASRAR, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley, 1989. chap. 3, p. 66-106.

JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, 1991.

JACKSON, R.D.; PINTER JR., P.J.; Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 20, n. 1, p. 43-56, Aug. 1986.

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

JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER JR., P.J. Discrimination of growth and water stress in the wheat by various vegetation indices through clean and turbid atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 13, n. 3, p. 187–208, 1983.

JACKSON, R.D.; PINTER JR., P.J.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. **Applied Optics**, Washington, v. 18, n. 22, p. 3730-3732, 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**, Washington, v. 18, p. 3775-3782, 1979b.

JACKSON, R.D.; TEILLET, P.M.; SLATER, P.N.; FEFOSEJEVS, G.; JASINSKI, M.F.; AASE, J.K.; MORAN, M.S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery, **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 32, n. 2/3, p. 189–202. 1990.

JADOSKI, S.O.; CARLESSO, R.; MELO, G.L.; RODRIGUES, M.; FRIZZO, Z. Manejo da irrigação para maximização do rendimento de grãos do feijoeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2003.

JAUER, A.; DUTRA, L.M.C.; ZABOT, L.; LUCCA FILHO, O.A.; LUDWIG, M.P.; FARIAS, J.R. Análise de crescimento da cultivar de feijão Pérola em quatro densidades de semeadura. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 10, p. 1-12, 2003.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, New York, v. 50, p. 663-666. 1969.

KIM, M.; DAUGHTRY, C.S.; CHAPPELLE, E.W.; MCMURTREY III, J.E.; WALTHALL, C.L. The Use of High Spectral Resolution Bands for Estimating Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) In: SYMPOSIUM ON PHYSICAL MEASUREMENTS AND SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 6., 1994, Val D'Isere. **Proceedings...** Val D'Isere, 1994. p. 299-306.

KIMES, D.S. Modeling the directional reflectance from complete homogenous vegetation canopies with various leaf orientation distributions. **Journal of American Optical Society**, Washington, n. A1, p. 725-737, 1984.

KIMES, D.S.; KIRCHNER, J.A. Diurnal variations of vegetation canopy structure. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 4, n. 2, p. 257-271, 1983.

KIMES, D.S.; NEWCOMB, W.W.; TUCKER, C.J.; ZONNEVELD, I.S.; WIJNGAARDEN, W.V.; DE LEEUW, J.; EPEMA, G.F. Directional reflectance factor distributions for cover types of Northern Africa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 18, n. 1, p. 1-19, 1985.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 1, n. 3, p. 155-159, 1970.

KOKALY, R.F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 75, p. 153-161, 2001.

KOKALY, R.F.; CLARK, R.N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using banddepth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 67, n. 2, p. 267-287, 1999.

KOKALY, R.F.; DESPAIN, D.G.; CLARK, R.N.; LIVO, K.E. Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 84, p. 437-456. 2003.

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

KRUSE, F.A. Imaging spectrometer data analysis: A tutorial. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPECTRAL SENSING RESEARCH '94, 1994, San Diego. **Proceedings...** San Diego, 1994.

KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; DIETZ, J.B. Expert system-based mineral mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 44, p. 309-336, 1993.

LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanco hidrico em cultura de feijão irrigada por pivo central em latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 3, p. 529-532, 1994.

LIBARDI, V.C. **Efeitos de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro**. 1996. 49 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3rd. ed. New York: John Wiley, 1994. 750 p.

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.

LOUREIRO, B.T.; MACHADO, P.B.; DENÍCULI, W.; et al. Efeito de diferentes lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 37, n. 211, p. 215-226, 1990.

LUCESI, A.A. Fatores da produção vegetal. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafos, 1987. p. 1-11.

MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa de crescimento. In: FERRI, M.G. (Ed). **Fisiologia vegetal**. São Paulo: EPU; EDUSP, 1979. v. 1, p. 331-349.

MATLAB-MATHWORKS. **MATLAB 6.0**. Boston, 2002. (Software)

MEER, F. Spectral curve shape matching with a continuum removal CCSM algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 21, n. 16, p. 3179-3185, 2000.

MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 83-88, 1980.

MEIRA, F.A. et al. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.40, n.4, p.383-388, 2005.

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

MÉLÉDER, V.; BARILLÉ, L.; LAUNEAU, P.; CARRÈRE, V.; RINCÉ, Y. Spectrometric constraint in analysis of benthic diatom biomass using monospecific cultures. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 88, p. 386-400, 2003.

MIDDLETON, E.M. Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 38, n. 1, p. 45-62, 1991.

MILLER, J.R.; HARE, E.W.; WU, J. Quantitative characterization of vegetation red edge reflectance – 1. An inverted-Gaussian reflectance model. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 11, n. 2, p. 1755-1773, 1990.

MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.

MIYASAKA, S.; FREIRE, E.S.; MASCARENHAS, H.A.A. Modo e época de aplicação de nitrogênio na cultura do feijoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 511-519, 1963.

MORAES, E.C. Radiometria óptica espectral: comportamento espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: INPE, 1996. p. 1-22.

MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M. da; STONE, L.F. Irrigação. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p. 465-521.

MOREIRA, M.A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agrônômicos**. 1997. 142 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

MOREIRA, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 179 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K. Hiperespectral band depth analysis for a better estimation of grass biomass (*Cenchrus ciliaris*) measured under controlled laboratory conditions. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Washington, v. 5, p. 87-96, 2004.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A. K.; WIEREN, S. van. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Bethesda, v. 57, n. 4, p. 263-272, 2003.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K.; KUMAR, L.; FERWERDA, J. Estimating tropical pasture quality at canopy level using band depth analysis with continuum removal in the visible domain. **International Journal of Remote Sensing**. New York, v. 26, n. 6, p. 1093-1108, 2005.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Disponível em <<http://aviris.jpl.nasa.gov>>. Acesso: 03 mar. 2009.

NOOMEM, M.F.; MEER, F.D.; SKIDMORE, A.K. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 31., 2005, Saint Petersburg. **Proceedings...** Saint Petersburg, 2005.

OLIVEIRA, F.A.; SILVA, J.J.S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 317-322, 1990.

OLIVEIRA, F.J.; ANUNCIAÇÃO FILHO, C.J.; BASTOS, G.Q.; REIS, O.V.; TEÓFILO, E.M. Caracteres agronômicos aplicados na seleção de cultivares de Caupi. **Revista Ciência Agronômica**, v. 34, n.1, p.x-y, 2003.

PAVANI, L.C.; LOPES, A.S.; PEREIRA, G.T. Desenvolvimento d cultura do feijoeiro submetida a dois sistemas de manejo de irrigação e de cultivo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, p. 453-459, 2009.

PAZ, V.P.S.; FOLEGATTI, M.V.; PEREIRA, A.S. Efeito de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: CBEA, 1997. 1 CD-ROM.

PEARLMAN, J.S.; BARRY, P.S.; SEGAL, C.C.; SHEPANSKI, J.; BEISO, D.; CARMAN, S.L. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 6, p. 1160-1174. 2003.

PEREIRA, A.R., MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas, Instituto Agronômico, 1987. 33p. (Boletim Técnico, 114).

PERRY, C.R.; LAUTENSCHLAGER, L.F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 14, p. 169-182, 1984.

PIASKOWSKI, S.R.; RONZELLI JÚNIOR, P.; DAROS, E.; KOEHLER, H.S. Adubação nitrogenada em cobertura para o feijoeiro em plantio direto na palha. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 2, p. 67-72, 2001.

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.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. A vegetação e sua interação com a radiação eletromagnética. In: _____. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Editora Parêntese. 2007. cap. 1, p. 5-37.

PU, R.; GE, S.; KELLY, N.M.; GONG, P. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. **International Journal of Remote Sensing**, New York, v. 24, n. 9, p. 1799-1810, 2003.

QI, J.; CABOT, F.; MORAN, M.S.; DEDIEU, G. Biophysical parameter estimations using multidirectional spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 54, p. 71-83, 1995.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAPASSI, R.M.A.; SÁ, M.E.; TARSITANO, M.A.A.; CARVALHO, M.A.C. de; PROENÇA, E.R.; NEVES, C.M.T. de C.; COLOMBO, E.C.M. Análise econômica comparativa após um ano de cultivo do feijoeiro irrigado, no inverno, em sistemas de plantio convencional e direto, com diferentes fontes e doses de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 397-404, 2003.

REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.; FRIZZONE, J.A. Função de produção da cultura do milho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.26, n.4, p.503-511, 2004

REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A.; FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L.; BERTONHA, A.; ANDRADE, C.A.B. Uniformidade de aplicação de água, variáveis de produção e índice de área foliar da cultivar de feijão Iapar 57. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1561-1568, 2002.

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.

RIPPLE, W.J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 52, n. 10, p. 1669-1675, Oct. 1985.

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. de. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 263-268, 2003.

ROSELEM, C.A. **Nutrição e adubação do feijoeiro**. Piracicaba: Potafos, 1987. 93 p. (Boletim Técnico, 8).

ROSELEM, C.A.; MARUBAYASHI, O.M. **Seja o doutor do seu feijoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1994. 4 p. (Informações Agronômicas, 68).

RUILIANG PU, P.G.; BIGING, G.S.; LARRIEU, M.R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, p. 1355-1362, 2003.

RUNNING, S.W.; JUSTICE, C.O.; SOLOMONSON, V.; HALL, D.; BARKER, J.; KAUFMANN, Y.J.; STRAHLER, A.H.; HUETE, A.R.; MULLER, J.P.; VANDERBILT, V.; WAN, Z.M.; TEILLET, P.; CARNEGGIE, D. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n.17, p. 3587-3620, 1994.

SANT'ANA, E.V.P.; SILVEIRA, P.M. Crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) influenciado por doses de nitrogênio em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, p. 134-140, 2008.

SANTOS, R.Z., ANDRÉ, R.G.B. Consumo de água nos diferentes estádios de crescimento da cultura do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, p. 543-548, 1992.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; SILVA, O.F.; MELO, M.L.B. Resposta do feijoeiro ao manejo de nitrogênio em várzeas tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1265-1271, 2003.

SAS INSTITUTE. **The sas-system for windows release 6.11 (software)**. Cary, 1996. 378 p.

SCHLERF, M.; ATZBERGER, C. Imaging spectrometry and vegetation science, in imaging spectrometry: basic principles and prospective applications. In: VAN DER MEER, F.; JONG, S. de (Ed.). Dordrecht: Kluwer, 2001. p. 111-155.

SCHMIDT, K.S.; SKIDMORE, A.K. Exploring spectral discrimination of grass species in African rangelands. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 22, n. 17, p. 3421-3434, 2001.

_____. Spectral discrimination of vegetation types in a costal wetland. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 85, p. 92-108, 2003.

SCHRAMM, V.F.; VIBRANS, A.C. Uso de imagens hiperespectrais (EO-1 Hyperion) para detalhamento da detecção das formações florestais na bacia do Itajaí. **Dynamis Revista Tecnológica**, Blumenau, v. 13, p. 59-69, 2007.

SHIMABUKURO, Y.E.; MIURA, T.; HUETE, A.; ARAI, E.; ESPIRITO-SANTO, F. D. B.; LATORRE, M. L. Análise dos dados hiperespectrais do EO-1 obtidos sobre a Floresta Nacional de Tapajós no Estado do Pará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. 1 CD-ROM.

SHI, R.; ZHUANG, D.; NIU, Z. Effects of spectral transformations in statistical modeling of leaf biochemical concentrations. In: WORKSHOP ON ADVANCES IN TECHNIQUES FOR ANALYSIS OF REMOTELY SENSED DATA, 2003, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco, 2003. p. 263-267.

_____. Physical investigation on biochemical prediction using continuum removal. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2004. **Proceedings...** v. 2, p. 1463-1466.

SILVA, T.R.B.; SORATTO, R.P.; CHIDI, S.N.; ARF, O.; SÁ, M.E.; BUZETTI, S. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do feijoeiro de inverno. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 9, p. 1-17, 2000.

SILVEIRA, P.M.S.; STONE, L.F. **Irrigação do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001. 230 p.

SILVEIRA, P.M.; SILVEIRA NETO, A.N.; STONE, L.F.; OLIVEIRA, L.F.C. Produtividade do feijão irrigado sob diferentes sistemas de preparo do solo e rotação de culturas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 22, n. 1, p. 45-52, 2006.

SORATTO, R.P.; CARVALHO, M.A.C.; ARF, O. Nitrogênio em cobertura no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 259-266, 2006.

SORATTO, R.P.; ARF, O.; RODRIGUES, R.A.F.; BUZETTI, S.; SILVA, T.R.B. Resposta do feijoeiro ao preparo do solo, manejo de água e parcelamento de nitrogênio. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, p. 89-96, 2003.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, A.B.; ANDRADE, M.J.B.; MUNIZ, J.A. Altura de planta e componentes de rendimento do feijoeiro em função de população de plantas, adubação e calagem. **Ciência Agrotécnica**, v.27, n.6, p.1205-1213, 2003.

SOUZA, A.B.; ANDRADE, M.J.B.; ALVES, V.G. Populações de plantas, adubação e calagem para o feijoeiro (cv. Iapar 91) em um Gleissolo de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 347-352, 2004.

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

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 473-481, mar. 2001.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da; MOREIRA, J.A.A.; BRAZ, A.J.B.P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 577-582, abr.2006.

STROPPIANA, D.; BOSCHETTI, M.; BRIVIO, P.A.; BOCCHI, S. Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hiperespectral radiometry. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 111, p. 119-129, 2009.

SUITS, G.H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 2, n. 2, p. 117-125, Feb. 1972.

THENKABAIL, P.S.; SMITH, R.B.; DE-PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 71, p. 158-182, 2000.

_____. 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.

THENKABAIL, P.S.; ENCLONA, E.A.; ASHTON, M.S.; VAN DER MEER B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 91, p. 354-376, 2004.

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.

TISOT, D.A.; FORMAGGIO, A.R.; RENNÓ, C.D.; GALVÃO, L.S. Eficácia de dados Hyperion / EO-1 para identificação de alvos agrícolas: comparação com dados ETM+/Landsat-7. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 511-519, maio/ago. 2007.

TOMÉ JUNIOR, J.B. **Manual para a interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O.; SKOLE, D. 1994. The 1 km resolution global data set: needs of the International Geosphere Biosphere Programme. International. **Journal of Remote Sensing**, New York, v. 15, p. 3417-3441.

TUCKER, C.J. **The remote estimation of a grassland canopy / its biomass, chlorophyll, leaf water, and underlying soil spectra**. 1973. 212 p. Thesis (Master Degree) – Colorado State University, 1973.

UNIVERSITY OF CINCINNATI. **Earth observation-1**: user guide v. 2.3. 2003.

URCHEI, M.A.; RODRIGUES, J.D.; STONE, L.F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p. 497-506, mar.2000.

VALADÃO, L.T., KLAR, A.E. Evapotranspiração do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), em dois níveis do lençol freático. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., 1996, Campinas. **Anais...Campinas : Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem**, 1996. v. 1, p. 163-176.

VALÉRIO, C.R.; ANDRADE, M.J.B.; FERREIRA, D.F. Comportamento das cultivares de feijão Aporé, Carioca e Pérola em diferentes populações de plantas e espaçamentos entre linhas. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 23, n. 3, p. 515-528, 1999.

VANE, G.; GREEN, R.O.; CHIREN, T.G.; ENMARK, H.T.; HANSEN, E.G.; PORTER, W.M. The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 44, n. 1, p. 127-143, May/June 1993.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**: version 1.0. Riverside: USDA, ARS, U.S. Salinity Laboratory, 1991. (EPA Report 600/2-91/065).

VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 48, n. 2, p. 119-126, 1984.

VIEIRA, C. Adubação mineral e calagem. In: VIEIRA, C.; PAULA JUNIOR, T.J.; BORÉM, A. (Ed.). **Feijão: aspectos gerais e cultura no Estado de Minas Gerais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. p. 123-152.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the Relationship of NDVI with Leaf Area Index in a Deciduous Forest Site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 244-255, 2005.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 47, n. 3, p. 656-662, 1971.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. **Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam**, v. 148, p. 1230-1241, 2008.

XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; MOREIRA, M.A.; ALVARENGA, B.S.; FREITAS, J.G.; SALOMOM, M.V. Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 130-138, 2006.

_____. Análise de dados hiperespectrais na estimativa da produtividade de trigo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 6535-6540.

YANG, C.M.; CHEN, R.K. Modeling rice growth with hyperespectral reflectance data. **Crop Science**, Madison, v. 44, p. 1283-1290, 2004.

YOSHIDA, S. Physiological aspects of grain yield. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 23, n. 3, p. 437-464, 1972.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Estrutura e instalação

01) Área experimental da Fazenda Areão DER/ESALQ/USP; 02) Montagem da cerca; 03) Instalação das linhas de irrigação e demarcação das parcelas; 04 a 07) Tratamento de sementes; 08 a 11) Abertura do sulco e semeadura do feijão; 12) Cultura aos 7 DAS; 13 a 15) Tensiômetros instalados a 0,15 e 0,30 m em cada tratamento de irrigação.

APÊNDICE B - Condução da cultura e coleta de dados

16) Sistema de irrigação por aspersão em funcionamento (com 3 linhas); 17 a 19) Adubação nitrogenada, aos 11 DAS; 20 a 25) Desbaste, aos 11 DAS, deixando 14 plantas por metro linear; 26) Plantas, aos 11 DAS, estágio V3; 27) Área experimental aos 20 DAS, estágio V3; 28) Equipamento LAI-2000; 29) Leitura externa para estimativa do IAF; 30) Leitura interna para estimativa do IAF.

APÊNDICE C – Condução da cultura e coleta de dados

31) Sistema de irrigação modificado para *Line Source*, aos 21 DAS; 32) Tratamentos 1, 2 e 3 aos 25 DAS; 33) Tratamentos 4, 5 e 6 aos 25 DAS; 34) Tratamentos 7, 8 e 9 aos 25 DAS; 35) Tratamentos 10, 11 e 12 aos 25 DAS; 36 e 37) Medição da altura da planta; 38 e 39) Medição do diâmetro de colo da planta; 40) Diferença visível entre os tratamentos, aos 36 DAS; 41) Carrinho utilizado para a locomoção dos equipamentos entre as parcelas experimentais; 42 e 43) Leitura com o equipamento SPECTRON SE-590; 44 e 45) Mesa com os equipamentos levados à campo: SPECTRON, microcomputador para armazenamento dos dados e duas baterias.

APÊNDICE D – Desenvolvimento da cultura e diferença entre tratamentos

46) Tratamentos 1, 2 e 3, aos 36 DAS; 47) Parcela do T1; 48) Tratamentos 4, 5 e 6, aos 36 DAS; 49) Parcela do T6, aos 36 DAS; 50) Tratamentos 7, 8 e 9, aos 36 DAS; 51) Plantas da parcela com o T8, aos 36 DAS; 52) Parcelas com os tratamentos 10, 11 e 12, aos 36 DAS; 53) Plantas do T10, aos 36 DAS; 54) Detalhe do aspersor; e 55 a 58) Tratamentos aos 38 DAS; 59) Diferença visível de coloração entre os tratamentos, aos 38 DAS; 60) Diferença de coloração entre os tratamentos, aos 86 DAS.