

Anisotropia de índices hiperespectrais em florestas tropicais

Lênio Soares Galvão¹
Fábio Marcelo Breunig²
João Roberto dos Santos¹
Yhasmin Mendes de Moura¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto,
Av. dos Astronautas, 1758, Bairro Jardim da Granja
Caixa Postal 515 – 12246-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
{lenio, jroberto, yhasmin}@dsr.inpe.br

² Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Departamento de Engenharia Florestal
Linha Sete de Setembro s/n, sala 59, bloco de apoio 4
98400-000, Frederico Westphalen – RS, Brasil
{breunig}@ufsm.br

Abstract. We used a set of 19 nadir and off-nadir Hyperion/Earth Observing One (EO-1) images, collected over seasonal semi-deciduous forest in the 2005 dry season, to study the anisotropy of 10 narrow-band vegetation indices (VIs) in response to changes in view-illumination conditions. Ten VIs were selected to represent vegetation structure, canopy biochemistry and plant physiology: 1) Enhanced Vegetation Index (EVI); 2) Normalized Difference Infrared Index (NDII); 3) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); 4) Normalized Difference Water Index (NDWI); 5) Photochemical Reflectance Index (PRI); 6) Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI); 7) Structure Insensitive Pigment Index (SIPI); 8) Visible Atmospherically Resistant Index (VARI); 9) Visible Green Index (VIG); and 10) Vogelmann Red Edge Index (VOG). Data analysis was also supported by the PROSAIL radiative transfer model to simulate the spectral response of the seasonal semi-deciduous forest in the forward scattering and backscattering view directions and with different solar zenith angles. Hyperion and PROSAIL results showed that the EVI and PRI were the two more anisotropic VIs, whereas the NDVI, SIPI and the VOG were comparatively less sensitive to view-illumination effects. Results were compared with previous studies over the same study area using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS/Terra) and the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR/Terra). All of these studies demonstrated the importance of taking into account view-illumination effects when analyzing temporal series of VIs collected over tropical forests by large field-of-view (FOV) sensors or by imaging spectrometers with pointing capability.

Palavras-chave: hiperespectral remote sensing, vegetation indices, Hyperion, PROSAIL, sensoriamento remoto hiperespectral, Amazônia.

1. Introdução

Índices hiperespectrais de vegetação, calculados com bandas estreitas de espectrômetros imageadores, podem ser utilizados para medir propriedades da cobertura vegetal associadas com sua estrutura (p.ex., biomassa e índice de área foliar), com a bioquímica do dossel (p.ex., pigmentos e umidade) e com a fisiologia das plantas (p.ex., estresse hídrico) (Roberts et al., 2011). Entretanto, pelo fato da vegetação não apresentar um comportamento Lambertiano, refletindo diferentes quantidades de energia de acordo com a posição em que é vista e/ou iluminada, estes índices são afetados pela geometria de iluminação e de visada. A magnitude destes efeitos depende de vários fatores como: o arranjo e a composição do dossel; o campo de visada dos sensores; a capacidade de apontamento para aquisição de dados fora do nadir; a localização geográfica da área de estudo; as variações topográficas locais; o horário e o mês de aquisição dos dados pelos sensores (Galvão et al., 2013). Conforme discutido por Verrelst et al. (2008), dependendo de sua formulação matemática, alguns índices de vegetação são

extremamente sensíveis às variações do ângulo zenital de visada (AZV) e do ângulo zenital solar (AZS).

O sensor Hyperion, a bordo do satélite Earth Observing One (EO-1), é um imageador hiperespectral tipo *pushbroom*, que adquire dados em 196 bandas radiometricamente calibradas (10 nm de largura) na faixa espectral de 400 a 2400 nm (Pearlman et al., 2003). A resolução espacial é 30 metros e a faixa de imageamento é estreita (7,7 km). A resolução temporal é de 16 dias, mas o tempo de revisita de cena pode ser diminuído por apontamento transversal à órbita do satélite. Desta forma, o sensor Hyperion pode obter imagens com diferentes ângulos de visada (nadir e fora do nadir) e em diferentes direções de imageamento (espalhamento frontal e retroespalhamento). Apesar da sua baixa relação sinal-ruído (SNR), diversos índices hiperespectrais de vegetação podem ser calculados a partir do Hyperion.

O objetivo deste trabalho foi estudar a anisotropia de 10 índices hiperespectrais de vegetação, usando 19 imagens Hyperion obtidas com configurações distintas de AZV e de direção de imageamento. Os 10 índices estudados foram: (1) Enhanced Vegetation Index (EVI); (2) Normalized Difference Infrared Index (NDII); (3) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); (4) Normalized Difference Water Index (NDWI); (5) Photochemical Reflectance Index (PRI); (6) Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI); (7) Structure Insensitive Pigment Index (SIPI); (8) Visible Atmospherically Resistant Index (VARI); (9) Visible Green Index (VIG); e (10) Vogelmann Red Edge Index (VOG). Os índices de vegetação foram selecionados como indicadores da estrutura da vegetação, da bioquímica do dossel e da fisiologia das plantas.

Além da análise desses índices de vegetação a partir das 19 imagens Hyperion, tendo como tipologia em estudo uma área de floresta estacional semidecidual, foi também simulada a reflectância espectral deste tipo de vegetação usando o modelo de transferência radiativa PROSAIL (Jacquemoud et al., 2009) para comparação de informações. Em síntese, o objetivo foi verificar a consistência do comportamento dos índices de vegetação derivados do Hyperion e do PROSAIL, em função de variações nas condições de iluminação e visada.

As implicações do presente estudo sobre o comportamento intra-anual e interanual dos índices de vegetação na estação seca de florestas tropicais, observado em investigações prévias na região, como as feitas por Galvão et al. (2011) e por Moura et al. (2012a) usando outros sensores, são discutidas.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo está localizada no município de Querência (MT) (7,6×50 km; coordenadas centrais = S13°12'22" e W52°20'59"), apresentando um clima do tipo "Aw" na classificação de Köppen, com uma estação seca bem definida (maio a setembro). A precipitação é normalmente inferior a 10 mm nos meses de junho, julho e agosto. Fragmentos preservados de floresta estacional semidecidual compõem a tipologia sob investigação, cuja descrição florístico-estrutural pode ser vista em Moura (2012b).

Na estação seca de 2005, o Hyperion/EO-1 adquiriu 19 imagens sobre esta área de estudo no Mato Grosso, sendo seis na visada ao nadir e o restante com AZV superior a 10°. Na visada fora do nadir, foram obtidas 10 imagens na direção de retroespalhamento e três imagens na direção de espalhamento frontal. Detalhes sobre a obtenção dos dados, incluindo as variações no AZV e no AZS podem ser vistos em Galvão et al. (2011; 2013). Nesta latitude, a amplitude de variação do AZS entre o início e o final da estação seca é de aproximadamente 16°, considerando o horário de obtenção das imagens Hyperion.

O pré-processamento das imagens Hyperion incluiu o uso de um algoritmo para remoção de *stripes* e de pixels com resposta espectral anormal. Os dados de radiância foram convertidos para reflectância de superfície usando o *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), uma abordagem que se baseia no MODTRAN4 (Felde et

al., 2003; ITT Visual Information Solutions, 2009). A fase de pós-processamento incluiu a aplicação de um algoritmo de média móvel para a remoção de feições espúrias resultantes do procedimento de correção atmosférica e da baixa relação sinal/ruído (SNR) do sensor. Do total de 196 bandas radiometricamente calibradas do Hyperion, abrangendo a faixa espectral de 427 a 2395 nm, foram excluídas da presente análise um total de 42 bandas posicionadas em torno das duas principais faixas espectrais de absorção por vapor d'água em 1400 nm e 1900 nm, cujos efeitos não podem ser removidos mesmo após a correção atmosférica.

As equações utilizadas para o cálculo dos 10 índices hiperespectrais de vegetação são apresentadas na Tabela 1. Os índices foram calculados tanto a partir das imagens Hyperion, quanto da modelagem PROSAIL. Nas imagens Hyperion, foram selecionados aleatoriamente 500 pixels sobre floresta estacional semidecidual, cuja posição foi mantida constante entre as diferentes datas. Para cada índice, foram calculados valores médios e de desvio-padrão. Os índices de vegetação foram analisados em função dos valores de AZV (de fato, ângulo de apontamento do Hyperion) e de AZS fornecidos nos metadados do Hyperion.

O PROSAIL integra o modelo de transferência radiativa de folhas PROSPECT com o modelo de transferência radiativa de dosséis SAIL. O PROSAIL gera dados de alta resolução espectral que podem ser usados para representar dosséis sombreados e iluminados na faixa espectral de 400 a 2500 nm. O modelo permite a simulação da geometria de aquisição de dados sob diferentes configurações de AZV e AZS. Os parâmetros de entrada do modelo PROSAIL no presente estudo são apresentados na Tabela 2. Foram feitas simulações de AZV de -40° a $+40^\circ$. As simulações de AZS variaram de 0° a 45° . Após a simulação dos espectros de reflectância, foram calculados os índices hiperespectrais de vegetação usando as equações da Tabela 1. Os resultados foram normalizados para possibilitar a comparação dos índices em uma mesma escala. Para avaliar a anisotropia dos índices hiperespectrais de vegetação, quanto ao AZV, os resultados do PROSAIL foram normalizados em relação ao nadir usando um AZS fixo de 30° . Em um passo subsequente, para avaliar os efeitos de iluminação solar, foram utilizados somente os dados simulados de AZV ao nadir, normalizando os resultados para um AZS de 45° . Quanto mais discrepantes os resultados em relação aos valores fixos de AZV ou AZS, mais anisotrópicos são os índices hiperespectrais de vegetação. Em ambos os casos, o valor de índice de área foliar (IAF) foi mantido constante em $5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, um valor compatível com o observado no produto IAF do MODIS na área de estudo.

Tabela 1. Índices hiperespectrais de vegetação usados no presente estudo. ρ_n é a reflectância em um determinado comprimento de onda (n em nanômetros).

Índice	Fórmula	Referência
EVI	$2.5 * ((\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + 6 * \rho_{671} - 7.5 * \rho_{467} + 1))$	Huete et al. (2002)
NDII	$(\rho_{823} - \rho_{1649}) / (\rho_{823} + \rho_{1649})$	Hunt and Rock (1989)
NDVI	$(\rho_{864} - \rho_{671}) / (\rho_{864} + \rho_{671})$	Rouse et al. (1973)
NDWI	$(\rho_{854} - \rho_{1245}) / (\rho_{854} + \rho_{1245})$	Gao (1996)
PRI	$(\rho_{529} - \rho_{569}) / (\rho_{529} + \rho_{569})$	Gamon et al. (1997)
RENDVI	$(\rho_{752} - \rho_{701}) / (\rho_{752} + \rho_{701})$	Gitelson et al. (1996)
SIPI	$(\rho_{803} - \rho_{467}) / (\rho_{803} + \rho_{681})$	Penuelas et al. (1995)
VARI	$(\rho_{559} - \rho_{640}) / (\rho_{559} + \rho_{640} - \rho_{467})$	Gitelson et al. (2002)
VIg	$(\rho_{559} - \rho_{640}) / (\rho_{559} + \rho_{640})$	Gitelson et al. (2002)
VOG	ρ_{742} / ρ_{722}	Vogelmann et al. (1993)

Tabela 2. Valores de referência utilizados na modelagem PROSAIL.

Variável	Descrição	Unidade	Valor
C_{ab}	Conteúdo de clorofila a + b	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	55
C_{ar}	Conteúdo de Carotenoide	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	10
C_{Brown}	Pigmentos marrons da folha	$\mu\text{g.cm}^{-2}$	0,1
C_w	Espessura equivalente de água das folhas	cm	0,02
C_m	Conteúdo de matéria seca das folhas	g.cm^{-2}	0,009
N	Estrutura interna das folhas	-	1,5
IAF	Índice de Área Foliar	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$	5
LAD	Distribuição angular média das folhas	grau	50
AZS	Ângulo zenital solar	grau	0 a 45
AZV	Ângulo zenital de visada	grau	-40 a +40
AAR	Ângulo azimutal relativo	grau	0

3. Resultados e Discussão

Quando calculados a partir dos dados Hyperion, alguns índices de vegetação mostraram clara dependência em relação ao AZV e à direção de imageamento (retroespalhamento ou espalhamento frontal). No caso do EVI, devido à grande influência da reflectância da banda do infravermelho próximo no cálculo do índice (Galvão et al., 2011), seus valores aumentaram da direção do espalhamento frontal para a de retroespalhamento e variaram com a magnitude do AZV (Figura 1). Um comportamento espectral contrário foi observado para os outros índices investigados. Na visada ao nadir (círculos na Figura 1), o EVI aumentou do início para o final da estação seca com a diminuição do AZS, devido à redução dos efeitos de sombreamento dos dosséis.

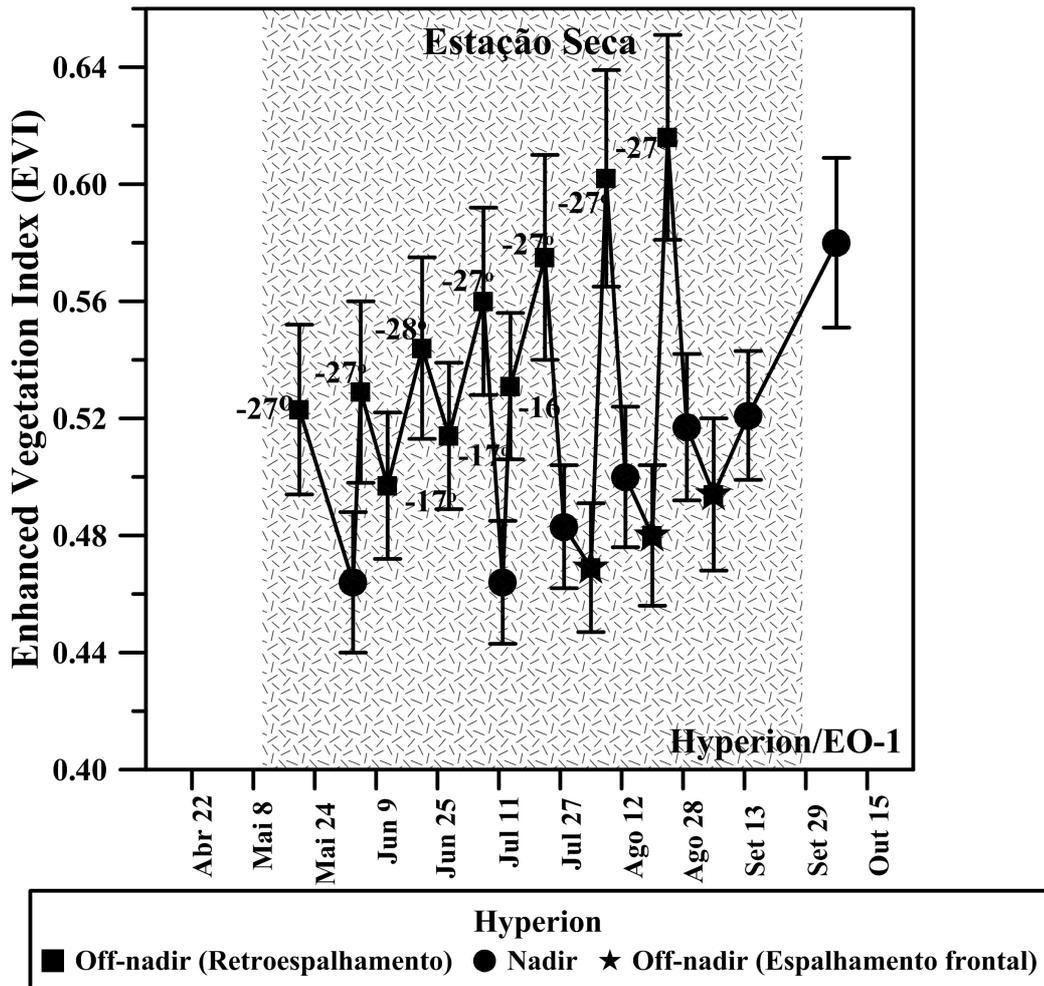


Figura 1 – Efeitos direcionais e de ângulo zenital de visada (AZV) sobre os valores médios de EVI ($n = 500$ pixels) na floresta estacional semidecidual. Os valores foram extraídos das imagens Hyperion ao longo da estação seca de 2005 (faixa sombreada). Valores negativos de AZV são mostrados para a direção de retroespalhamento.

Os resultados da modelagem PROSAIL mostraram que os dois índices de vegetação mais anisotrópicos, dentre os 10 índices estudados, foram o EVI e o PRI. Por exemplo, para dados normalizados ao nadir e para variações de AZV geralmente observadas nas composições 16-dias do produto MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250-m SIN Grid V005) na estação seca da área de estudo (porção realçada entre $\pm 20^\circ$ na Figura 2), a maior anisotropia foi observada para o EVI em ambas as direções de espalhamento e para PRI na direção de retroespalhamento. Os índices menos isotrópicos foram NDVI e SIPI com menos de 1% de variação em $\pm 20^\circ$ de AZV do (Figura 2).

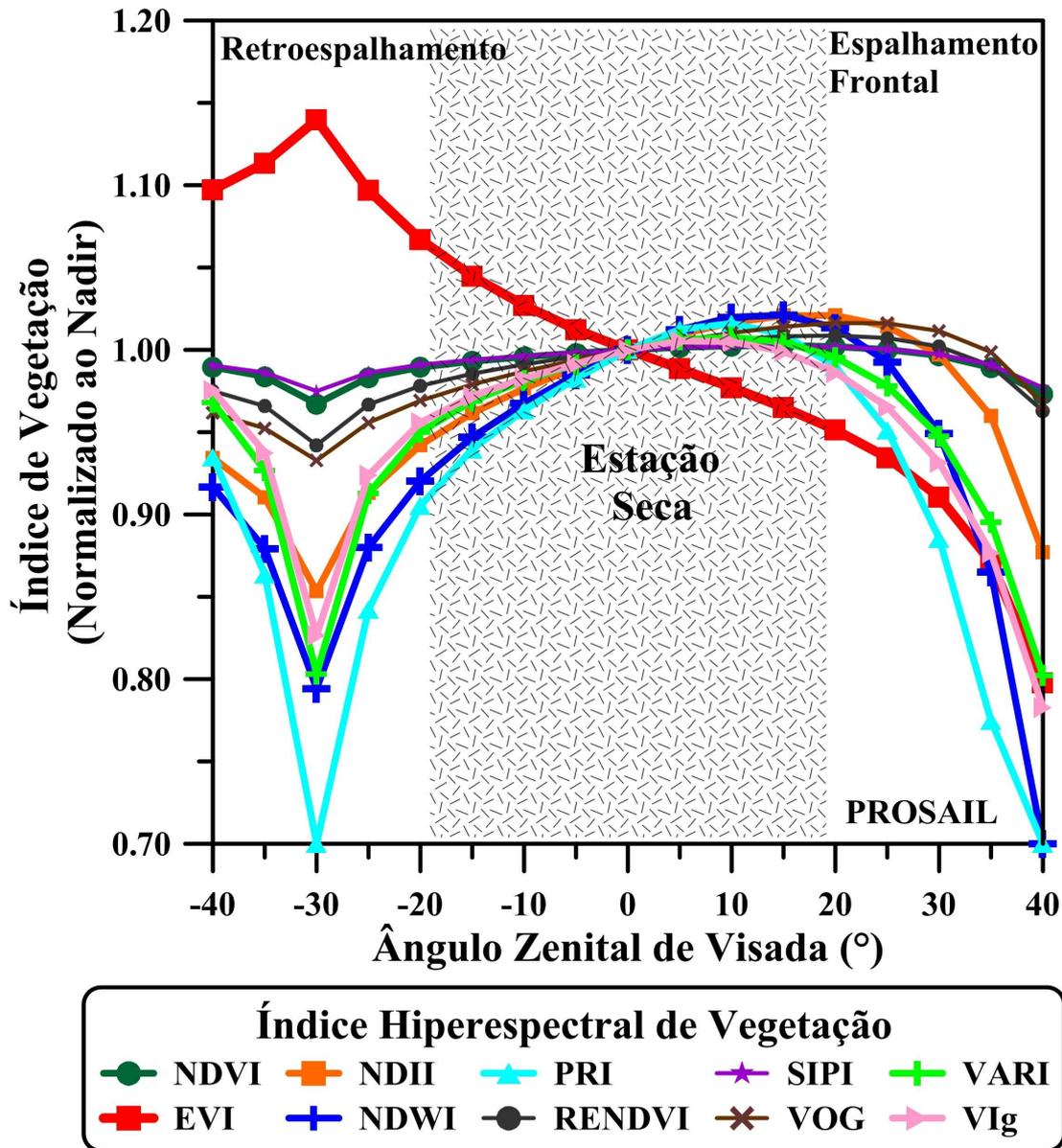


Figura 2 – Modelagem PROSAIL mostrando a variação nos 10 índices hiperespectrais de vegetação estudados em função do ângulo zenital de visada (AZV) e da direção de imageamento (retroespalhamento ou espalhamento frontal). O índice de área foliar (IAF) da floresta estacional semidecidual foi mantido fixo ($5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), assim como o ângulo zenital solar ($AZS = 30^\circ$). Os dados foram normalizados para a visada ao nadir. A faixa realçada na figura representa o intervalo de AZV normalmente observado nas composições 16-dias do produto índice de vegetação do MODIS ao longo da estação seca da área de estudo (maio a setembro).

No conjunto de dados Hyperion, o AZS variou 16° do início para o final da estação seca, diminuindo em direção a setembro. Na visada ao nadir, a reflectância da floresta estacional semidecidual aumentou na faixa de 450 a 2400 nm com a diminuição do AZS, especialmente no IVP. Os resultados da modelagem PROSAIL, com simulação de AZV ao nadir, mostraram que os índices de vegetação mais sensíveis aos efeitos de iluminação solar foram o PRI (-6% em 25° de AZS quando comparado com 45°) e o EVI (+3% em 25° de AZS). Os índices menos isotrópicos foram NDVI, SIPI, RENDVI e VOG com menos de 2% de variação em 25° de AZS em relação ao ângulo de 45° . Contrariamente aos outros índices, o EVI mostrou

valores crescentes com a diminuição do AZS devido à redução do sombreamento dos dosséis e ao consequente aumento da reflectância no infravermelho próximo. Portanto, o EVI aumentou do início para o final da estação seca.

Os resultados deste estudo são concordantes com investigações prévias feitas na região por Galvão et al. (2011) e por Moura et al. (2012), usando dados dos instrumentos Hyperion/EO-1 e MODIS/Terra e dados multiangulares do sensor MISR/Terra, respectivamente. Segundo Galvão et al. (2011), o EVI é muito mais sensível às mudanças no AZV e na direção de imageamento do que o NDVI, devido à forte influência da reflectância da banda do IVP no cálculo do EVI. Ao nadir, as variações intra-anuais do EVI são influenciadas pela iluminação solar ou pela diminuição do AZS do início para o final da estação seca, que causam uma redução no sombreamento dos dosséis e um aumento na reflectância do infravermelho próximo.

Estas observações foram confirmadas por Moura et al. (2012a). Usando dados multiangulares MISR/Terra de 2005 a 2010, estes autores mostraram que o AZV, a direção de imageamento e o AZS introduzem variações importantes no comportamento intra- e interanual do EVI. Portanto, estas variações não estão associadas com alguma atividade fotossintética inesperada na floresta estacional semidecidual no decorrer da estação seca ou com secas severas. Ao isolar os efeitos do AZV e da direção de imageamento, usando somente a câmera MISR do nadir, Moura et al. (2012a) concluíram que não existem associações claras entre as variações interanuais do EVI (2005-2010) e os efeitos de secas que afetaram a região de forma menos intensa em 2005 e de forma mais intensa em 2010.

4. Conclusões

Os resultados da análise dos dados Hyperion/EO-1 e da modelagem PROSAIL mostraram que o EVI e o PRI foram os dois índices de vegetação considerados mais anisotrópicos na floresta estacional semidecidual da área de estudo. Os índices hiperespectrais de vegetação menos influenciados pelos AZV, AZS e pela direção de imageamento foram o NDVI, SIPI e o VOG. Devido a maior dependência do infravermelho próximo em relação aos demais índices, o EVI apresentou um comportamento distinto. O EVI aumentou da direção de espalhamento frontal para a de retroespalhamento e com a diminuição do AZS do início para o final da estação seca, que causa um menor sombreamento dos dosséis e uma maior reflectância na banda do infravermelho próximo. Ao contrário do EVI, o PRI mostrou valores mais altos com o sombreamento na direção do espalhamento frontal, de acordo com os resultados do modelo PROSAIL.

Os resultados deste estudo ressaltam a importância de se considerar os efeitos de iluminação e de visada na análise de séries temporais de índices de vegetação como o EVI e o PRI, especialmente quando os dados são obtidos com sensores de amplo campo de visada (p.ex., MODIS/Terra) ou com instrumentos que tenham capacidade de apontamento (p.ex., Hyperion/EO-1).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo André Maggi pelo apoio na execução desta pesquisa; à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; projeto 08/11499-8); CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior); e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

6. Referências

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 2003. **Proceedings....**, p. 90–92, 2003.

- Galvão, L.S.; Santos, J.R.; Roberts, D.A.; Breunig, F.M.; Toomey, M.; Moura, Y.M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 9, p. 2350–2359, 2011.
- Galvão, L.S.; Breunig, F.M.; Santos, J.R.; Moura, Y.M. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 291–300, 2013.
- 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. 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.; 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, 2002.
- 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.
- 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.
- ITT Visual Information Solutions. *Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH user's guide*. Version 4.7. Boulder, CO: ITT Visual Information Solutions, 2009.
- Jacquemoud, S.; Verhoef, W.; Baret, F.; Bacour, C.; Zarco-Tejada, P.J.; Asner, G.P.; François, C.; Ustin, S.L. PROSPECT+SAIL models: a review of use for vegetation characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, S1, p. 56–66, 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**, v. 102, p. 17051–17067, 1997.
- Moura, Y.M.; Galvão, L.S.; Santos, J.R.; Roberts, D.A.; Breunig, F.M. Use of MISR/Terra data to study intra- and inter-annual EVI variations in the dry season of tropical forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 260–270, 2012a.
- Moura, Y.M. Influência da geometria de visada sobre o EVI na estação seca em floresta tropical usando dados do MISR/Terra. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos (SP), Brazil, 106 pp. 2012b
- 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, 1160–1173, 2003.
- 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.
- Roberts, D.A.; Roth, K.L.; Perroy, R.L. Hyperspectral vegetation indices. In: P. S. Thenkabail, J. G. Lyon e A. Huete (Eds.). **Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation**. Chapter 14, pp. 309–327. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011.
- 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., Washington, DC, 10–14 December. **Proceedings...**, NASA, SP-351, vol. 1, p. 309–317, 1973.
- Verrelst, J.; Schaepman, M.E.; Koetz, B.; Kneubuehler, M. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 5, p. 2341–2353, 2008.
- 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.