

ISSN 0104-1347

Monitoramento de área foliar e biomassa do feijoeiro usando índice de vegetação por diferença normalizada

Monitoring leaf area and biomass of bean crop using the normalized difference vegetation index

José Fideles Filho¹, José Queiroga Nóbrega², Tantravahi Venkata Ramana Rao³, Napoleão Esberard de Macedo Beltrão⁴

Resumo: O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é um dos índices capazes de detectar mudanças no crescimento e condição fisiológica/estresse hídrico de uma determinada cultura ou vegetação, *utilizando-se dados espectrais orbitais, ou aéreos ou de experimento de campo*. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a capacidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na estimativa do índice de área foliar (IAF) e biomassa aérea da cultura do feijoeiro irrigado. Foram utilizados dados espectrais coletados por um espectrorradiômetro portátil LI - 1800 em cultura do feijoeiro irrigado, no período de janeiro a março de 2000 no município de Lagoa Seca, PB. O NDVI é um índice espectral eficiente para avaliar o crescimento e desenvolvimento da cultura do feijoeiro, independente do tratamento.

Palavras-chave: reflectância, irrigação, sensoriamento remoto

Abstract: The normalized difference vegetation index (NDVI) is one of the vegetation indices capable to detect changes in growth and condition of a particular crop or vegetation, using the orbital or aerial spectral data or the data collected during a field experiment. The objective of this research was to evaluate the use of NDVI for estimating the leaf area index (LAI) and biomass of an irrigated bean crop. Spectral data collected with a portable spectroradiometer model LI - 1800, were used in this research conducted in Lagoa Seca - PB, from January to March, 2000. The results showed that NDVI is capable of evaluating growth and development of bean crop, independent of the treatment.

Key words: reflectance, irrigation, remote sensing

Introdução

O conhecimento das relações entre a energia eletromagnética e as culturas, aliado a várias técnicas, permite múltiplo meio de utilização do sensoriamento remoto em agricultura. Normalmente, o que se usa é a banda simples, ou seja, o registro das informações em banda espectral determinada. A disponibilidade de várias bandas

espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, em conjunto com os modos de operação dos diversos sistemas sensores. Quanto mais bandas espectrais dispuserem um sistema sensor, mais informações ele fornecerá.

Têm surgido diversos tipos de agrupamento de bandas, entre os quais se destacam as razões simples, normalizações, distâncias no espaço cartesiano e

¹Dr. EMEPA/UEPB, E-mail: fidelesfilho@uol.com.br

²Pesq. Dr., EMEPA, E-mail: nobregajq@uol.com.br

³Prof. Dr., DCA/UFPB. E-mail ramana@dca.ufcg.edu.br

⁴Pesq. Dr., EMBRAPA/Algodão, Campina Grande - PB.

suas variantes; em geral, tais índices realçam o componente espectral da vegetação e se correlacionam com parâmetros biofísicos da vegetação, como o índice de área foliar (IAF) (EPIPHANIO et al., 1996; FIDELES FILHO et al., 1997).

De acordo com FONTANA et al. (1998), os índices de vegetação representam uma técnica amplamente utilizada, na área do sensoriamento remoto, por indicarem a presença e condições da vegetação monitorada, e que o êxito da utilização dos índices de vegetação se fundamenta no fato de que a produção primária de uma comunidade vegetal tem estreita relação com a energia solar absorvida, o que define o crescimento e o desenvolvimento dessa comunidade. As medidas de índice de vegetação têm, em geral, associação direta com a quantidade de biomassa, o índice de área foliar, a cobertura do solo, a interceptação da radiação solar e o rendimento agrícola (MILLARD et al., 1990; RUDORFF & BATISTA, 1990a, 1990b; ANTUNES et al., 1993; FONTANA et al., 1998).

Os índices computados pelas bandas do vermelho e do infravermelho próximo têm sido relacionados com várias propriedades do dossel vegetativo, inclusive o índice de área foliar (IAF) e a biomassa aérea. Os mais comuns desses índices são a razão entre vermelho e infravermelho próximo (razão simples) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

FIDELES FILHO (1997) avaliou o desempenho dos índices de vegetação, razão simples, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) na cultura de amendoim irrigada, correlacionando-os com os parâmetros biofísicos da cultura, e verificou que o NDVI correlacionou-se melhor com o índice de área foliar e biomassa aérea, quando comparado com os outros dois índices de vegetação.

O índice de área foliar (IAF) e a biomassa aérea são características do crescimento e desenvolvimento de uma comunidade vegetal e têm sido amplamente estudados, em termos de medidas de sensoriamento remoto, e correlacionados com índice de vegetação; assim, modelos teóricos e experimentais são sugeridos para se estimar o índice

de área foliar e a biomassa através de medidas de reflectância do dossel e relacioná-los ao índice de vegetação. Entretanto, isto é dificultado quando se deseja encontrar um modelo que ajuste os dados experimentais do índice de área foliar (IAF) e biomassa aérea, embora tal relação seja exigida.

O propósito de se trabalhar com o feijoeiro irrigado foi devido a fragilidade da cultura diante as incertezas climáticas da região nordeste do Brasil, em especial a precipitação pluvial, constituindo-se a irrigação numa segurança da produção, aumento da produtividade e melhoria na qualidade. Além disso, considerou-se a demanda tecnológica informacional para esta cultura em regime de irrigação (NÓBREGA, 2000).

Assim, este trabalho objetivou avaliar a capacidade do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na estimativa do índice de área foliar (IAF) e biomassa aérea da cultura do feijoeiro irrigado.

Material e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido na Estação Experimental de Lagoa Seca, da Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba, EMEPA-PB. Lagoa Seca está localizada na microrregião homogênea do agreste paraibano, com coordenadas geográficas de 7° 09' S e 35° 52' W e altitude aproximada de 634 m. O clima é o tropical chuvoso, com estação seca no verão. A pluviosidade anual média dos últimos 14 anos é de 940mm, com maior incidência de chuva no período entre março e agosto. A umidade relativa do ar média é de aproximadamente 60% e a temperatura média anual é de 25°C. O solo é do tipo Neossolo Regolítico com textura arenosa, segundo laboratório da EMBRAPA-CNPq, Campina Grande - PB.

O período estudado foi janeiro a março de 2000 e, no experimento, cada parcela ocupou uma área total de 15 m² (3 m x 5 m), constituída por seis fileiras de 5 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m entre linhas e 0,25 m entre plantas. O delineamento experimental consistiu de blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições, com população de 240.000 plantas de feijoeiro.ha⁻¹ para todos os tratamentos. Antecedendo a semeadura até o início da diferenciação dos tratamentos foram

feitas sete irrigações em todo o experimento, totalizando 21mm de água aplicada. Todas as parcelas foram uniformemente irrigadas para que o solo atingisse um índice de umidade que favorecesse a emergência e o estabelecimento da cultura. A diferenciação dos tratamentos, quanto à irrigação, teve início aos 22 dias após a semeadura (DAS) com a cultura na fase de emissão da terceira folha trifoliada. A partir desta data a irrigação foi iniciada de modo diferenciado, conforme os tratamentos, ou seja, tratamento T1 = 80,0; T2 = 160,0; T3 = 320,0 e T4 = 140,2 mm de água, durante o ciclo do feijoeiro.

O sistema de irrigação adotado foi o manual, conforme BRAGA (1996), que relata fornecer esse sistema uma uniformidade de distribuição de água bem elevada. Nele o emissor consistiu de um tubo de PVC (2,54 cm) perfurado a cada 5 cm, para a saída da água de irrigação, com 3 m de comprimento e apoio em cada extremidade, para manuseio dos operadores, os quais se deslocavam num movimento de vai-e-vem, ao longo do comprimento da parcela. Numa das extremidades do tubo foi conectada uma mangueira flexível, que serviu para abastecer o sistema.

A determinação da porcentagem de umidade do solo, que define o início da irrigação, foi obtida pela equação:

$$U = \{[(CC-PM)(1-Dep)]+PM\} \quad (1)$$

sendo que: CC - capacidade de campo (%); PM - ponto de murcha (%); Dep - limite máximo de perda de umidade da planta.

A quantidade de água aplicada no tratamento foi definida pela seguinte expressão:

$$L = (CC - U) (Prof/100) \quad (2)$$

Em que:

U - umidade do solo %

Prof - raio de atuação do sensor em conformidade com o comprimento das raízes (cm).

Utilizou-se a cultivar de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) Princesa (grupo carioca) com hábito de crescimento indeterminado tipo III, porte semi-

prostado e, semanalmente, foram coletadas três plantas por tratamento nas quatro repetições, para a determinação da biomassa aérea (w), e analisadas conforme as diferentes fases fenológicas do feijoeiro. As amostras foram colocadas em estufa a 70°C até atingirem peso seco constante. Após o material ser retirado da estufa, foi pesado em balança com resolução de 0,01g, transformando-se o resultado para g/amostra.

A área foliar (AF) foi analisada conforme as diferentes fases fenológicas do feijoeiro. Em cada amostra, folhas foram tomadas ao acaso e retirados discos de área conhecida. A relação entre o peso total das folhas secas e o peso dos discos secos forneceu a área foliar (cm²) dada por:

$$AF = \frac{\text{Peso das folhas}}{\text{Peso dos discos}} \times \text{área dos discos} \quad (3)$$

O índice de área foliar (IAF) de cada tratamento, nas fases fenológicas, foi obtido pela relação entre a área foliar (AF) e a área de solo amostrado (ΔS), ou seja:

$$IAF = \frac{AF}{\Delta S} \quad (4)$$

Foram feitas medições radiométricas ao longo do ciclo da cultura, utilizando-se um espectrorradiômetro portátil LI-1800, da marca Li-Cor no intervalo de comprimento de onda 400 nm a 1100 nm, com ângulo de visada de 180° e resolução de 2 nm. O sensor foi centrado sobre as parcelas a uma altura de 1,0 m acima da cultura, onde se mediu o fluxo refletido pela cultura e, em seguida, o fluxo direto (radiação espectral direta) de referência. Posteriormente, os dados do fluxo radiante da cultura e o fluxo direto foram convertidos em reflectância (dividindo-se o fluxo radiante da cultura pelo fluxo direto) e selecionaram-se as bandas TM3 (620 a 690 nm, vermelho) e TM4 (760 a 900 nm, infravermelho). A partir dos valores da reflectância nestas bandas (TM3 e TM4), calculou-se o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), definido pela seguinte expressão:

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad (5)$$

As combinações dessas bandas são possíveis, tendo em vista que os espectrorradiômetros operam em faixas espectrais estreitas e que o sistema de dispersão utilizado decompõe a radiação em diferentes comprimentos de ondas, de tal forma que se possa medir a resposta do alvo quase que de maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético.

As medidas de reflectância do dossel do feijoeiro foram realizadas semanalmente e nas mesmas datas em que foram coletadas as amostras de plantas, determinando-se o índice de área foliar (IAF) e a biomassa aérea (W) no estágio em que as plantas estavam em plena atividade fotossintética. Através dessas medidas de reflectância, determinou-se o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), para reduzir a dimensionalidade dos dados e aumentar a eficiência de extração de informações, tendo em vista que existe uma resposta dos parâmetros espectrais quanto às condições de vigor dos dosséis.

Resultados e Discussão

O crescimento da planta como um todo, em termos de aumento de volume, de peso, de dimensões lineares e de unidades estruturais, é função do que a planta armazena e do que a planta produz em termos de material estrutural (NÓBREGA, 2000). Nas Tabelas 1 e 2 encontra-se o resumo das análises de variâncias e as comparações das médias dos dados relativos às variáveis primárias do crescimento (biomassa aérea e área foliar).

A análise de variância (Tabela 1) revelou efeitos significativos nos tratamentos. Na Tabela 2 verifica-se que na comparação das médias de tratamentos houve diferenças significativas. As diferenças da biomassa aérea (W) entre tratamentos aumentaram proporcionalmente ao incremento das lâminas de água aplicadas. Os valores máximos da W foram 35,02; 52,62; 68,90 e 45,71 g.planta⁻¹, obtidos aos 59 (DAS), nos respectivos tratamentos: T1 = 80,0; T2 = 160,0; T3 = 320,0 e T4 = 140,2 mm de água, durante o ciclo do feijoeiro.

Tabela 1. Análises de variância das variáveis primárias de crescimento do feijoeiro.

F.V.	G.L.	Quadrados Médios	
		Biomassa Aérea (g.planta ⁻¹)	Área Foliar (cm ²)
Blocos	3	1,81	143.403,58
Trat.	3	857,12*	2.551.658,25*
Resíduos	9	6,04	378.835,52

* Significativo ao nível de 5% (Teste F)

Tabela 2. Médias das variáveis primárias de crescimento do feijoeiro.

Tratamentos	Biomassa Aérea (g.planta ⁻¹)	Área Foliar (cm ²)
T1	35,02 d	3.730,0 b
T2	52,62 b	5.058,0 a b
T3	68,90 a	6.246,0 a
T4	45,71 c	4.525,0 b
CV (%)	4,81	14,74

Nas colunas, médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo Teste de Tukey a 5%.

Verifica-se, pela Figura 1, a evolução do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) determinado a partir da semeadura até a colheita do feijoeiro, com a biomassa aérea em função dos tratamentos. O valor do NDVI na origem, ou seja, no dia da semeadura, corresponde ao NDVI para o solo nu (FIDELES FILHO et al. 1997). Observa-se que o NDVI tem a capacidade de monitoramento da evolução da biomassa em tempo real. Esta informação, no contexto agrícola, permite monitorar o crescimento e desenvolvimento da cultura do feijoeiro. Grande parte dos trabalhos envolvendo o uso de bandas simples e índices de vegetação, para avaliação de parâmetros de interesse agrônômico, foram realizados com radiômetros de campo, em condições experimentais. Entretanto, como se dispõe de imagens de satélites, é de interesse que relações entre dados espectrais e agrônômicos também sejam buscadas nesse produto (EPIPHANIO & FORMAGGIO, 1991).

O índice da diferença normalizada (NDVI), computado pelas medidas de reflectância do dossel do feijoeiro, para os tratamentos, foi relacionado com o índice de área foliar (IAF) (Figura 2). Na ausência de folhas (IAF = 0), o NDVI tem o valor equivalente ao da razão da reflectância do solo nas bandas do vermelho e infravermelho próximo. Quando as folhas cresceram e aumentaram em número, o NDVI aumentou nitidamente com o índice de área foliar (IAF), em concordância com trabalhos desenvolvidos por FIDELES FILHO (1997).

O índice de área foliar (IAF) da cultura do feijoeiro em função do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), só é estimado até o ponto máximo de área foliar. Por ocasião da senescência, perda total das folhas, o índice de área foliar chegou a zero, enquanto o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) apresentou valores diferentes de zero. Isto ocorre devido à influência da reflectância dos ramos e vagens da cultura, como também uma parcela de contribuição da reflectância do solo (FIDELES FILHO et al., 2001).

Levando-se em consideração que os dados espectrais foram obtidos a partir de dados de um radiômetro espectral e que os dados agrônômicos foram obtidos em condições reais de cultivo, pode-

se considerar que tais relações são relativamente bem ajustadas, independente dos tratamentos.

Os modelos matemáticos que se ajustaram aos dados referentes nas Figuras 2a, 2b, 3c e 3d, resultaram nas seguintes equações:

$$IAF_{(T1)} = \text{EXP}(10,259 - 22,771\text{NDVI}^3 + 9,35503 \ln(\text{NDVI})) \quad r^2 = 0,82$$

$$IAF_{(T2)} = 3,3340 / (1 + \text{EXP}(-(\text{NDVI} - 0,3649) / 0,02227)) \quad r^2 = 0,99$$

$$IAF_{(T3)} = \text{EXP}(5,2528 - 5,5570\text{NDVI}^2 - 0,6539/\text{NDVI}^2) \quad r^2 = 0,97$$

$$IAF_{(T4)} = \text{EXP}(10,0345 - 11,4286\text{NDVI} - 0,7986/\text{NDVI}) \quad r^2 = 0,99$$

em que IAF é o índice de área foliar e NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada.

As correlações entre os índices de área foliar IAF e por diferença normalizada (NDVI) da cultura do feijoeiro foram altas e o menor coeficiente de determinação (r^2) foi 0,82, para o tratamento T1. Assim, o NDVI mostrou-se ser uma combinação espectral poderosa para estimar o índice de área foliar (IAF) do feijoeiro em qualquer situação de tratamento hídrico. FERNÁNDEZ et al. (1994) determinaram o IAF da cultura de trigo irrigado e com tratamento diferenciado de fertilizante. Utilizaram dados de reflectância espectral e concluíram que o NDVI é um ótimo estimador do IAF, independente do tratamento (hídrico ou fertilizante). De acordo com as equações, percebe-se que cada tratamento tem seu modelo matemático. Observa-se também, na Figura 1, que o tratamento T3 (320 mm) alcançou valores máximos de IAF, provavelmente motivado pela maior quantidade de água disponível no solo para planta, em relação aos demais tratamentos.

Outro parâmetro agrônômico de interesse e possível de ser estudado com a técnica de sensoriamento remoto é a biomassa aérea (W). Nesse estudo com feijão, a determinação desse parâmetro em função do índice espectral NDVI é apresentada nas Figuras 3a, 3b 3c e 3d, para os tratamentos irrigados com lâminas de 80,0, 140,2, 160,0 e 320,0 mm.

A seguir são apresentados os modelos matemáticos que melhor representam as curvas de ajuste não linear para biomassa aérea.

$$W_{(T1)} = 34,949 / (1 + \text{EXP}(-(\text{NDVI} - 0,4293) / 0,02648)) \quad r^2 = 0,96$$

$$W_{(T2)} = 53,13495 / (1 + \text{EXP}(-(\text{NDVI} - 0,390) / 0,033)) \quad r^2 = 0,99$$

$$W_{(T3)} = 72,8794 / (1 + (\text{NDVI} / 0,4389)^{-11,3329}) \quad r^2 = 0,97$$

$$W_{(T4)} = 54,5419 / (1 + (\text{NDVI} / 0,4497)^{-8,5424}) \quad r^2 = 0,98$$

Assim como o índice de área foliar (IAF), a biomassa aérea (W) nos tratamentos impostos à cultura do feijoeiro, foi ajustada a modelos não lineares. Observa-se que as curvas de tendência são comuns em todos os tratamentos, iniciando o valor do NDVI igual a 0,2. Justifica-se essa igualdade de valor pela influência da reflectância da área do solo, uma vez que a cultura estava na fase de germinação. Observa-se também, na Figura 3, que as diferenciações de valores do NDVI aconteceram à medida que a cultura foi mudando de fase durante seu ciclo. Esses valores do NDVI são diferentes conforme os tratamentos adotados, atingindo valores mais elevados a partir da fase de floração, quando a cultura estava em plena atividade fotossintética.

Dada a necessidade de acompanhamento temporal da evolução do dossel, os pontos de medição da reflectância foram mantidos os mesmos durante todo o experimento e isto fez com que as coletas das amostras de plantas para determinação de biomassa e área foliar fossem necessariamente realizadas em outro local dentro da parcela experimental. Como as medidas de reflectância, biomassa e área foliar não foram realizadas nos mesmos pontos dentro das parcelas, pode ter havido superestimação de uma ou de outra variável, resultando em uma resposta fora dos padrões esperados.

Conclusões

1. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) só é eficiente para estimar o IAF quando a cultura está em plena atividade fotossintética.

2. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é um índice de vegetação espectral eficiente para se estimar o índice de área foliar (IAF) e a biomassa aérea (W), independente do tratamento adotado para cultura.

Referências Bibliográficas

ANTUNES, M.A.H.; ASSAD, E.D.; BATISTA, G.T. Variação das medidas espectrais ao longo do ciclo da soja (*Glicine Max* (L.) Merrill). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. Anais... Curitiba: INPE, 1993. p. 1-9.

BRAGA, M.B. Estudo e análise da profundidade efetiva do sistema radicular do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob quatro frequências de irrigação. Viçosa: UFV, 1996. 67p. Dissertação de Mestrado.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIAN, J.; FORMAGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.6, p.445-454, 1996.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGIO, A. R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.326, n.10, p.1615-1624, 1991.

FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E.; SUGRAÑES, L. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 9, p. 1867-1884, 1994

FIDELES FILHO, J. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas a cultura do amendoim sob diferentes níveis de irrigação. Campina Grande: UFPB, 1997. 99p. Dissertação de Doutorado.

FIDELES FILHO, J.; SILVA, L. C.; BELTRÃO, N. E. M.; RAMANA RAO, T. V. Estimativa do índice de área foliar da cultura do amendoim através de dados de reflectância nas bandas do visível e infravermelho próximo. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, v.1 n.1, p. 143-148, 1997.

FIDELES FILHO, J.; NOBREGA, J. Q.; RAMANA RAO, T. V.; BELTRÃO, N. E. M. Determinação do índice de área foliar do feijoeiro através de dados de sensoriamento remoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza, CE. **Resumos...**, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2001. 350 p. p. 161-162.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, A. Relação entre índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.8, p. 1399-1405, 1998.

MILLARD, P.; WRIGHT, G.G.; ADAMS, M.J.; BIRNIC, R.V.; WHITWORTH, P. Estimation of light interception and biomass of potato (*Solanum tuberosum* L.) from reflection in the red and near-infrared spectral bands. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.53, p. 19-31, 1990.

NÓBREGA, J. Q. Variações na morfofisiológica e no rendimento do feijoeiro submetido a diferentes lâminas de irrigação. Campina Grande: UFPB, 2000. 100p. Dissertação de Doutorado

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 31, p. 53-63, 1990a.

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 33, p. 183-192, 1990b.