

Índices de vegetação derivados do sensor Hyperion/EO-1 para estimativa de parâmetros biofísicos de fitofisionomias de Cerrado

Alana Almeida de Souza
Lênio Soares Galvão
João Roberto dos Santos

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

Abstract. Multispectral remote sensing has been widely used to estimate structural parameters of vegetation. However, data collection by broadband systems may result in the loss of crucial information available in specific wavelengths. In this context, the advent of hyperspectral remote sensing has offered possibilities to overcome this limitation. One of the most common approaches to estimate vegetation parameters from remote sensing data is the use of statistical techniques to find empirical relationships between measured *in situ* biophysical parameters and spectral reflectance or derived vegetation indices. In this paper, 18 narrow-band vegetation indices, calculated from Hyperion/EO-1 data, were tested for estimating basal area of *Cerrado* physiognomies in the Pirenópolis region, Goiás state. Five physiognomies with different structural parameters were analyzed: *campo limpo*, *campo sujo*, *cerrado sentido restrito*, *cerradão* and *mata seca semidecídua*. Before spectral transformations, the Hyperion radiance image was converted into atmospherically corrected surface reflectance data using a MODTRAN-based approach. From the studied vegetation indices, the best correlation results with basal area were observed for VOG 1, VIg, SR, VARI, RENDVI, EVI and NDVI (positive association) and for PSRI and SIPI (negative association). Results showed the importance of narrow-band vegetation indices associated with leaf pigments and red edge in the *Cerrado* environment

Palavras-chave: hyperspectral remote sensing, vegetation index, biophysical parameters, basal area, *Cerrado*, savanna, sensoriamento remoto hiperespectral, índices de vegetação, parâmetros biofísicos, área basal, Cerrado, savana.

1. Introdução

Uma das principais contribuições do sensoriamento remoto aplicado aos estudos florestais é a estimativa de parâmetros biofísicos e fisiológicos da vegetação de forma não-destrutiva. Abordagens quantitativas são normalmente utilizadas para encontrar uma relação entre parâmetros do alvo (parâmetros estimados *in situ*, e.g., área basal) e sua reflectância espectral e/ou transformações de reflectância (e.g., índices de vegetação).

Os índices de vegetação são um dos dados mais utilizados no monitoramento sazonal e interanual de parâmetros fisiológicos e estruturais dos diferentes ecossistemas via sensoriamento remoto. Eles consistem em transformações, lineares ou não, de bandas espectrais designadas para realçar a contribuição de propriedades de interesse da vegetação. Com o advento dos sensores hiperespectrais, surgiu um novo grupo de índices de vegetação que incluem bandas estreitas, permitindo a detecção de propriedades específicas da vegetação com maior acurácia, uma vez que essas propriedades muitas vezes se manifestam de forma localizada no espectro eletromagnético. A importância desse novo grupo de índices e sua superioridade em quantificar propriedades da vegetação, quando comparados com índices espectrais de bandas largas, tem sido demonstrada em muitos estudos (Pu et al., 2005; Tisot et al., 2005; Blackburn, 1998; Lee et al., 2004; Schlerf et al., 2005; Thenkabail et al., 2004). A maioria desses estudos foi conduzida em dosséis homogêneos. Por conseguinte, torna-se necessária a realização de estudos que verifiquem a aplicabilidade desses índices na estimativa de parâmetros estruturais da vegetação em dosséis heterogêneos, tais como os que ocorrem no Cerrado.

O bioma Cerrado apresenta um mosaico de fitofisionomias com distintas características estruturais e florísticas. As fitofisionomias existentes incluem desde formações florestais, com

predomínio de árvores na paisagem e formação de dossel, contínuo ou descontínuo, até formações campestres, onde há ausência completa de árvores. Assim, as fitofisionomias do Cerrado apresentam um gradiente de vegetação com distintas características estruturais, as quais se expressam em parâmetros como altura média das árvores, densidade de indivíduos, porcentagem de cobertura do dossel, área basal, dentre outras.

O sensor Hyperion, a bordo da plataforma EO-1 (*Earth Observing 1*), é o primeiro sensor hiperespectral em nível orbital; adquire dados de 400 a 2500 nm em 220 bandas, das quais 196 são radiometricamente calibradas. A resolução espectral é de 10 nm e a resolução espacial é de 30 m. Lançado em 21 de novembro de 2000, o sensor Hyperion/EO-1 faz parte de um programa da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para testar o desempenho de novas tecnologias para observação da Terra.

Nesse contexto, o presente estudo objetiva a análise de índices espectrais do sensor Hyperion/EO-1 para a estimativa da área basal de diversas fitofisionomias de Cerrado.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na região de Pirenópolis, Estado de Goiás, entre as coordenadas geográficas 48° 46' W a 48° 55' W e 15° 32' S a 15° 55' S. Engloba a cidade de Pirenópolis e parte da Serra dos Pireneus. Parte da área está localizada na APA dos Pireneus, que, dentre outros objetivos, visa proteger os remanescentes de Cerrado e os recursos hídricos da região (Figura 1). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo Aw1. O período úmido ocorre nos meses de outubro a abril e período seco ocorre de maio a agosto. A área apresenta as seguintes fitofisionomias de Cerrado: campo limpo, campo sujo, cerrado sentido restrito, cerradão e mata seca semidecídua.

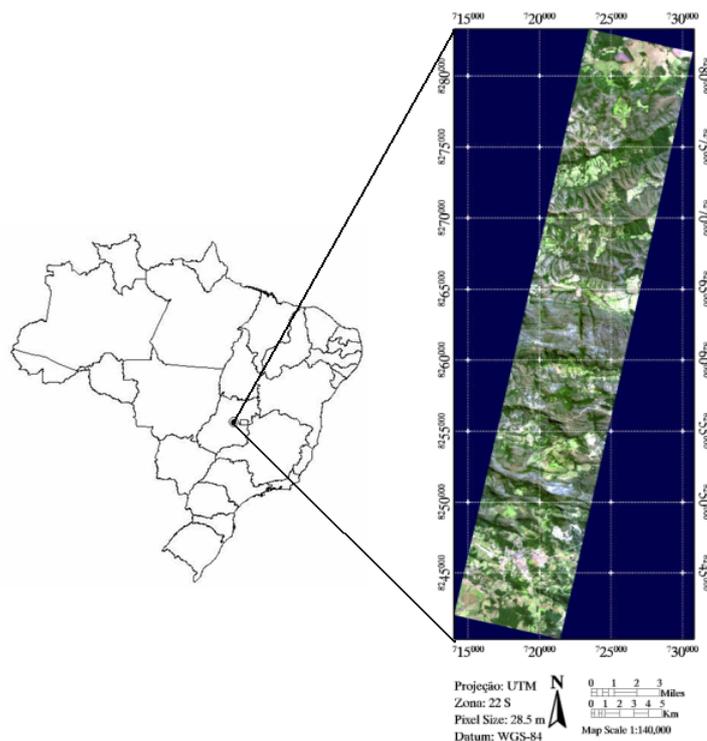


Figura 1. Localização da área de estudo em Pirenópolis (GO) e composição colorida cor verdadeira associada (bandas do sensor Hyperion/EO-1 posicionadas em 640 nm, 548 nm e 457 nm em RGB).

O campo limpo é uma fitofisionomia predominantemente herbácea, com raros arbustos e ausência completa de árvores na paisagem. O campo sujo é um tipo fisionômico exclusivamente herbáceo-arbustivo, com arbustos e subarbustos esparsos; muitas vezes é constituído por indivíduos menos desenvolvidos das espécies arbóreas do cerrado sentido restrito. O cerrado sentido restrito é uma vegetação xeromórfica caracterizada pela presença de árvores baixas e tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas, e, geralmente, com evidências de queimadas; os arbustos e subarbustos encontram-se dispersos. Na área de estudo, essa fisionomia diferencia-se em cerrado ralo, cerrado rupestre e cerrado denso. A densidade de indivíduos arbóreos é crescente do cerrado ralo para o denso. As áreas de cerrado rupestre ocorrem sobre afloramentos de quartzito. O cerradão é uma formação de porte florestal com aspectos xeromórficos, apresenta espécies que ocorrem no cerrado sentido restrito e também espécies de mata. A mata seca semidecídua é uma formação florestal caracterizada pela perda parcial (entre 20 e 50%) da folhagem de suas árvores mais altas durante a estação seca; ocorre em solos geralmente mais ricos em nutrientes (Ribeiro e Walter, 1998).

2.2 Dados de Campo

As fitofiosionomias foram amostradas em campo por meio de 28 parcelas de 20x50m. Todas as parcelas tiveram seu posicionamento registrado por meio da utilização de GPS. Nas formações florestais (mata seca e cerradão) foram amostrados todos os indivíduos vivos com circunferência a altura do peito (CAP) igual ou superior a 15 cm. Nas formações savânicas (cerrado ralo, cerrado rupestre, cerrado denso) e campestres (campo limpo e campo sujo) foram amostrados todos os indivíduos vivos com 15 cm de circunferência a 30 cm de altura do solo (CAB) e altura igual ou superior a 0,5 m. Por meio dos dados de CAP e CAB dos indivíduos amostrados, foi obtida a área basal de cada parcela. A área basal é a soma das áreas seccionais dos indivíduos amostrados obtidas a partir dos dados de CAP e CAB por unidade de área.

2.3 Processamento da Imagem Hyperion

A imagem Hyperion utilizada no presente estudo foi adquirida em 13 de junho de 2006, correspondendo, portanto, ao período seco. Inicialmente foram removidos os *stripes* e pixels ruidosos das imagens por meio da substituição desses pela média de seus vizinhos na direção horizontal. Em seguida, os dados de radiância foram convertidos para reflectância de superfície com o uso do aplicativo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), um programa baseado no modelo de transferência radiativa MODTRAN-4. O modelo atmosférico utilizado foi o tropical/ rural, com 70 Km de visibilidade. A técnica fração mínima de ruído foi aplicada sobre as imagens reflectância de superfície nos seguintes intervalos espectrais, separadamente: 426 a 752 nm, 762 a 1.316 nm, 1.507 a 1.790 nm e 2.002 a 2.395 nm (Green et al., 1988; Apan et al., 2004).

A correção geométrica da imagem Hyperion teve como referência uma imagem TM/Landsat 5 ortorretificada. Aplicou-se sobre o conjunto de pontos de controle utilizados um ajuste polinomial de primeira ordem, seguida pela reamostragem dos pixels da cena pelo método do vizinho mais próximo. O erro quadrático médio obtido nesse processo foi de 0,28 pixels.

A partir das imagens reflectância, geometricamente corrigidas, foram derivados os seguintes índices: *Simple Ratio* (SR), *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI), *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI), *Vogelmann Red Edge Index* (VOG1), *Red Edge Position Index* (REPI), *Photochemical Reflectance Index* (PRI), *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI), *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI), *Carotenoid Reflectance Index* (CRI), *Anthocyanin Reflectance Index* (ARI), *Water Band Index* (WBI),

Normalized Difference Water Index (NDWI), Moisture Stress Index (MSI), Normalized Difference Infrared Index (NDII), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) e Visible Green Index (VIg), cuja formulação matemática encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Índices de vegetação utilizados no presente estudo.

Índice de Vegetação	Fórmula*	Referência
SR	R_{864}/R_{671}	Rouse et al., 1973
ARVI	$(R_{864} - (2 * R_{671} - R_{467})) / (R_{864} + (2 * R_{671} - R_{467}))$	Kaufman e Tanré, 1992
RENDVI	$(R_{752} - R_{701}) / (R_{752} + R_{701})$	Gitelson et al., 1996
VOG1	R_{742}/R_{722}	Vogelmann et al., 1993
REPI	$(R_{\lambda} + 1 - R_{\lambda}) / 10$, no intervalo de 690 a 750nm	Curran et al., 1995
PRI	$(R_{529} - R_{569}) / (R_{529} + R_{569})$	Gamon et al., 1997
SIPI	$(R_{803} - R_{467}) / (R_{803} + R_{681})$	Peñuelas et al., 1995
PSRI	$(R_{681} - R_{498}) / R_{752}$	Merzlyak et al., 1999
CRI	$(1/R_{508}) - (1/R_{701})$	Gitelson et al., 2002a
ARI1	$(1/R_{550}) / (1/R_{700})$	Gitelson et al., 2001
WBI	R_{905}/R_{973}	Peñuelas et al., 1997
NDWI	$(R_{854} - R_{1245}) / (R_{854} + R_{1245})$	Gao, 1996
MSI	R_{1598}/R_{823}	Hunt e Rock, 1989
NDII	$(R_{823} - R_{1649}) / (R_{823} + R_{1649})$	Hunt e Rock, 1989
EVI	$2,5 * ((R_{864} - R_{671}) / (R_{864} + 6 * R_{671} - 7,5 * R_{467} + 1))$	Huete et al., 2002
NDVI	$(R_{864} - R_{671}) / (R_{864} + R_{671})$	Rouse et al., 1973
VARI	$(R_{559} - R_{640}) / (R_{559} + R_{640} - R_{467})$	Gitelson et al., 2002b
VIg	$(R_{559} - R_{640}) / (R_{559} + R_{640})$	Gitelson et al., 2002b

* R representa a reflectância da banda mais próxima do sensor Hyperion ao comprimento de onda original das formulações.

Em sentido amplo, ARVI, ARI, EVI, NDVI, SR, CRI, VARI e VIg são índices relacionados aos pigmentos foliares (p.ex., clorofila e carotenóides). MSI, NDII, NDWI e WBI estão associados ao teor de água nas folhas. PSRI pode indicar condições de estresse na vegetação, enquanto o PRI e SIPI estão relacionados com a eficiência no uso da luz. RENDVI, REPI e VOG1 são índices designados para caracterizar variações espectrais associadas com a posição da borda vermelha, a qual pode ser afetada por variações no conteúdo de clorofila e água nas folhas.

2.4 Análises estatísticas

Foram extraídos os valores médios das imagens índices de vegetação nas áreas correspondentes às parcelas amostradas e georreferenciadas em campo, a partir de uma janela de 3x3 pixels. Posteriormente, foi obtida uma matriz dos coeficientes de correlação de Pearson entre os índices espectrais e a área basal das fitofisionomias. Os melhores resultados foram então utilizados para a construção de modelos de regressão simples e para a determinação dos índices mais sensíveis às variações estruturais da vegetação (maior R^2).

3. Resultados e Discussão

As áreas de campo limpo, por serem constituídas predominantemente por gramíneas e alguns arbustos, não tiveram nenhum indivíduo amostrado e, portanto, tiveram como área basal 0 m².ha⁻¹. A área basal média do campo sujo foi de 2,69 m².ha⁻¹, a do cerrado sentido restrito foi 6,30 m².ha⁻¹, do cerradão, 17,23 m².ha⁻¹ e, da mata seca, 17,60 m².ha⁻¹, corroborando as diferenças estruturais anteriormente citadas. Esses resultados são condizentes com os encontrados por Rezende et al. (2006), Paula et al. (1998), Costa e Araújo (2001), Barbosa (2003) e Imaña-Encinas et al. (2007).

A maioria dos coeficientes de correlação entre a área basal e os índices de vegetação foi significativa a 1% de probabilidade (Tabela 2), destacando-se os resultados para os índices VIg ($r = 0,92$), VARI ($r = 0,92$), ARVI ($r = 0,91$), RENDVI ($r = 0,90$) e EVI ($r = 0,90$).

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson entre os índices de vegetação e a área basal das fitofisionomias.

área basal	SR	ARVI	RENDVI	VOG1	REPI	PRI	SIPI	PSRI	CRI	ARII	WBI	NDWI	MSI	NDII	EVI	NDVI	VARI	VIg
área basal	0,92	0,91	0,90	0,92	-0,03	-0,48	-0,86	-0,89	0,76	-0,27	0,68	0,76	-0,74	0,78	0,90	0,87	0,92	0,92
SR	1,00	0,93	0,95	0,96	-0,02	-0,55	-0,85	-0,90	0,89	-0,15	0,79	0,83	-0,82	0,85	0,93	0,92	0,95	0,95
ARVI		1,00	0,98	0,98	-0,16	-0,50	-0,97	-0,98	0,83	-0,16	0,78	0,88	-0,90	0,92	0,99	0,98	0,98	0,97
RENDVI			1,00	0,97	-0,11	-0,60	-0,93	-0,97	0,87	-0,12	0,85	0,88	-0,89	0,91	0,98	0,98	0,97	0,97
VOG1				1,00	0,59	-0,52	-0,93	-0,97	0,89	-0,11	0,77	-0,91	-0,90	0,93	0,98	0,97	0,98	0,97
REPI					1,00	0,13	-0,03	0,06	0,01	0,07	-0,21	0,10	-0,12	0,10	-0,05	-0,03	-0,06	-0,05
PRI						1,00	0,47	0,46	-0,61	-0,14	-0,77	-0,59	0,58	-0,58	-0,49	-0,57	-0,45	-0,44
SIPI							1,00	0,97	-0,76	0,15	-0,74	-0,88	0,89	-0,91	-0,96	-0,95	-0,93	-0,91
PSRI								1,00	-0,82	0,15	-0,77	-0,89	0,90	-0,92	-0,98	-0,97	-0,98	-0,97
CRI									1,00	0,27	0,76	0,85	-0,84	0,86	0,83	0,89	0,84	0,84
ARII										1,00	-0,50	0,06	-0,08	0,04	-0,17	0,00	-0,20	-0,23
WBI											1,00	-0,85	-0,84	0,84	0,78	0,81	0,77	0,76
NDWI												1,00	-0,98	-0,98	0,87	0,91	0,87	0,85
MSI													1,00	-0,99	-0,88	-0,93	-0,86	-0,84
NDII														1,00	0,91	0,94	0,90	0,88
EVI															1,00	0,98	0,98	0,98
NDVI																1,00	0,96	0,95
VARI																	1,00	0,99
VIg																		1,00

* Destaque para as correlações significativas a 1% de probabilidade.

As relações de regressão que apresentaram coeficientes de determinação (R^2) maiores ou iguais a 0,75 são mostradas na Figura 2. Os índices que apresentaram melhores resultados foram: VOG1, VIg, SR, VARI, RENDVI, EVI, PSRI, NDVI e SIPI.

Observa-se que existe uma relação linear entre os índices espectrais analisados na Figura 2 e a área basal das fitofisionomias de Cerrado. Essa relação é positiva para os índices VOG 1, VIg, SR, VARI, RENDVI, EVI e NDVI, e negativa para os índices PSRI e SIPI.

Estimativas mais precisas da área basal foram obtidas com o índice VOG 1, o qual explora a região da borda vermelha (670-780 nm). A borda vermelha é o ponto de máxima inflexão entre a baixa reflectância no vermelho devido à absorção pela clorofila e a alta reflectância em torno de 800 nm associada com a estrutura interna e teor de água das folhas (Kumar et al., 2001). VIg apresentou desempenho semelhante ao VOG1, sendo também sensível às variações estruturais das fitofisionomias de Cerrado.

De uma forma geral, os índices que apresentaram melhores resultados na estimativa da área basal das fitofisionomias de Cerrado foram os relacionados aos pigmentos foliares (VIg, SR, VARI, EVI) e à borda vermelha (VOG1, RENDVI). Os resultados demonstraram que não somente o contraste entre a reflectância no visível e o infravermelho próximo é importante na estimativa de parâmetros estruturais da vegetação dos cerrados, mas também que o contraste entre os canais do visível (vermelho/verde) também é importante nessas estimativas.

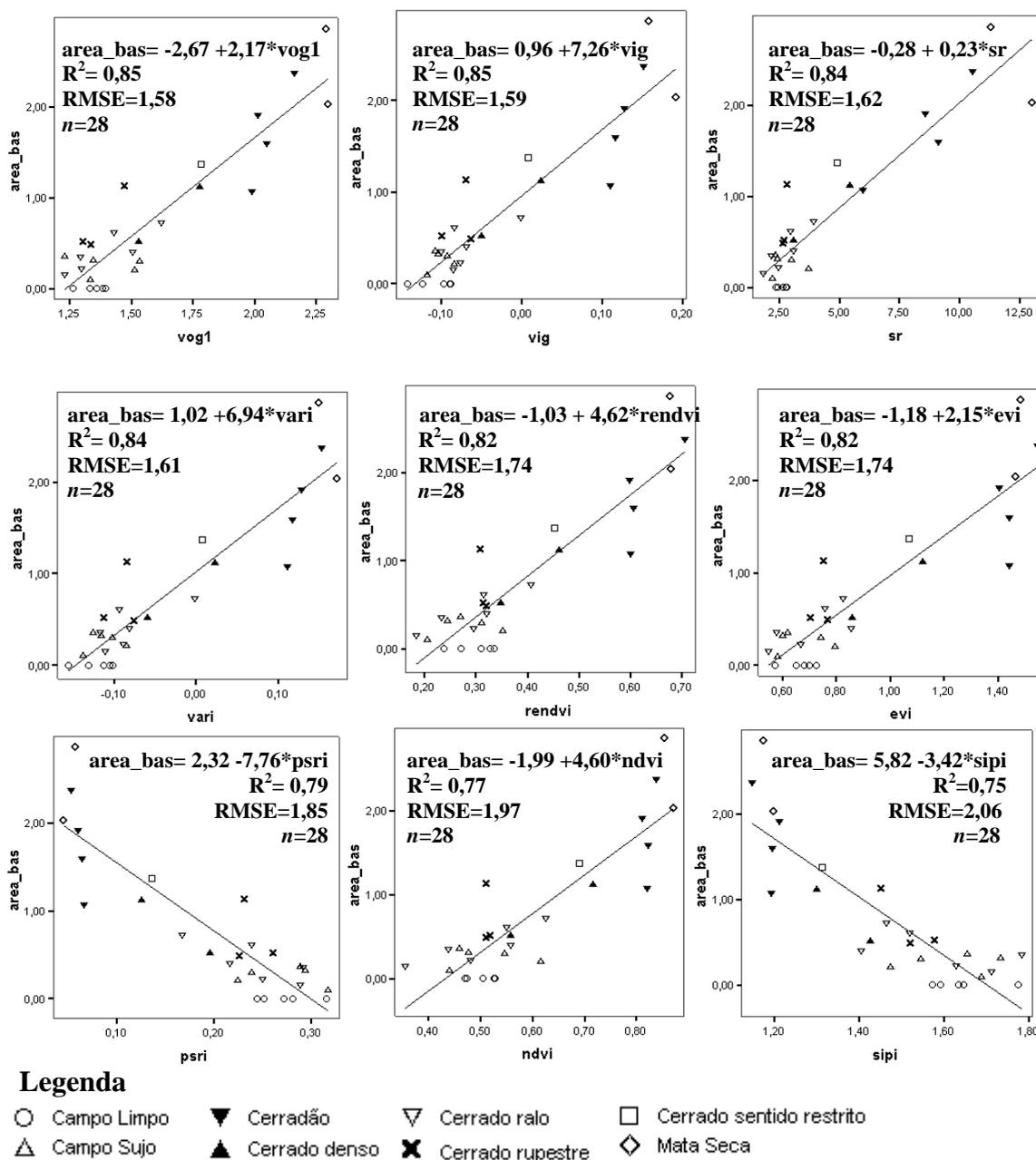


Figura 1: Relação entre os índices de vegetação e área basal, expressa em $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, das fitofisionomias

4. Considerações finais

Os resultados do presente estudo demonstraram que os índices de vegetação derivados do sensor Hyperion/EO-1 apresentaram excelentes resultados na estimativa de parâmetros estruturais das fitofisionomias de Cerrado. As melhores estimativas de área basal das fitofisionomias foram obtidas com o uso de índices de vegetação relacionados aos pigmentos foliares e à borda vermelha, destacando-se o desempenho dos índices VOG1, VIG, SR, VARI, RENDVI, EVI. Os intervalos espectrais utilizados em tais índices estão localizados entre o visível e o infravermelho próximo. Observou-se que, além do contraste entre os canais do vermelho e do infravermelho próximo, que constituem regiões espectrais tradicionalmente utilizadas no estudo da vegetação, o contraste entre os canais do vermelho e verde também foi sensível às variações estruturais das diferentes fitofisionomias.

Deve-se destacar que no presente estudo foi utilizada uma imagem adquirida no período seco, fazendo-se necessária a verificação da influência da sazonalidade e mudanças fenológicas da vegetação na sua resposta espectral e estimativas de parâmetros biofísicos via sensoriamento remoto hiperespectral em outros períodos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de pesquisa aos autores. Ao Alejandro Alvarado Peccinini, da Agência Goiana do Meio Ambiente, e ao José Ferreira Paixão, da Embrapa Cerrados, pelo auxílio no trabalho de campo.

Referências Bibliográficas:

Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 2, p.489-498, 2004.

Barbosa, R.I. Caracterização dos ecossistemas terrestres do Projeto de Assentamento Nova Amazônia (PANA)-Antiga Fazenda Bamerindus. Boa Vista: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2003. 40 p.

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

Costa, A.A.; Araújo, G.M. Comparação da vegetação arbórea de cerradão e de cerrado na Reserva do Panga, Uberlândia, Minas Gerais. **Acta Botânica Brasílica**, v. 15, n. 1, p. 63-72, 2001.

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.

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, 492-501, 1997.

Gao, B. 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.; Merzlyak, M.N.; Chivkunova, O.B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. **Photochemistry and Photobiology**, v. 74, n.1, p.38-45, 2001.

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, p. 195-213 , 2002.

Hunt Jr., E.R.; Rock, B.N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n.1, p. 43-54, 1989.

Imaño-Encinas, J.; Macedo, L.A.; Paula, J.E. Florística e fitossociologia de um trecho da Floresta Estacional Semidecidual na área do Ecomuseu do Cerrado, em Pirenópolis-Goiás. **Cerne**, v. 13, n. 3, p. 308-320, 2007.

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.

Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S., Skidmore, A. Imaging spectrometry and vegetation science. In: van der Meer, F.D., de Jong, S. (Org.). **Imaging Spectrometry**. Basic principles and prospective applications. Netherlands: Kluwer, 2001. 403 p.

Lee, K.S.; Cohen, W.B.; Kennedy, R.E.; Maier-sperger, T.K.; Gower, S.T. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n.3, p. 508-520, 2004.

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.

Paula, J.E.; Imaño-Encinas, J.; Sugimoto, N. Levantamento quantitativo em três hectares de vegetação de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 5, p. 613-620, 1998.

Peñuelas, j.; Baret, f.; Filella, i.. Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n.2, p. 221-230, 1995.

Peñuelas, 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.

Pu, R.; Yu, Q.; Gong, P.; Biging, G.S. EO-1 Hyperion, ALI and Landsat ETM+ data comparison for estimating forest crown closure and leaf area index. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p.457-474, 2005.

Rezende, A.V.; Vale, A.T.; Sanquetta, C.R.; Figueiredo Filho, A.; Felfili, J.M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, v. 71, n. 50, p. 65-76, 2006.

Ribeiro, J.F.; Walter, T.M.B. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano, S.M; Almeida, S.P. (Org.). **Cerrado: Ambiente e Flora**. Brasília: Embrapa, 1998, p. 89-152.

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, n. 3, [1973], United States. **Proceeding...**United States: NASA. p. 309-317.

Schlerf, M.; Atzberger, C.; Hill, J. Remote Sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n.2, p. 177-194, 2005.

Thenkabail, P.S.; Enclona, E.A.; Ashton, M.S.; Legg, C.; Dieu, M.J.D. Hyperion, IKONOS, ALI and ETM+ sensors in the study of African rainforest. *Remote Sensing of Environment*, v. 90, n.1, p.23-43, 2004.

Tisot, D.A.; Formaggio, A.R.; Galvão, L.S.; Rennó, C.D. Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção espectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 439-446. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.19.44>>. Acesso em: 07 ago. 2007.

Vogelmann, J.E., B.N. Rock, and D.M. Moss. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n.8, p.1563-1575, 1993.