

Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1

Lênio Soares Galvão
Antônio Roberto Formaggio
Fábio Marcelo Breunig

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lenio, formag, breunig}@dsr.inpe.br

Abstract. Preliminary results from an ongoing project to study the impact of off-nadir hyperspectral data acquisition on the relationships between narrow-band vegetation indices and soybean yield are presented. Narrow-band vegetation indices may perform better than conventional broadband indices to estimate biophysical parameters of vegetation and crop yield. Off-nadir Hyperion/EO-1 images were collected in the back scattering direction on January 14, 2006 over a farm located in the Mato Grosso state showing initial soybean reproductive stages. Pearson's correlation coefficients and the regression relationships of all possible Hyperion band ratios and 17 narrow-band vegetation indices with soybean grain yield were then analyzed for three selected varieties (Monsoy 9010, Tabarana and Perdiz). Results showed that the best indices to estimate soybean yield were mainly associated with leaf water content, which were consistent with the largest r values observed for near infrared/near infrared band ratios (e.g., 1290/770 nm). Statistically significant Pearson's correlation coefficients were observed for the Normalized Difference Water Index (NDWI) ($r = +0.74$), the Water Band Index (WBI) ($r = +0.47$) and the Carotenoid Reflectance Index (CRI) ($r = +0.53$). Due to the single off-nadir Hyperion imagery acquisition in the backscattering direction, further research is still necessary to confirm the role played by NDWI to predict soybean yield at early reproductive stages and to establish the influence of viewing geometry on the correlation results.

Palavras-chave: hyperspectral, Hyperion, soybean, sensoriamento remoto, hiperespectral, agricultura.

1. Introdução

Em geral, índices de vegetação podem ser usados para estabelecer relações empíricas com a produtividade de culturas agrícolas em escala local (p.ex., Shibayama e Akiyama, 1991; Serrano et al., 2000; Ma et al., 2001; Shanahan et al., 2001; Royo et al., 2003). Também podem ser usados para fornecer estimativas de parâmetros biofísicos (p.ex., Índice de Área Foliar - LAI) para compor modelos mais elaborados de crescimento de culturas e de estimativas de produtividade usando dados de múltiplas fontes em escala regional (Bauer et al., 1986; Rudorff e Batista, 1990; Clevers, 1997; Doraiswamy et al., 2004; Prasad et al., 2006; Rizzi e Rudorff, 2007).

Apesar do enorme crescimento na produção brasileira de soja, poucos estudos de sensoriamento remoto têm sido feitos com essa cultura agrícola. A maioria desses estudos utilizou dados multiespectrais. Os avanços recentes no sensoriamento remoto hiperespectral por satélites oferecem a oportunidade de melhorar o conhecimento sobre as relações entre produtividade de soja e índices de vegetação de bandas estreitas. Esses índices podem ter eventualmente um melhor desempenho quando comparados com os tradicionais, gerados a partir de sensores multiespectrais (Thenkabail et al., 2000; Zarco-Tejada et al., 2005; Xavier et al., 2006).

O sensor hiperespectral Hyperion, lançado no ano de 2000 a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1), é capaz de adquirir imagens em 196 bandas (10 nm de largura) radiometricamente calibradas no intervalo de 400-2400 nm. A resolução espacial é de 30 metros. Esse sensor permite o cálculo de vários índices de vegetação de bandas estreitas associados a pigmentos, conteúdo de água das folhas, eficiência do uso da luz, etc. O tempo de revisita do sensor é de 16 dias, podendo ser reduzido por apontamento. Portanto, dependendo do ângulo de apontamento, o sensor Hyperion/EO-1 pode funcionar como um

sensor com visada fora do nadir, mas essa característica não tem sido explorada em aplicações na literatura.

O objetivo desse estudo é apresentar resultados preliminares de um projeto para avaliar as relações entre 17 índices de vegetação, calculados a partir de dados Hyperion/EO-1 obtidos com visada fora do nadir na direção do retro-espalhamento, e a produtividade de três variedades de soja plantadas em 2005-2006 em uma fazenda localizada no Estado do Mato Grosso.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo é a Fazenda Tanguro, localizada no município de Querência (MT), entre as coordenadas 12°41'54"S/52°24'59"W e 12°52'28"S/52°19'09"W. O sensor Hyperion/EO-1 adquiriu imagens em 14 de Janeiro de 2006 com ângulo de apontamento de -26 graus na direção do retro-espalhamento, em que predominam componentes iluminados do dossel vistos pelo sensor. O ângulo de elevação solar foi de 54 graus. As imagens foram obtidas em 242 bandas contíguas, em intervalos de 10 nm entre 356-2577 nm, com uma faixa de imageamento de 7,65 km. Entretanto, apenas 196 bandas foram radiometricamente calibradas no intervalo de 426-2395 nm e efetivamente usadas nesse estudo. A resolução espacial é de 30 metros.

As imagens Hyperion foram pré-processadas para reduzir os efeitos de “*striping*” e foram atmosféricamente corrigidas pelo uso do aplicativo *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), que se baseia no modelo de transferência radiativa MODTRAN4. O aplicativo inclui uma correção para efeitos de adjacência. Um modelo tropical-rural foi utilizado para fins de correção e o cálculo do vapor d'água foi feito pixel-a-pixel utilizando a banda posicionada em 1140 nm. As imagens foram então convertidas de valores de radiância no sensor para reflectância de superfície. Para reduzir ruídos decorrentes da correção atmosférica e da baixa relação sinal-ruído do sensor, transformações inversas da técnica “*minimum noise fraction*” (MNF) foram aplicadas sobre os dados em diferentes intervalos espectrais (Green et al., 1988). O passo final foi a correção geométrica das imagens.

Sete variedades de soja foram plantadas na fazenda em 2005-2006 e três ocuparam a maior parte da fazenda (Monsoy 9010, Perdiz e Tabarana). As principais características dessas três variedades são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Desenvolvimento da soja em 2005-2006. Dados estimados do fechamento do dossel, estágio reprodutivo e de índice de Área Foliar (LAI) referem-se à data de aquisição da imagem Hyperion (14 de Janeiro de 2006; 62 a 81 dias após plantio). O espaçamento entre linhas foi constante (0,45 cm).

Variedade	Plantio (2005)	Colheita (2006)	Prod. média (kg/ha)	Ciclo médio (dias)	Fechament o estimado dossel (%)	Estágio reprod. estimado	LAI estimado	Nº de talhões
Monsoy 9010	11/ 11 a 17/11	24/03 a 09/04	3723±237	139	90	R1	1,0 a 1,5	11
Perdiz	25/10 a 05/11	01/03 a 28/03	3405±353	130	100	R2 a R3	2,0 a 2,5	13
Tabarana	08/11 a 18/11	20/03 a 09/04	4069±455	134	95	R1 a R2	1,5 a 2,0	21

Usando o mapa da distribuição das variedades, valores espectrais médios dos índices de vegetação foram extraídos de cada talhão e correlacionados (coeficiente de correlação de Pearson) com os dados de produtividade. Foram calculados 17 índices de vegetação: 1) *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI); 2) *Enhanced Vegetation Index* (EVI); 3) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI); 4) *Simple Ratio* (SR); 5) *Moisture Stress Index* (MSI); 6) *Normalized Difference Infrared Index* (NDII); 7) *Normalized Difference Water Index* (NDWI); 8) *Water Band Index* (WBI); 9) *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI); 10) *Carotenoid Reflectance Index* (CRI); 11) *Photochemical Reflectance Index* (PRI); 12) *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI); 13) *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI); 14) *Red Edge Position* (REP); 15) *Vogelmann Red Edge Index 1* (VOG1); 16) *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI); e 17) *Visible Green Index* (VIg). Equações e referências para cada índice são listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices de vegetação de bandas estreitas do sensor Hyperion/EO-1 usados nesse estudo. As abreviações dos índices foram definidas no texto.

Índice de Vegetação	Fórmula ^a	Referência
ARVI	$(\rho_{864} - (2 * \rho_{671} - \rho_{467})) / (\rho_{864} + (2 * \rho_{671} - \rho_{467}))$	Kaufman and Tanre (1992)
EVI	$2.5 * ((\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + 6 * \rho_{671} - 7.5 * \rho_{467} + 1))$	Huete et al. (2002)
NDVI	$(\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + \rho_{671})$	Rouse et al. (1973)
SR	ρ_{864} / ρ_{671}	Rouse et al. (1973)
MSI	ρ_{1598} / ρ_{823}	Hunt and Rock (1989)
NDII	$(\rho_{823} - \rho_{1649}) / (\rho_{823} + \rho_{1649})$	Hunt and Rock (1989)
NDWI	$(\rho_{854} - \rho_{1245}) / (\rho_{854} + \rho_{1245})$	Gao (1996)
WBI	ρ_{905} / ρ_{973}	Penuelas et al. (1997)
PSRI	$(\rho_{681} - \rho_{498}) / \rho_{752}$	Merzlyak et al. (1999)
CRI	$(1 / \rho_{508}) - (1 / \rho_{701})$	Gitelson et al. (2002a)
PRI	$(\rho_{529} - \rho_{569}) / (\rho_{529} + \rho_{569})$	Gamon et al. (1997)
SIPI	$(\rho_{803} - \rho_{467}) / (\rho_{803} + \rho_{681})$	Penuelas et al. (1995)
RENDVI	$(\rho_{752} - \rho_{701}) / (\rho_{752} + \rho_{701})$	Gitelson et al. (1996)
REP	$(\rho_{n+1} - \rho_n) / 10$ in the 690-750 nm interval	Curran et al. (1995)
VOG1	ρ_{742} / ρ_{722}	Vogelmann et al. (1993)
VARI	$(\rho_{559} - \rho_{640}) / (\rho_{559} + \rho_{640} - \rho_{467})$	Gitelson et al. (2002b)
VIg	$(\rho_{559} - \rho_{640}) / (\rho_{559} + \rho_{640})$	Gitelson et al. (2002b)

^a ρ é a reflectância das bandas mais próximas do Hyperion (n , centro em nanômetros) das formulações originais de comprimento de onda.

De forma simplificada, ARVI, EVI, NDVI, SR, CRI, VARI e VIg são índices mais relacionados com pigmentos de folhas (p.ex., clorofila e carotenóides). MSI, NDII, NDWI e WBI estão mais associados com o conteúdo de água das folhas. PSRI pode indicar estresse, enquanto PRI e SIPI podem expressar a eficiência do uso da luz. RENDVI, REP e VOG1 são índices propostos para caracterizar a feição da borda vermelha (“red edge”) nos espectros de vegetação.

Alguns dos índices de vegetação da Tabela 2 são compostos por razões de bandas simples. Portanto, uma maneira de levar em conta outros índices existentes na literatura e não relacionados na Tabela 2, é calcular todas as possíveis razões de bandas do Hyperion. Após

esse cálculo, as razões foram correlacionadas com a produtividade e os resultados foram projetados em um mapa de contorno de correlação para facilitar a interpretação.

3. Resultados e discussão

A Figura 1 mostra os resultados da correlação entre todas as possíveis razões de bandas do Hyperion e a produtividade das três variedades de soja analisadas. As primeiras duas dimensões (X e Y) compreendem os comprimentos de onda das bandas Hyperion usadas no cálculo das razões como denominador e o numerador, respectivamente. A terceira dimensão (Z) foi usada para codificar em cores os intervalos de contorno com valores similares de correlação de Pearson (magnitude e sinal).

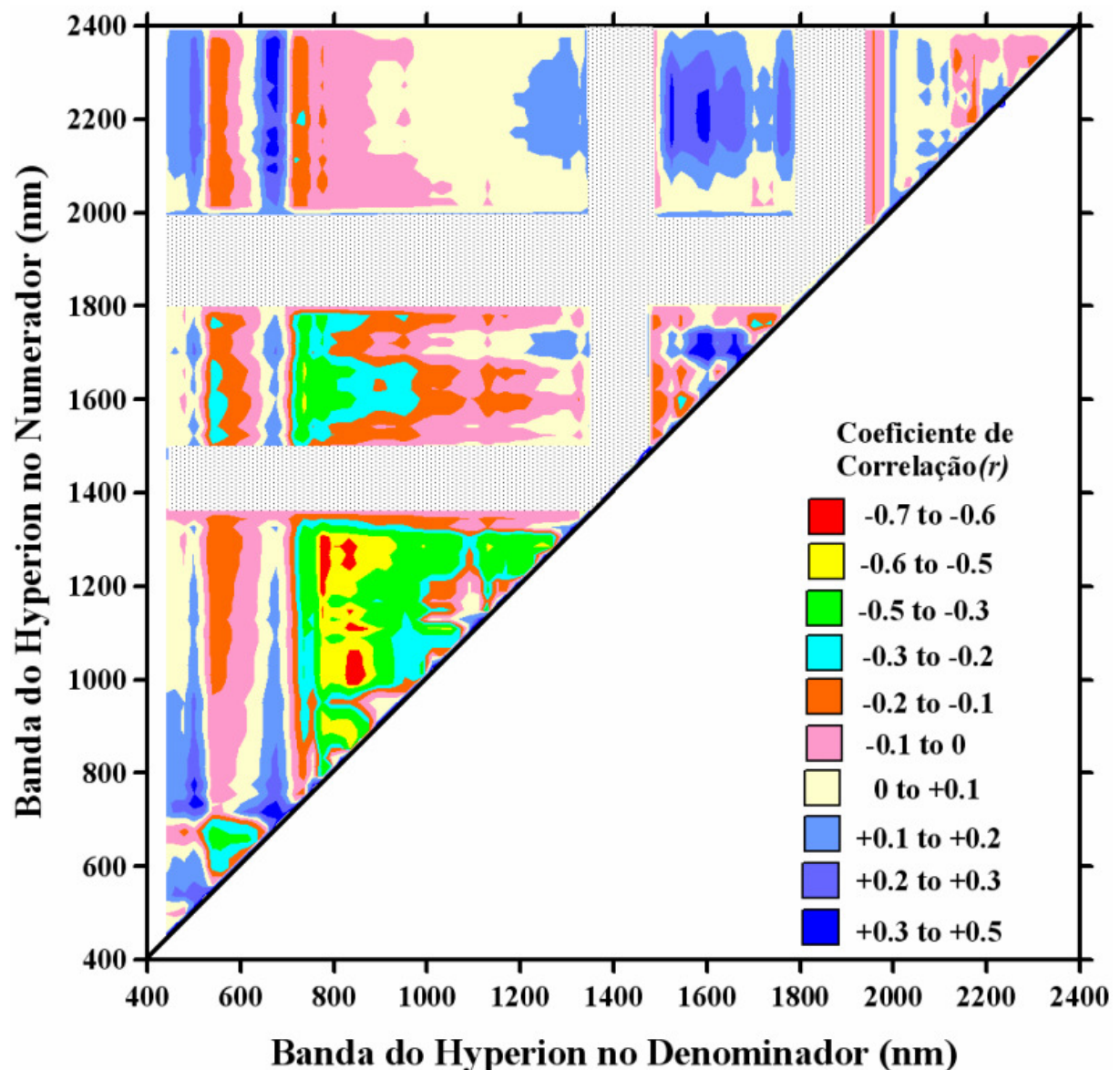


Figura 1 – Mapa de contorno de correlação entre todas as possíveis razões de bandas do sensor Hyperion/EO-1 e a produtividade de soja.

Na Figura 1, as melhores correlações ocorreram quando o numerador esteve na região do infravermelho próximo (IVP em torno de 800 nm) e o denominador nas regiões de absorção da clorofila do azul (487 nm) e do vermelho (681 nm) (cor azul na Figura 1). Esse resultado é consistente com vários estudos que mostraram correlações positivas entre índices de razão

IVP/vermelho e LAI ou produtividade (p.ex., Aparicio et al., 2000; Ma et al., 2001). O infravermelho de ondas curtas (SWIR em 2304 nm) também apresentou correlações positivas, especialmente quando combinado no denominador com a faixa do visível (487 nm e 681 nm) ou a do SWIR em torno de 1649 nm. Entretanto, os resultados mais importantes foram as fortes correlações negativas (cores amarelo e vermelho na Figura 1) observadas para razões de bandas IVP/IVP (p.ex., 1290/770 nm), associadas principalmente com as feições espectrais de água das folhas, cuja profundidade de banda de absorção aumentou com o aumento da produtividade.

A Tabela 3 mostra os resultados de correlação entre os 17 índices de vegetação e a produtividade da soja. Em concordância com os resultados da Figura 1, o melhor índice de vegetação para estimar produtividade foi NDWI seguido do WBI e CRI. Conforme mostrado na Figura 2, valores de NDWI tendem a aumentar com o aumento de produtividade. O melhor coeficiente de correlação obtido entre a produtividade e os índices NDWI e WBI pode ser consequência do tipo de cultivo (no caso a soja). Algumas culturas apresentam uma maior concentração de água nas folhas e, conseqüentemente, os índices que exploram as bandas da água tendem a apresentar melhores resultados.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação de Pearson entre índices de vegetação de bandas estreitas do Hyperion/EO-1 e a produtividade de soja.

Índice de vegetação	Correlação com a produtividade	Associação
ARVI	+0,08	Pigmentos de folhas (p.ex., clorofila e carotenóides)
EVI	+0,42	
NDVI	+0,12	
SR	+0,13	
CRI	+0,53*	
VARI	+0,32	
VIg	+0,40	
MSI	-0,32	Conteúdo de água das folhas
NDII	+0,36	
NDWI	+0,74*	
WBI	+0,47*	
PSRI	+0,17	Estresse hídrico
PRI	+0,09	Eficiência do uso da luz
SIPI	-0,05	
RENDVI	-0,14	Variação da borda vermelha
REP	+0,09	
VOG1	-0,01	

* Correlação significativa ao nível de 0,01

4. Conclusões

Resultados preliminares da análise das relações entre razões de bandas e índices de vegetação de bandas estreitas, calculados a partir de dados Hyperion/EO-1 obtidos com visada fora do nadir na direção de retro-espalhamento, mostraram que as melhores correlações com produtividade foram obtidas: (a) com razões de bandas IVP/IVP; e (b) com índices sensíveis ao conteúdo de água das folhas. Em concordância com a análise da razão de bandas, NDWI apresentou a melhor correlação com produtividade ($r = +0,74$), mesmo considerando a aquisição das imagens para estágios reprodutivos iniciais de desenvolvimento da soja.

Em função da análise de uma única imagem Hyperion, pesquisas adicionais são necessárias para estabelecer a importância do NDWI em estudos de previsão de safras em escala local e a influência da geometria de visada sobre os resultados de correlação. A direção de retro-espalhamento, onde os efeitos de sombreamentos dos componentes do dossel tendem a ser minimizados para o sensor, pode favorecer a diferenciação das variedades de soja e realçar as relações entre índices de vegetação e produtividade.

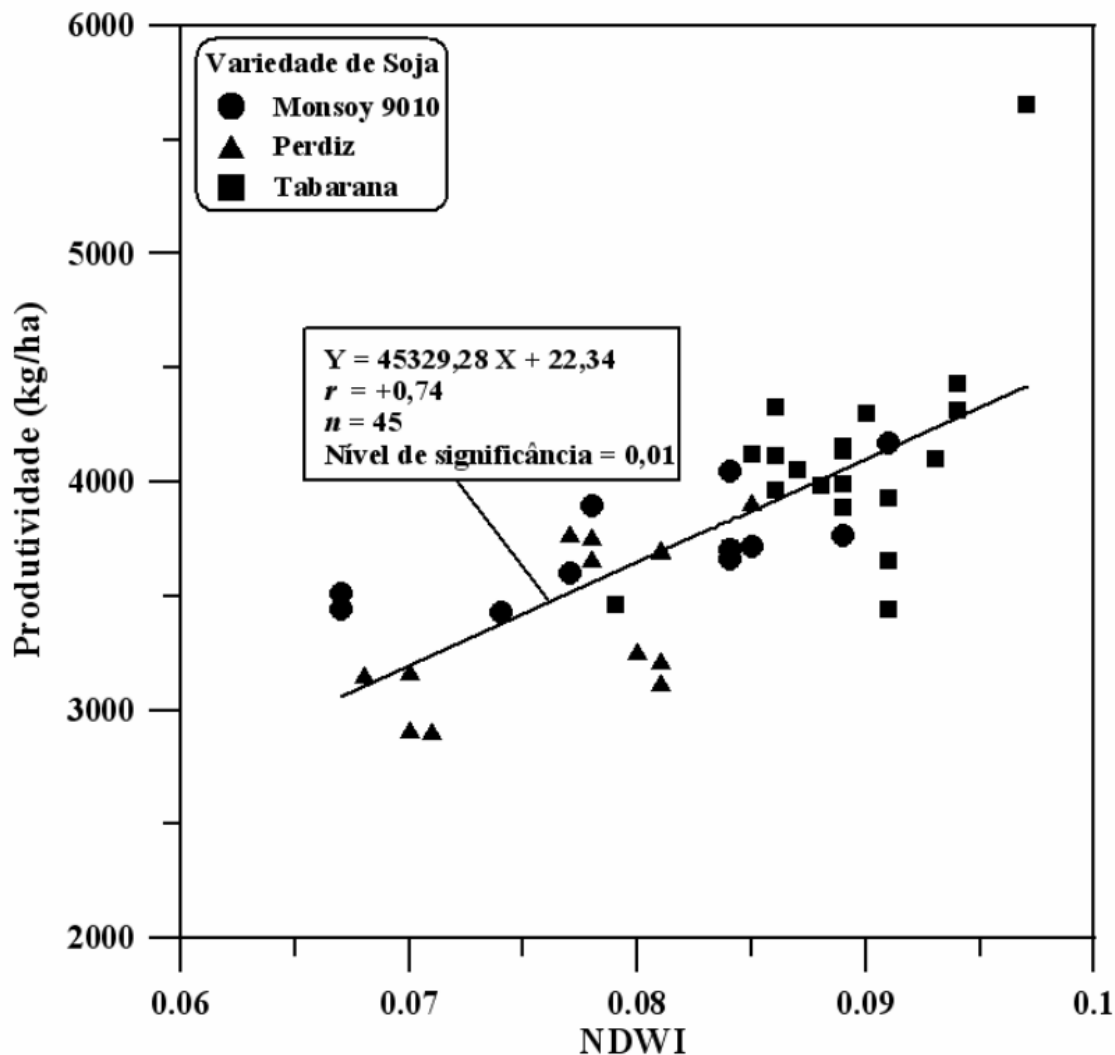


Figura 2 – Relações entre valores do *Normalized Difference Water Index* (NDWI), calculado de bandas estreitas do sensor Hyperion/EO-1, e dados de produtividade de soja.

Agradecimentos

Os autores agradecem imensamente ao Grupo Maggi pelo fornecimento dos dados agrônômicos necessários para a execução dessa pesquisa. Também agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio à pesquisa.

Referências

Aparicio, N.; Villegas, D.; Casadesus, J.; Araus, J.L.; Royo, C. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, v. 92, n. 1, p. 83-91, 2000.

- Bauer, M.E.; Daughtry, C.S.T.; Biehl, L.L.; Kanemasu, E.T.; Hall, F.G. Field spectroscopy of agricultural crops. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 24, n. 1, p. 65-75, 1986.
- Clevers, J.G.P.W. A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 2, p. 221-228, 1997.
- Curran, P.J.; Windham, W.R.; Gholz, H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. **Tree Physiology**, v. 15, n. 3, p. 203-206, 1995.
- Doraiswamy, P.C.; Hatfield, J.L.; Jackson, T.J.; Akhmedov, B. Prueger, J.; Stern, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 4, p. 548-559, 2004.
- Gamon, J.A.; Serrano, L.; Surfus, J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492-501, 1997.
- Gao, B.C. (1996). NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.
- Gitelson, A.A.; Merzlyak, M.N.; Lichtenthaler, H.K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3-4, p. 501-508, 1996.
- Gitelson, A.A.; Zur, Y.; Chivkunova, O.B.; Merzlyak, M.N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272-281, 2002a.
- Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Stark, R.; Rundquist, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002b.
- Green, A.A.; Berman, M.; Switzer, P.; Craig, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.
- Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- Hunt, E.R.; Rock, B.N. Detection of changes in leaf-water content using near-infrared and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 1989.
- Kaufman, Y.J.; Tanré, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992.
- Ma, B.L.; Dwyer, L.M.; Costa, C.; Cober, E.R.; Morrison, M.J. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 6, p. 1227-1234, 2001.
- Merzlyak, M.N.; Gitelson, A.A.; Chivkunova, O.B.; Rakitin, V.Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, v. 106, n. 1, p. 135-141, 1999.
- Penuelas, J.; Baret, F.; Filella, I. Semiempirical indexes to assess carotenoids chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221-230, 1995.
- Penuelas, J.; Pinol, J.; Ogaya, R.; Filella, I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 13, p. 2869-2875, 1997.
- Prasad, A.K.; Chai, L.; Singh, R.P.; Kafatos, M. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 8, n. 1, p. 26-33, 2006.

- Rizzi, R.; Rudorff, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 73-80, 2007.
- Rouse, J.W.; Haas, R. H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS-1 Symposium, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. Washington, 10-14 December, NASA SP-351, v. 1, p. 309-317, 1973.
- Royo, C.; Aparicio, N.; Villegas, D.; Casadesus, J.; Monneveux, P.; Araus, J.L. Usefulness of spectral reflectance indices as durum wheat yield predictors under contrasting Mediterranean conditions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 22, p. 4403-4419, 2003.
- 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**, v. 31, n. 1, p. 53-63, 1990.
- Serrano, L.; Filella, I.; Penuelas, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. **Crop Science**, v. 40, n. 3, p. 723-731, 2000.
- Shanahan, J.F.; Schepers, J.S.; Francis, D.D.; Varvel, G.E.; Wilhelm, W.W.; Tringe, J.M.; Schlemmer, M.R.; Major, D.J. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 3, p. 583-589, 2001.
- Shibayama, M.; Akiyama, T., Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 36, n. 1, p. 45-53, 1991.
- Thenkabail, P.S.; Smith, R.B.; Pauw, E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 158-182, 2000.
- Vogelmann, J.E.; Rock, B.N.; Moss, D.M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1563-1575, 1993.
- Xavier, A.C.; Rudorf, B.F.T.; Moreira, M.A.; Alvarenga, B.S.; Freitas, J.G.; Salomon, M.V. Hyperspectral field reflectance measurements to estimate wheat grain yield and plant height. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p. 130-138, 2006.
- Zarco-Tejada, P.J.; Ustin, S.L.; Whiting, M.L. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 641-653, 2005.