

Avaliação da Influência da geometria de iluminação e visada na determinação do EVI de florestas tropicais a partir de dados Hyperion/EO-1

Lênio Soares Galvão
João Roberto dos Santos
Fábio Marcelo Breunig
Yhasmin Mendes de Moura

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lenio, jroberto, breunig, yhasmin}@dsr.inpe.br

Abstract. This paper describes view-illumination effects on the Enhanced Vegetation Index (EVI) calculated from 19 Hyperion/Earth Observing One (EO-1) images obtained in the 2005 dry season of the Seasonal Evergreen Forest. The study area is located in the Brazilian Mato Grosso state. The images were acquired at nadir and off-nadir viewing in the backscattering and forward scattering directions. A two-endmember mixture model was used to investigate illumination effects on the EVI. Results showed that the EVI presented higher values for extreme viewing in the backscattering than in the forward scattering direction. For nadir Hyperion data, EVI was sensible to solar illumination presenting a high correlation coefficient ($r = -0.93$) with shade-fraction values derived from the mixture model. EVI followed the general pattern of the reflectance of the near-infrared band presenting increasingly high values towards the end of the dry season due to decreasing solar zenith angle.

Palavras-chave: hyperspectral, remote sensing, vegetation index, tropical forest, hiperespectral, sensoriamento remoto, índice de vegetação, floresta tropical.

1. Introdução

Variações no índice de vegetação EVI (*Enhanced Vegetation Index*), detectadas a partir de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)/Terra na estação seca de florestas tropicais, foram recentemente reportadas na literatura (Huete et al., 2006; Saleska et al., 2007). As prováveis causas do denominado “*green-up*”, expresso por um aumento do EVI do início para o final da estação seca, são contraditórias. Estas causas são justificadas desde nova produção de folhas no topo do dossel até modificações no Índice de Área Foliar (IAF) reportadas no produto MODIS correspondente (Asner e Alencar, 2010). Elas incluem também problemas associados à precisão da correção atmosférica (Samanta et al., 2010).

Uma melhor compreensão da variabilidade do EVI na estação seca é fundamental para caracterizar a resistência da floresta tropical para um cenário futuro de secas mais intensas e frequentes devido às mudanças climáticas (Malhi et al., 2008). Neste contexto, a análise de dados hiperespectrais do sensor Hyperion/Earth Observing-One (EO-1) pode contribuir para uma melhor compreensão dos padrões observados com o MODIS, minimizando incertezas produzidas pelos efeitos da atmosfera ou pela geometria de iluminação e visada.

O sensor Hyperion adquire imagens em 196 bandas calibradas (10 nm de largura) na faixa de 426 a 2395 nm. A resolução espacial é de 30 metros e a faixa de imageamento é de 7,7 km (Pearlman et al., 2003). A resolução temporal de 16 dias pode ser reduzida por apontamento lateral, o que permite a aquisição de várias imagens ao longo de um mês.

O objetivo desse estudo é analisar uma série temporal do índice de vegetação EVI, calculado sobre floresta tropical do Estado de Mato Grosso (MT), a partir de 19 imagens do Hyperion adquiridas na estação seca de 2005. As imagens foram obtidas de Maio a Outubro de 2005 com visadas ao nadir e fora-do-nadir.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de Estudo

A área de estudo (7,6 x 50 km) está localizada no município de Querência no Mato Grosso (MT) na zona de transição entre o domínio dos cerrados e o da floresta tropical (Figura 1). Ela inclui fragmentos preservados de Floresta Estacional Perenifólia, que foram imageados pelo Hyperion em 2005 e que aparecem em cor vermelha na composição colorida falsa-cor da Figura 1.

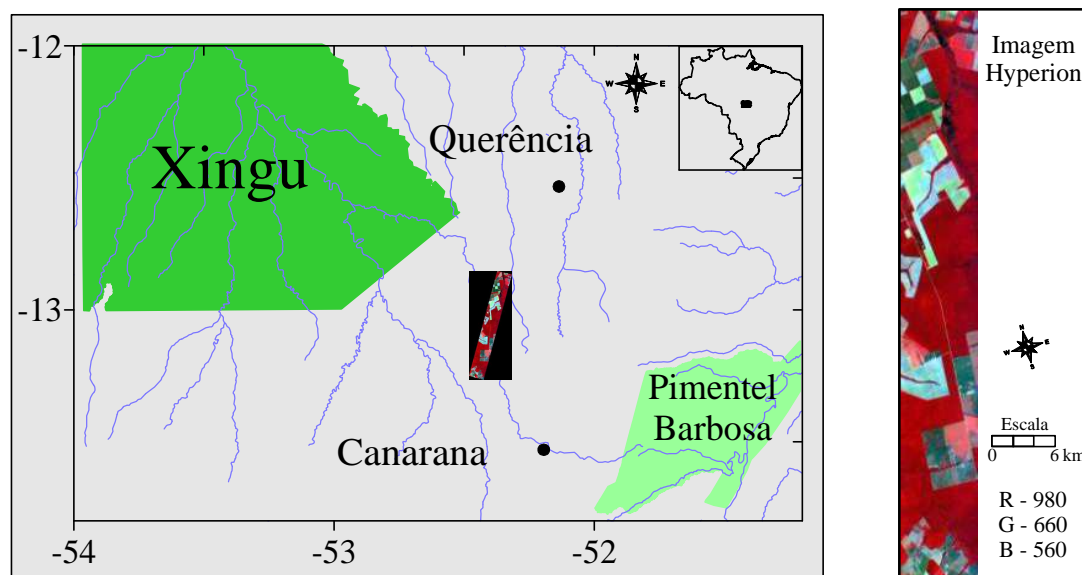


Figura 1. Localização da área de estudo (retângulo) no município de Querência (MT) entre o Parque Nacional do Xingu e a Reserva Indígena de Pimentel Barbosa. No canto direito, uma composição colorida falsa-cor com as bandas do Hyperion posicionadas em 983 nm (R), 660 nm (G) e 560 nm (B). A imagem é de 11 de junho de 2005.

A estação seca na área de estudo normalmente dura cinco meses (maio a setembro). Em 2005, ano em que as imagens Hyperion foram obtidas, os dados de pluviômetros locais mostraram que a precipitação foi comparativamente menor em abril (81 mm), maior em setembro (149 mm) e menor novamente em outubro (99 mm), quando comparada com a precipitação de períodos secos mais típicos ou menos intensos. De junho a agosto, a precipitação na maioria dos anos é normalmente zero ou inferior a 10 mm, o que ocorreu também em 2005.

Atividades de campo foram executadas em agosto de 2010 para fins de inventário florestal em 20 transectos (100 x 25 metros). Todas as árvores com valores de diâmetro à altura do peito (DBH) maiores que 10 cm foram mensuradas, inclusive com medições de altura total e comercial, geoposicionadas nos transectos e identificadas botanicamente.

2.2. Processamento das Imagens Hyperion

Utilizou-se 19 imagens Hyperion, obtidas na estação seca de 2005, com ângulo zenital solar variando de 49° (Junho) a 33° (Setembro) (Tabela 1). As aquisições de imagens foram feitas ao nadir, definido aqui como menos que $\leq 10^\circ$ de ângulo de visada, e fora do nadir, nas direções de espalhamento frontal (ângulos positivos) e retro-espalhamento (ângulos negativos).

Um algoritmo para reduzir “*striping*” foi aplicado sobre as imagens, substituindo os valores das colunas com resposta espectral anômala por valores espectrais médios das colunas adjacentes (Goodenough et al., 2003). Os valores de radiância Hyperion das 196 bandas foram convertidos em imagens reflectância de superfície usando o FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*). O algoritmo se baseia no modelo de transferência radiativa MODTRAN4 para remover efeitos de espalhamento e absorção atmosférica (Felde et al., 2003; ITT, 2009). A quantidade de aerossóis e a visibilidade média da cena foram determinadas usando o método K-T (Kaufman et al., 1997). A visibilidade variou de 12 a 132 km (Tabela 1). A quantidade de vapor d’água foi estimada pixel-a-pixel com base na feição espectral de 1130 nm. Um procedimento para correção dos efeitos de adjacência foi aplicado sobre os dados. Os parâmetros do modelo incluíram uma atmosfera tropical com um modelo de aerossol rural. As bandas do Hyperion posicionadas em torno de 1400 nm e 1900 nm não foram consideradas devido à forte absorção atmosférica por vapor d’água.

2.3. Análise dos dados

O EVI é calculado pela equação abaixo:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue} + L} \quad (1)$$

onde ρ_x é a reflectância de superfície atmosféricamente corrigida; L é o fator de correção do substrato; C_1 e C_2 são os coeficientes de aerossóis; e G é um fator de escala. Os coeficientes adotados são: $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$, e $G = 2,5$ (Solano et al., 2010).

Para o cálculo do EVI, foram utilizadas as bandas do Hyperion em 864 nm, 651 nm e 467 nm. Para investigar os efeitos de iluminação e visada sobre o EVI, foram plotados os índices de vegetação em função do ângulo zenital solar e de visada ($n = 500$ pixels), considerando também a direção de aquisição da imagem (retro-espalhamento ou espalhamento frontal). O EVI foi correlacionado com as bandas usadas para sua determinação.

Finalmente, para analisar a influência solar sobre a determinação do EVI, foi gerado um modelo linear de mistura espectral (Roberts et al., 1997) de dois componentes (vegetação verde e sombra). Os valores da fração sombra foram posteriormente correlacionados com os do EVI. A seleção dos membros de referência do modelo de mistura foi feita com o uso sequencial das técnicas *minimum noise fraction* (MNF), *pixel purity index* (PPI) e visualizador n -dimensional (Boardman, 1993). Dos pixels candidatos a membros de referência de cada imagem, selecionou-se aquele com maior reflectância no intervalo espectral estudado como membro de referência.

Tabela 1 – Aquisição de imagens Hyperion na estação seca de 2005. Ângulos zenitais positivos e negativos indicam as direções de espalhamento frontal e retro-espalhamento, respectivamente. A visibilidade da cena, calculada do método K-T, está indicada na última coluna.

Data (2005)	Ângulo Azimutal Solar (°)	Ângulo Zenital Solar (°)	Ângulo Zenital de Visada (°)	Geometria de Visada	Visibilidade (km)
19/05	46	47	-27	Off-nadir	15
02/06	41	47	-4	Nadir	132
04/06	44	48	-27	Off-nadir	51
11/06	42	48	-17	Off-nadir	78
20/06	44	49	-28	Off-nadir	24
27/06	43	49	-17	Off-nadir	69
06/07	45	49	-27	Off-nadir	34
11/07	42	47	+9	Nadir	98
13/07	45	48	-16	Off-nadir	77
22/07	48	49	-27	Off-nadir	36
27/07	45	45	+9	Nadir	116
03/08	45	43	21	Off-nadir	123
07/08	52	46	-27	Off-nadir	40
12/08	49	42	+9	Nadir	35
19/08	50	39	21	Off-nadir	56
23/08	57	43	-27	Off-nadir	18
28/08	55	38	+9	Nadir	22
04/09	56	35	21	Off-nadir	12
13/09	62	33	+9	Nadir	44

3. Resultados e discussão

Foi mensurado nos 20 transectos um total de 2749 árvores representando a Floresta Estacional Perenifólia que ocorre nessa região de estudo. Predominaram árvores com altura entre 10 e 20 metros, indicando nessa tipologia florestal um estrato superior com dossel relativamente homogêneo, com ocorrência de aberturas no dossel da ordem de $15,0 \pm 4,8\%$. A análise da composição florística indicou a predominância das seguintes famílias: Myrtaceae, Burseraceae, Annonaceae, Rubiaceae, Proteaceae, Eleocarpaceae, Sapindaceae and Bignoniaceae. Elas compreenderam 80% dos indivíduos botanicamente identificados.

O EVI mostrou uma forte correlação positiva com a banda do infravermelho próximo ($r = +0,88$), sendo não estatisticamente correlacionado com as bandas do azul e vermelho. Resultante deste comportamento, o EVI seguiu o padrão geral da banda do infravermelho próximo, cuja reflectância aumentou da visada de espalhamento frontal (predomínio de sombras para o sensor) para a de retro-espalhamento (componentes iluminados do dossel vistos pelo sensor).

Portanto, conforme mostrado na Figura 2, maiores valores de EVI foram observados na direção de retro-espalhamento e menores na direção de espalhamento frontal. Na direção de retro-espalhamento, maiores valores de EVI foram também observados com visada extrema de -27° . Para o EVI calculado somente com dados Hyperion obtidos ao nadir (círculos pretos na Figura 2), houve um aumento no índice do início para o final da estação seca, de forma

concordante à observada por Huete et al. (2006) e Saleska et al. (2007) com dados MODIS. Este comportamento do EVI, associado a um aumento no índice de área foliar (IAF) no produto MOD15A2 (MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km SIN Grid V005), do início para o final da estação seca na Amazônia (Myneni et al., 2007), é conhecido como o efeito “green-up” da floresta.

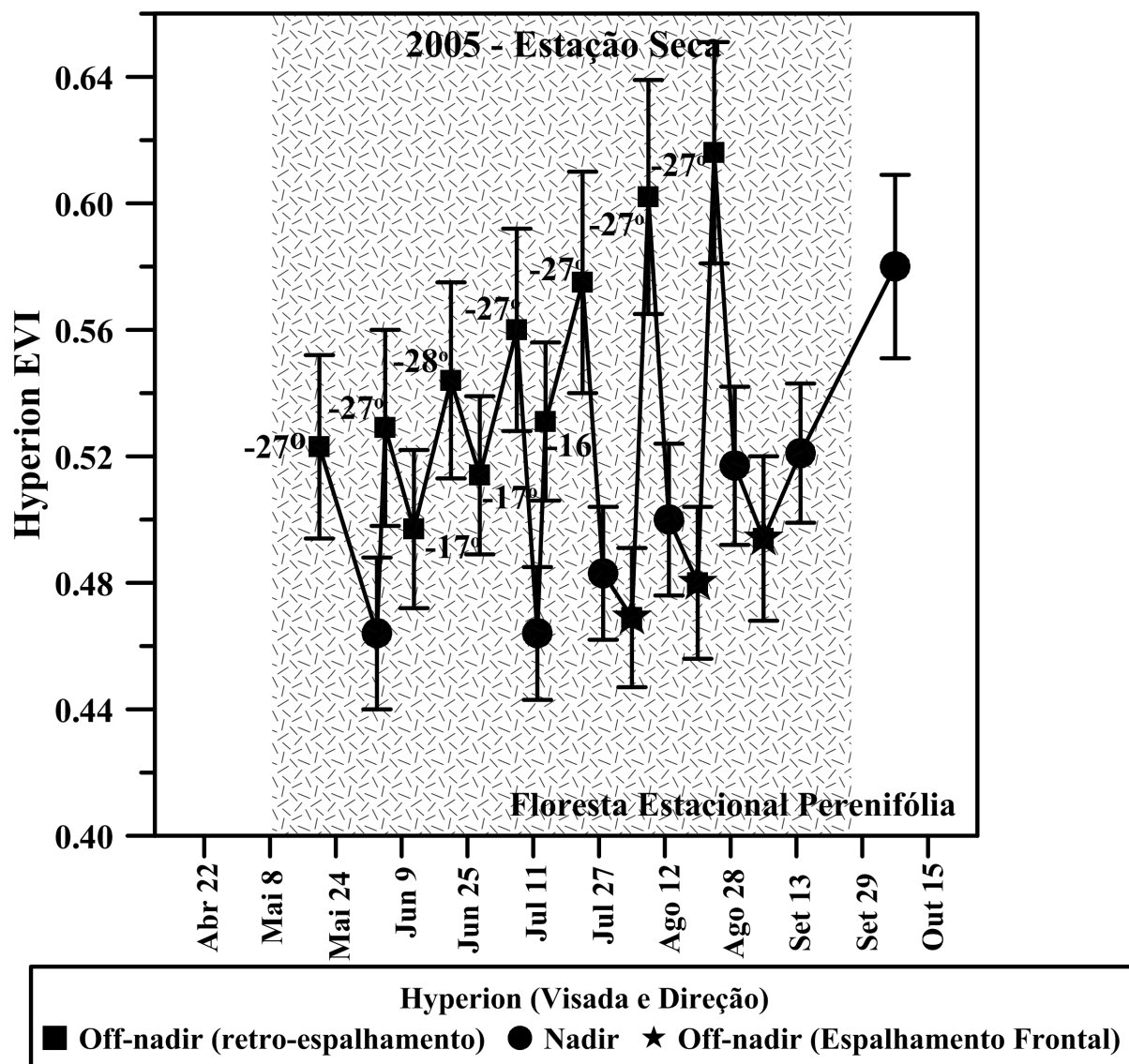


Figura 2 – Efeitos direcionais e de ângulo de visada sobre o cálculo do EVI a partir de dados Hyperion obtidos na estação seca de 2005 sobre Floresta Estacional Perenifolia.

As causas do efeito “green-up” ainda são contraditórias na literatura. Na Figura 3, a influência da geometria de visada é clara sobre a determinação do EVI na área de estudo. No entanto, na estação seca, os dados obtidos pelo MODIS são normalmente oriundos de uma visada mais próxima do nadir pela baixa frequência de cobertura de nuvens.

Por outro lado, o ângulo zenital solar diminui do início para o final da estação seca. Para investigar uma possível influência da iluminação solar sobre a determinação do EVI na área de estudo, foram correlacionados valores de EVI com aqueles correspondentes de fração-sombra do modelo de mistura espectral (Figura 3). Usando as imagens do Hyperion obtidas ao nadir, no início (02 de junho; ângulo zenital solar de 47°) e no final (13 de setembro;

ângulo zenital solar de 33° da estação seca, obteve-se um coeficiente de correlação (r) de $-0,93$ (Figura 3). De junho para setembro, a fração-sombra diminuiu e o EVI aumentou, seguindo o padrão geral de comportamento da reflectância da banda do infravermelho próximo, que foi altamente correlacionada com o EVI.

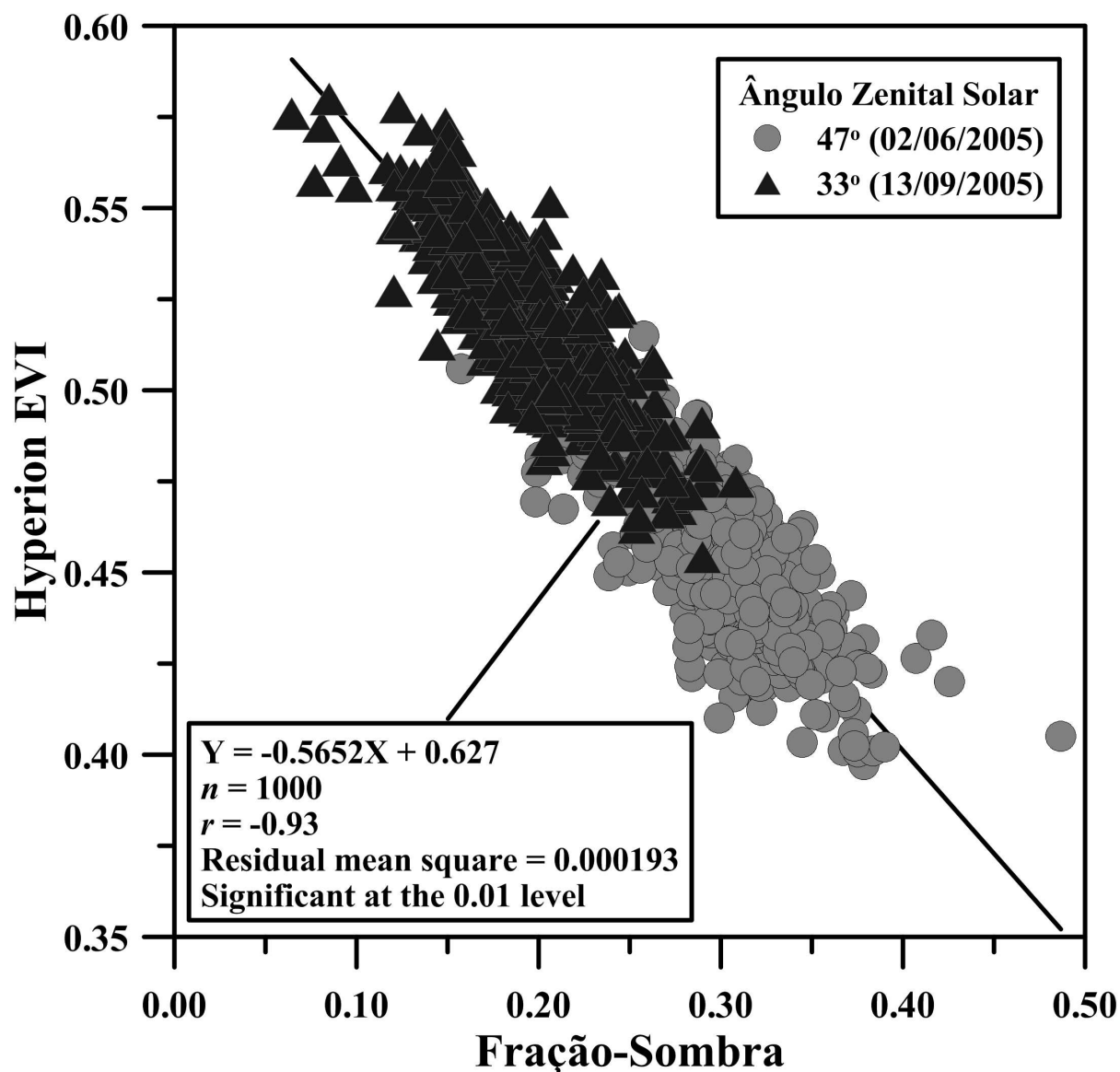


Figura 3 – Relação entre valores de EVI e de fração-sombra do modelo linear de mistura espectral para duas imagens do Hyperion adquiridas com diferentes ângulos zenitais solar no início e no final da estação seca.

4. Conclusões

Os efeitos de iluminação e visada tiveram uma forte influência na determinação do EVI, cujos valores foram maiores para imagens com visada fora do nadir na direção do retro-espalhamento.

Para imagens do Hyperion adquiridas ao nadir, o EVI aumentou do início para o final da estação seca em função da diminuição do ângulo zenital solar e da forte correlação deste índice com a banda do infravermelho próximo usada para o seu cômputo.

Mais estudos são necessários para investigar a extensão destes efeitos para o ambiente Amazônico e para estudar a contribuição de outros fatores como a possível produção de folhas novas no topo do dossel em determinado período sazonal.

Agradecimentos

Ao Grupo André Maggi, especialmente para Wagner de Ré, por apoiar as atividades de campo. Agradecimentos também à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; projeto número 08/11499-8), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Os autores também agradecem ao Sr. José Ferreira Paixão (EMBRAPA Cerrados) pelo apoio na identificação botânica.

Referências

Asner, G.P.; Alencar, A. Drought impacts on the Amazon forest: the remote sensing perspective. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 569–578, 2010.

Boardman, J. W. Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. In: JPL Airborne Geoscience Workshop, 25-29 October 1993. **Proceedings...** Pasadena, JPL Publication 93-26, pp. 11-14, 1993.

Felde, G. W.; Anderson, G. P.; Adler-Golden, S. M.; Matthew, N. W.; Berk, A. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toulouse, 21–25 July. **Proceedings...** 2003, pp. 90–92, 2003.

Goodenough, D. G.; Dyk, A.; Niemann, K. 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**, v. 41, n. 6, 1321-1331, 2003.

Huete, A. R.; Didan, K.; Shimabukuro, Y. E.; Ratana, P.; Saleska, S. R.; Hutya, L. R.; Yang, W.; Nemani, R. R.; Myneni, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L06405, 2006.

ITT Visual Information Solutions. Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH user's guide. Version 4.7. Boulder, CO: ITT Visual Information Solutions, 2009.

Kaufman, Y. J.; Tanré, D.; Remer, L. A.; Vermote, E. F.; Chu, A.; Holben, B. N. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research**, 102, p. 17051-17067, 1997.

Malhi, Y.; Roberts, J. T.; Betts, R. A.; Killeen, T. J.; Li, W. H.; Nobre, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, 319, p. 169-172, 2008.

Myneni, R. B.; Yanga, W.; Nemani, R. R.; Huete, A. R.; Dickinson, R. E.; Knyazikhin, Y.; Didan, K.; Fu, R.; Juárez, R. I. N.; Saatchi, S. S.; Hashimoto, H.; Ichii, K.; Shabanov, N. V.; Tan, B.; Ratana, P.; Privette, J. L.; Morisette, J. T.; Vermote, E. F.; Roy, D. P.; Wolfe, R. E.; Friedl, M. A.; Running, S. W.; Votava, P.; El-Saleous, N.; Devadiga, S.; Su, Y.; Salomonson, V. V. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 104, n. 12, p. 4820–4823, 2007.

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**, v. 41, n. 6, p. 1160-1173, 2003.

Roberts, D. A.; Green, R. O.; Adams, J. B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 223-240, 1997.

Saleska, S. R.; Didan, K.; Huete, A. R.; Rocha, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, p. 612, 2007.

Samanta, A.; Ganguly, S.; Hashimoto, H.; Devadiga, S.; Vermote, E.; Knyazikhin, Y.; Nemami, R. R.; Myneni, R. B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 37, L05401, 2010.

Solano, R.; Didan, K.; Jacobson, A.; Huete, A. MODIS vegetation indices (MOD13) C5 – User's guide. The University of Arizona. Tucson: 38 pp, 2010.