

Desenvolvimento do Trigo Avaliado com Dois Índices de Vegetação

JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO¹
ALMYR CÉSAR DE ALMEIDA JR.¹
ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO¹

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Sensoriamento Remoto
Av. dos Astronautas 1758, 12210-970 São José dos Campos SP, Brasil
{epiphani, formag}@ltid.inpe.br

Resumo Tem-se buscado estabelecer relações físicas entre parâmetros de sensoriamento remoto e parâmetros biofísicos dos alvos naturais. Entende-se que assim será mais proveitoso o uso quantitativo dos dados gerados pelos sensores remotos, na forma dos diversos produtos possíveis. No campo da vegetação os índices de vegetação (IVs) têm papel destacado, haja vista as bases de dados geradas tomando o NDVI (índice de vegetação diferença normalizada). Porém, não obstante essa generalidade dos IVs, os seus relacionamentos com variáveis do meio físico ainda apresentam divergências de interpretação e de calibração. Neste trabalho estudam-se dois índices de vegetação e suas relações tanto com variáveis biofísicas da cultura do trigo como com outras variáveis espectrais. Além disso, são apresentadas algumas implicações dessas relações quando se varia o ângulo zenital de visada.

Abstract This paper describes the relationships between two vegetation indices (NDVI — normalized vegetation index and SAVI — soil adjusted vegetation index) and biophysical variables of wheat. Two viewing zenithal angles are used as additional influencing factors. It is discussed the implications of reflectance of simulated TM bands along with the dynamics of wheat development on the vegetation indices. It is shown that the TM4 reflectance has much more influence on the SAVI than on the NDVI and that the SAVI is more sensitive to viewing angle than the NDVI. Also, correlations between agronomic variables and the SAVI or NDVI were no improved in relation to those correlations with TM4.

Keywords: Remote Sensing, Vegetation Indices, Wheat, NDVI, Reflectance.

1 Introdução

O estudo dos diversos tipos de vegetação é uma das principais aplicações do sensoriamento remoto. Além do monitoramento há um interesse em avaliar as propriedades biofísicas dos alvos vegetados, como por exemplo, percentagem de cobertura do solo, índice de área foliar, biomassa (Epiphanio et al., 1990; Epiphanio e Formaggio, 1991). Tais propriedades biofísicas funcionam como indicadores da condição desses alvos e, muitas vezes, servem como parâmetros de entrada em modelos diversos.

A relação entre sensoriamento remoto e os parâmetros biofísicos pode ser feita tanto através das bandas simples, através da aplicação de índices de vegetação (IVs), ou ainda pela aplicação de outros modelos ou transformações, como as razões de mistura. No caso do emprego de índices de vegetação (IVs) o processamento é simplificado, uma vez que sua construção a partir dos dados originais de radiometria

ou de imagens de satélite não é, em geral, um procedimento complexo.

O IV mais extensivamente usado é o NDVI (índice de vegetação diferença normalizada, eq. 1) (Jackson et al., 1983). Seu uso extensivo deve-se muito à construção de bases de dados globais baseados nos dados do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) dos satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (Huete et al., 1994). Tal sensor, possuindo canais ou bandas espectrais no visível e no infravermelho próximo permite a elaboração do NDVI.

$$\text{NDVI} = (\text{IVP} - \text{V}) / (\text{IVP} + \text{V}) \quad (1)$$

onde,

IVP = reflectância no infravermelho próximo.

V = reflectância no vermelho.

Porém, o seu relacionamento com variáveis biofísicas tem esbarrado em diversos problemas, como

calibração, saturação em níveis relativamente baixos de vegetação, influências de solos, e de condições atmosféricas e de visada e de iluminação. Diante disso, têm surgido alguns outros IVs visando, basicamente, reduzir um ou mais desses problemas (Wiegand et al., 1991). Uma dessas versões que tem apresentado bons resultados é o SAVI (índice de vegetação ajustado para o solo, eq. 2), onde se usam as mesmas bandas do NDVI, porém introduz-se um deslocamento dos eixos espectrais de modo a minimizar influências do solo de fundo (Huete, 1985).

$$\text{SAVI} = 1,5(\text{IVP} - \text{V})/(\text{IVP} + \text{V} + 0,5) \quad (2)$$

Outro aspecto nas análises relacionadas com a avaliação de variáveis biofísicas via sensoriamento remoto é o da influência do ângulo de visada sobre tais relações. Este problema tem surgido principalmente tendo em vista a disponibilidade de sistemas com capacidade de imageamento fora do nadir, como o SPOT ou mesmo os sistemas com grandes aberturas angulares, como o AVHRR/NOAA. As conseqüências de tais condições de visada sobre os IVs ainda estão por ser mais bem avaliadas.

Assim, este trabalho visa ao melhor entendimento das respostas espectrais do trigo durante seu ciclo de desenvolvimento e ao estudo de dois índices de vegetação e seus comportamentos em função de variações no ângulo de visada.

2 Material e Métodos

Para este estudo foi instalado um experimento com trigo (*Triticum aestivum* L.) irrigado numa estação experimental localizada a 47°5'W 22°5'S, durante os dias julianos de 140 a 261 de 1991. O solo é o Latossolo Roxo (unidade Barão Geraldo, segundo Oliveira e Menk, 1984). É um solo derivado de rochas basálticas, com albedo baixo, teores de ferro maiores que 18%, textura no mínimo argilosa, matiz igual ou mais vermelho que 3,5 YR, com relação valor/croma igual ou inferior a 3/5. A variedade de trigo utilizada foi a IAC-24, de porte baixo (~1m). O trigo foi semeado mecanicamente a 17cm entre fileiras orientadas nordeste-sudoeste (48°E) e feitas as adubações recomendadas segundo as análises de solo. Foi deixada uma bordadura de 10 fileiras tanto no início quanto no final das área experimental. Em cada campanha de coleta de dados, 20 das 257 fileiras restantes eram sorteadas para que fossem os centros dos pontos amostrais (Almeida Jr., 1993).

Ao todo foram realizadas 10 campanhas de coleta de dados biofísicos e radiométricos, com o objetivo de caracterizar as quatro grandes fases fenológicas do trigo. Tais fases podem ser caracterizadas segundo a

escala de Feeks e Large (1954), apud Scheeren (1986). Segundo esta escala, os valores de 1 a 5 correspondem à fase da germinação ao afilamento, de 6 a 9 correspondem ao alongamento, de 10.1 a 10.5 ao espigamento, e 11 à maturação.

TABELA 1. Campanhas de coleta de dados.

Campanha radiométrica	Data (dia juliano)	Estádio fenológico
1	12/6/91 (164)	4.
2	26/6/91 (178)	7.
3	2/7/91 (184)	9.
4	17/7/91 (199)	10.
5	25/7/91 (207)	10.4.
6	30/7/91 (212)	10.5.1.
7	15/8/91 (228)	10.5.4.
8	20/8/91 (233)	11.2.
9	4/9/91 (248)	11.3.
10	17/9/91 (261)	11.4.

As medições radiométricas foram realizadas com o espectrorradiômetro Spectron SE-590¹ sobre 20 pontos amostrais por campanha radiométrica. Adotaram-se duas configurações de visada para as medições, a nadir e a 30°. Em cada ponto amostral eram feitas duas medições a nadir a fim de minimizar erros. Para as medições a 30° o ponto de fixação do mastro de sustentação do espectrorradiômetro era deslocado de modo que a visada correspondesse aproximadamente àquela da visada a 0°. Em cada ponto amostral era feita uma medição da placa de referência de sulfato de bário. Ambas essas medições foram utilizadas para posterior obtenção do fator de reflectância bidirecional (FRB) referente ao ponto e ao ângulo de visada. Posteriormente esses FRBs foram reamostrados para as bandas TM3 (vermelho) e TM4 (infravermelho próximo) a fim de que os índices de vegetação fossem gerados.

Os principais parâmetros biofísicos medidos durante as campanhas foram a percentagem de cobertura do solo, o índice de área foliar, o peso da matéria seca, a biomassa seca aérea e a altura. Essas medições eram feitas sobre as plantas contidas no ponto amostral radiométrico e correspondente ao FOV. A

¹Nem o INPE nem os autores sugerem ou recomendam o uso de quaisquer marcas de equipamentos. A indicação explícita neste caso visa apenas facilitar o entendimento do leitor.

cobertura vegetal era avaliada através de fotografia 35mm vertical. O *peso seco* foi determinado através da coleta e secamento da parte aérea em estufa de ventilação forçada a uma temperatura média de 65 C por 48-72 horas. A *área foliar* do FOV foi obtida com base na relação entre a área foliar e o seu peso seco, segundo descrição de Daughtry (1990). A cada campanha de coleta de dados, três dos 20 pontos amostrais eram sorteados e em cada um desses pontos uma sub-amostra de 30 plantas era desfolhada. Tais folhas tinham sua área medida com o integrador de área Li-cor Li-3100¹ Cada sub-amostra era levada à estufa para obtenção de seus pesos secos. O restante das folhas desses três pontos, bem como dos 17 pontos amostrais restantes eram também levados à estufa. A partir da relação entre a área desses três pontos e suas respectivas áreas, estimavam-se as áreas dos outros 17 pontos. O *índice de área foliar (IAF)* foi determinado dividindo-se a área total das folhas de cada ponto amostral pela área do FOV a 0° do ponto correspondente. A *biomassa* foi obtida pela divisão entre o peso seco das folhas e a área do FOV.

3 Resultados e Discussão

A cultura apresentou um desenvolvimento normal, como pode ser visto na Figura 1. No início do

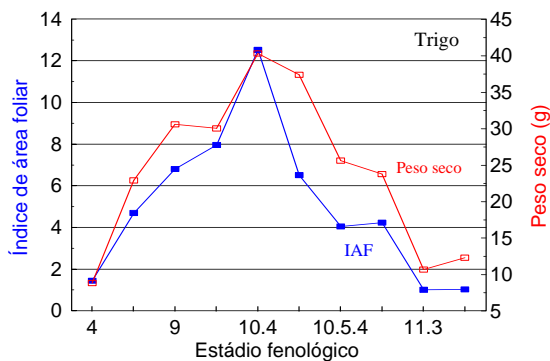


Figura 1. Índice de área foliar e peso seco durante o desenvolvimento do trigo.

desenvolvimento o trigo tem uma rápida produção de fitomassa e de área foliar. Observa-se que há uma estreita relação gráfica entre o IAF e o peso seco do trigo, o que é típico dessa gramínea, constituída basicamente por folhas. A elevação do peso seco que se observa no final do ciclo é devida aos grãos formados.

A partir desse gráfico de desenvolvimento do trigo é possível estabelecer as relações entre essas variáveis biofísicas e as variáveis espectrais. Como forma de auxiliar nas discussões, apresenta-se na Tabela 2 a correlação entre os dados biofísicos e os dados espectrais. A banda simulada do TM4 mostra-se mais correlacionada com as variáveis biofísicas peso seco, IAF e biomassa do que a banda TM3. Isso pode ser explicado em função da prematura saturação da banda TM3 em relação à banda TM4, principalmente em função da alta absorção da radiação eletromagnética que ocorre nesta banda nas primeiras camadas de folhas. A banda TM4, por ter maior penetração nas camadas foliares inferiores e, por conseguinte, interagir mais com o dossel, porta informação também dessas camadas inferiores.

Na Figura 2 pode-se observar o comportamento da banda TM3 ao longo do desenvolvimento do trigo. Os níveis de reflectância são baixos, e permanecem num patamer inferior durante boa parte do ciclo, elevando-se

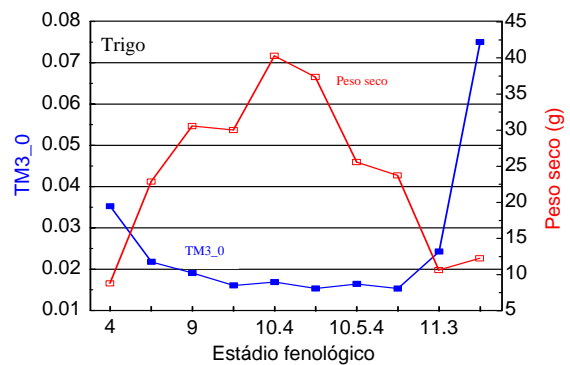


Figura 2. Banda TM3 (nadir) e peso seco durante o desenvolvimento do trigo.

acentuadamente no final, principalmente em função de um declínio dos pigmentos foliares responsáveis pela absorção energética. Embora haja variações no peso seco, não se observa um grande ajuste desta banda a essa variável biofísica, refletindo num coeficiente de correlação de -0,60.

Ao contrário da banda TM3, a banda TM4 tem um ajuste muito forte com o peso seco foliar (Figura 3), refletindo num coeficiente de correlação de 0,98. Ou seja, neste experimento, a banda TM4 apresenta-se como um ótimo estimador desse parâmetro biofísico. Isso se deve principalmente à maior interação da radiação infravermelha com porções mais espessas do dossel.

TABELA 2. Coeficientes de correlação entre variáveis biofísicas e espectrais para o trigo, onde ND e SA são NDVI e SAVI, respectivamente, e o sufixo 0 e 30 significam visadas a 0° e 30°, respectivamente.

	P. seco	Biom.	TM3_0	TM3_30	TM4_0	TM4_30	ND_0	ND_30	SA_0	SA_30
IAF	0,92	0,97	-0,55	-0,46	0,90	0,90	0,70	0,67	0,86	0,86
P. seco		0,90	-0,60	-0,51	0,98	0,92	0,79	0,75	0,95	0,92
Biom.			-0,50	-0,39	0,91	0,96	0,68	0,64	0,85	0,88
TM3_0				0,98	-0,61	-0,55	-0,96	-0,97	-0,80	-0,80
TM3_30					-0,52	-0,42	-0,91	-0,93	-0,72	-0,70
TM4_0						0,94	0,79	0,75	0,96	0,94
TM4_30							0,73	0,68	0,90	0,94
ND_0								1,00	0,93	0,92
ND_30									0,90	0,98
SA_0										0,89

Quando se constroem os IVs busca-se um maior relacionamento com as variáveis biofísicas ou mesmo uma menor sensibilidade a fatores externos atuantes, como solo e geometrias de iluminação e visada. Além disso, o fato de utilizarem mais de uma banda na sua constituição poderia ser um fator positivo, uma vez que mais informação espectral estaria embutida num único parâmetro espectral.

Não obstante, ainda deve ser mais bem avaliada a relação existente esse decréscimo de correlação e outros aspectos positivos, como a estabilidade da relação frente a fatores ambientais (solos, atmosfera) e geométricos (visada e iluminação).

Outro aspecto a ser observado é que as correlações entre as variáveis biofísicas e os IVs são maiores para o SAVI do que para o NDVI. Como mostrado por Epiphanyo e Huete (1995), para alfafa, o SAVI é mais sensível à radiação no infravermelho do que no vermelho, e o inverso ocorre para o NDVI. Aqui também, para o trigo, essa relação parece confirmar-se, pois o coeficiente de correlação entre TM4 (no nadir) e o SAVI é maior do que com o NDVI (0,96 e 0,79, respectivamente). Para a banda TM3 os coeficientes de correlação são -0,80 e -0,96, respectivamente. Assim, como a banda infravermelha porta maior densidade de informação das camadas inferiores do dossel e, portanto, é mais correlacionada com os parâmetros biofísicos indicadores dessa densidade (IAF, peso seco), é esperado que um índice de vegetação que seja mais sensível ao infravermelho também seja mais indicativo daqueles parâmetros biofísicos.

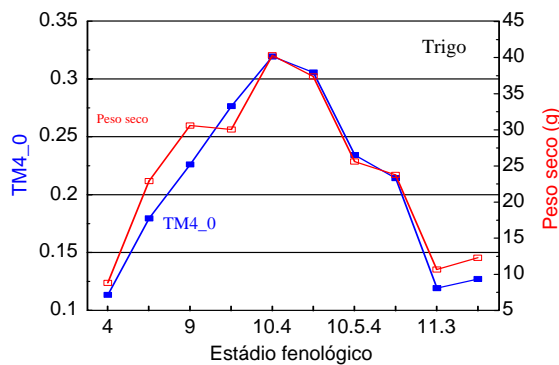


Figura 3. Banda TM4 simulada (nadir) e peso seco durante o desenvolvimento do trigo.

Porém, a observação da Tabela 2 mostra que tanto o NDVI quanto o SAVI (observe-se inicialmente a visada a nadir) apresentam um decréscimo (acrécimo) de correlação com as variáveis biofísicas, em relação às bandas simples TM4 (TM3). Ou seja, quando se acoplam as informações das duas bandas nos IVs há um prejuízo do relacionamento com as variáveis biofísicas.

Esses aspectos discutidos podem ser mais bem visualizados pela análise conjunta das Figuras 1, 3 e 4. Observa-se que o NDVI, com o transcorrer do ciclo, eleva-se e eventualmente atinge um patamar de semi-saturação, permanecendo nesse patamar por praticamente seis campanhas, enquanto que o tempo de permanência do SAVI neste patamar restringe-se a duas campanhas de coleta de dados. As Figuras 1 e 3 mostram que o peso seco e a banda TM4 têm o mesmo comportamento do SAVI.

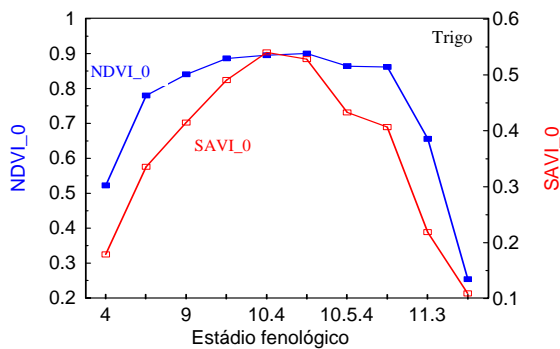


Figura 4. NDVI e SAVI (nadir) durante o desenvolvimento do trigo.

Uma outra forma de abordar e analisar esses dados refere-se ao padrão regressivo de estimar variáveis biofísicas a partir das variáveis espectrais. Não se pretende aqui descrever ou avaliar quantitativamente o valor preditivo dos dados espectrais. Apenas será descrito o comportamento dos IVs em relação aos valores crescentes de IAF, uma variável fundamental em análises de vegetação. A Figura 5 retrata esse comportamento. Observa-se o denominado “fenômeno de trajetória”, caracterizado por dois percursos das variáveis espectrais: um quando a cultura está na fase de crescimento, e outra quando a cultura dirige-se para as fases finais de seu ciclo. O NDVI é menos sensível a tais padrões espectrais diferenciados, ao passo que o SAVI apresenta maior sensibilidade ao percurso espectral diferenciado da cultura. Não se pode dizer que um IV seja melhor ou pior do que o outro — tal análise depende do objetivo que se tem em vista. Assim, caso se analise estritamente sob a óptica da avaliação do IAF,

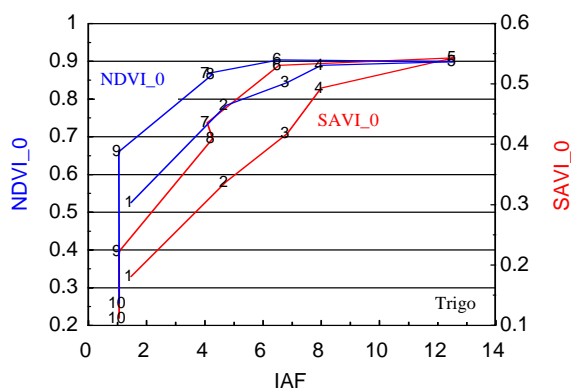


Figura 5. NDVI e SAVI (nadir) em função de IAF.

o SAVI parece ser um IV mais eficiente, pois sua gama de variação é mais ampla; porém apresenta um fenômeno de trajetória mais acentuado.

Quanto aos ângulos de visada, deve-se avaliar o impacto que a mudança de uma visada do nadir para 30° acarreta sobre os IVs e sobre as correlações com as variáveis biofísicas. Em geral, as correlações entre NDVI_0 (no nadir) e biomassa, peso seco, e IAF foram maiores do que as obtidas com NDVI_30 (visada a 30°). Isso pode ser atribuído ao fato de que, ao fazer a mudança de ângulo de visada, embora houvesse um aumento na correlação dos parâmetros biofísicos com a banda TM4, houve uma sensível queda nas correlações com a banda TM3. A resultante foi um decréscimo de correlação do NDVI_0 em relação ao NDVI_30. Em relação à mudança de SAVI_0 para SAVI_30, embora não tenha sido substancial, pode-se detectar algum aumento nas correlações com a biomassa (0,85 para 0,88), fitomassa (0,89 para 0,91). Esses resultados corroboram a hipótese de Epiphanyo e Huete (1995) sobre a sensibilidade diferenciada dos IVs quanto às suas bandas constituintes e, conseqüentemente, quanto ao potencial de cada IV como estimador de diferentes variáveis ambientais.

4 Conclusões

O desenvolvimento agrônomo do trigo foi mais bem explicado pela banda TM4 do que pela banda TM3, principalmente em função da maior interação desta banda com as camadas mais internas do dossel.

Os índices de vegetação estudados não melhoraram os coeficientes de correlação da banda TM4, embora não se tenha podido avaliar suas contribuições na normalização de efeitos espúrios, como solo e iluminação diferenciados. Não obstante, de forma geral, os coeficientes de correlação entre os IVs e os parâmetros agrônômicos foram elevados.

A alteração do ângulo de visada de 0° para 30° teve um impacto positivo nas correlações das variáveis agrônômicas estudadas com o SAVI e negativo com o NDVI. Isso foi atribuído basicamente à sensibilidade diferenciada dos IVs em relação às suas bandas constituintes.

Há uma necessidade de maior aprofundamento nessa área pois, com o desenvolvimento de novos sensores e com a ampliação das bases de dados de sensoriamento remoto, haverá obrigatoriamente uma demanda por relações quantitativas com variáveis ambientais como as aqui estudadas.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à UNICAMP, nas pessoas do Sr. Sérgio e dos professores Drs. Hilton e Pedro. Também agradecemos à Fundação Banco do Brasil pelo financiamento do Projeto Estima.

Referências

- Almeida Jr., A.C. *Avaliação de dois modelos de simulação de dosséis agrícolas em trigo (*Triticum aestivum*, L)*. S. J. Campos, INPE, 1993. 85p. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto).
- Daughtry, C.S.T. Direct measurement of canopy structure. In: Goel, N.S.; Norman, J.M. eds. *Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions*. London, Harwood, 1990, p.45-60.
- Epiphânio, J.C.N.; Formaggio, A.R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 26(10):1615-1624, 1991.
- Epiphânio, J.C.N.; Huete, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effects on fAPAR relationships in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 51(3):351-360, 1995.
- Epiphânio, J.C.N.; Formaggio, A.R.; França, G.V. Avaliação das bandas do satélite Landsat-5 na discriminação entre culturas de trigo e de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 25(3):371-377, 1990.
- Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3):295-309, 1988.
- Huete, A.R.; Justice, C.; Liu, H. Development of vegetation indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49(3):224-234, 1994.
- Jackson, R.D.; Slater, P.N.; Pinter Jr., P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*, 13(3):187-208, 1983.
- Oliveira, J.B.; Menk, J.R. *Latossolos roxos do Estado de São Paulo*. Campinas, IAC, 1984. 132p. (BT 82).
- Scheeren, P.L. *Informações sobre o trigo*. Passo Fundo, CNPT-EMBRAPA, 1986. 33p.
- Wiegand, C.L.; Richardson, A.J.; Escobar, D.E.; Gerberman, A.H. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35(2):105-119, 1991.