

Uso de imagens RapidEye no estudo das variações sazonais de índices de vegetação no Parque Estadual do Turvo (PET)

Lênio Soares Galvão¹
Fábio Marcelo Breunig²
João Roberto dos Santos¹
Thiago Sousa Teles¹
William Gaida²
Yhasmin Mendes de Moura¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lenio, jroberto, tsteles, yhasmin}@dsr.inpe.br

²Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Departamento de Engenharia Florestal, linha Sete de Setembro s/n, sala 59, bloco de apoio 4,
CESNORS/UFSM, 98400-000 Frederico Westphalen, RS, Brasil
breunig@ufsm.br, williamgaida@yahoo.com.br

Abstract. The Parque Estadual do Turvo (PET), located in south Brazil, comprises an interesting remote sensing case study. From the summer to winter, the leaf area index (LAI) decreases and the solar zenith angle (SZA) increases with an annual amplitude larger than 30°. In this study, we used a pair of RapidEye images acquired in February (summer) and August (winter) of 2013 to analyze the seasonal behavior of three vegetation indices (VIs): the Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI), the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Enhanced Vegetation Index (EVI). We applied linear spectral mixture models to the surface reflectance of the RapidEye bands to inspect for differences in shade fraction images. Differences in summer-to-winter ratio images were obtained to discuss the sensitivity of the indices to the coupled effects of LAI and SZA. We projected the results over a digital elevation model (DEM) to look for variations in local illumination conditions and resultant effects on VIs determination. Results showed important changes in shade fractions toward the winter due to the increase in canopy shadows and in local topographic effects. The three VIs decreased from the summer to winter, but those based on band-normalization (RENDVI and NDVI) were less susceptible to topographic effects.

Palavras-chave: Vegetation indices, phenologic variations, RapidEye, índices de vegetação, variações fenológicas, Parque Estadual do Turvo.

1. Introdução

O Parque Estadual do Turvo (PET), criado em 1947, contém um dos maiores fragmentos preservados de Floresta Estacional Decidual da região Sul do Brasil, sendo uma extensão da *Floresta de Misiones* da Argentina (Brack et al., 1985; Guadagnin, 1994; Bulfe, 2008). Do ponto de vista de sensoriamento remoto, o PET representa um estudo de caso bastante interessante para análise das variações sazonais de índices de vegetação (IVs) e dos efeitos da geometria de aquisição de dados sobre sua determinação. Ao contrário do observado na maior parte das florestas tropicais da Amazônia, a floresta subtropical do PET tem duas estações bem definidas de temperatura e uma forte amplitude de variação sazonal de ângulo zenital solar (AZS) com valor máximo superior a 30° (Breunig et al., 2015). As precipitações são geralmente regulares ao longo de todo o ano. Acoplado com o forte efeito sazonal do AZS, que se reflete também em variações locais de iluminação devido ao relevo dissecado do PET, há ainda uma diminuição no Índice de Área Foliar (IAF) do verão para o inverno. Todos estes fatores afetam as respostas espectral e fenológica de florestas decíduais detectadas pelos satélites, conforme demonstrado em trabalhos feitos em outras regiões (Song e Woodcock, 2003; Matsushita et al., 2007; Galvão et al., 2011; Moura et al., 2012; Morton et al., 2014).

Imagens de alta resolução espacial, como as do sensor RapidEye *Earth Imaging System* (REIS), lançado em 2008, podem fornecer informações importantes sobre a estrutura e a fenologia da vegetação. Elas possibilitam o cálculo de índices de vegetação tradicionais como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), através de adaptações simples das formulações originais às bandas do RapidEye. Além disso, operando em uma constelação com cinco satélites, o RapidEye pode, em princípio, adquirir imagens várias vezes ao longo do ano sobre um mesmo local, o que é um aspecto importante em estudos fenológicos por satélite com alta resolução espacial, considerando também a capacidade de apontamento fora-do-nadir dos instrumentos. A resolução espacial nominal é de 5 metros e a resolução radiométrica é de 12 bits (Kramer, 2012). As imagens são obtidas nas bandas do azul (440-650 nm), verde (520-590 nm), vermelho (630-685 nm), em parte da faixa espectral da borda vermelha (*red-edge*; 690-730 nm) e do infravermelho próximo (760-850 nm).

O objetivo deste trabalho é discutir o comportamento sazonal de três índices de vegetação em função dos efeitos acoplados decorrentes do aumento do AZS, das variações locais de iluminação no terreno e da diminuição do IAF do verão para o inverno, usando um par de imagens RapidEye adquiridas em fevereiro e agosto de 2013 no PET. Além do NDVI e EVI, estudou-se o comportamento do *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI), que representa um índice normalmente utilizado em estudos hiperespectrais e que foi adaptado às bandas do RapidEye.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo é o Parque Estadual do Turvo (PET), uma unidade de conservação brasileira localizada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, município de Derrubadas, ao sul do rio Uruguai, fazendo divisa com o Estado de Santa Catarina e com a Província de Misiones, na Argentina (Figura 1).



Figura 1 ó Localização da área de estudo no Estado do Rio Grande do Sul na fronteira com a Argentina e com o Estado de Santa Catarina. Na composição colorida falsa-cor, as bandas 5 (760-850 nm), 4 (690-730 nm) e 3 (630-685 nm) do RapidEye foram representadas em vermelho, verde e azul, respectivamente. A imagem foi obtida em 28 de fevereiro de 2013.

A área de estudo foi selecionada por conter um dos maiores fragmentos preservados de Floresta Estacional Decidual, tendo poucas ocorrências de sucessões secundárias antigas (Guadagnin, 1994; Ruschel et al., 2007). Do verão para o inverno, o AZS aumenta e o IAF diminui em um terreno rugoso/dissecado cuja altitude varia de 100 a 450 m, com um valor médio de 300 m. As variações sazonais relativas dos atributos biofísicos da vegetação e da quantidade de sombra vista pelos sensores faz do PET uma área de estudo extremamente interessante para se analisar a anisotropia de índices de vegetação calculados a partir do RapidEye. Com cerca de 17.500 hectares, o PET é uma extensão da floresta da província de *Misiones*, na Argentina (10.000 km²), com alta biodiversidade (Brack et al., 1985; Guadagnin, 1994; Bulfe, 2008). De acordo com a classificação de Köppen, o clima é subtropical úmido (Cfa). Mais de 50% das espécies dos estratos superiores perdem parte de suas folhas no inverno, período em que as baixas temperaturas dificultam a absorção de água pelas raízes (Franco, 2008). Algumas árvores são completamente envolvidas por lianas.

Com base na inspeção dos dados de IAF e AZS da Coleção 5 do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS)/Terra, mais especificamente dos produtos MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250-m SIN Grid V005) e MOD15A2 (MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1 km SIN GridV005), foram selecionadas duas imagens ortorretificadas do RapidEye: uma adquirida em 28 de fevereiro pelo RapidEye-2 e outra em 1 de agosto de 2013 pelo RapidEye-4 (Figura 2).

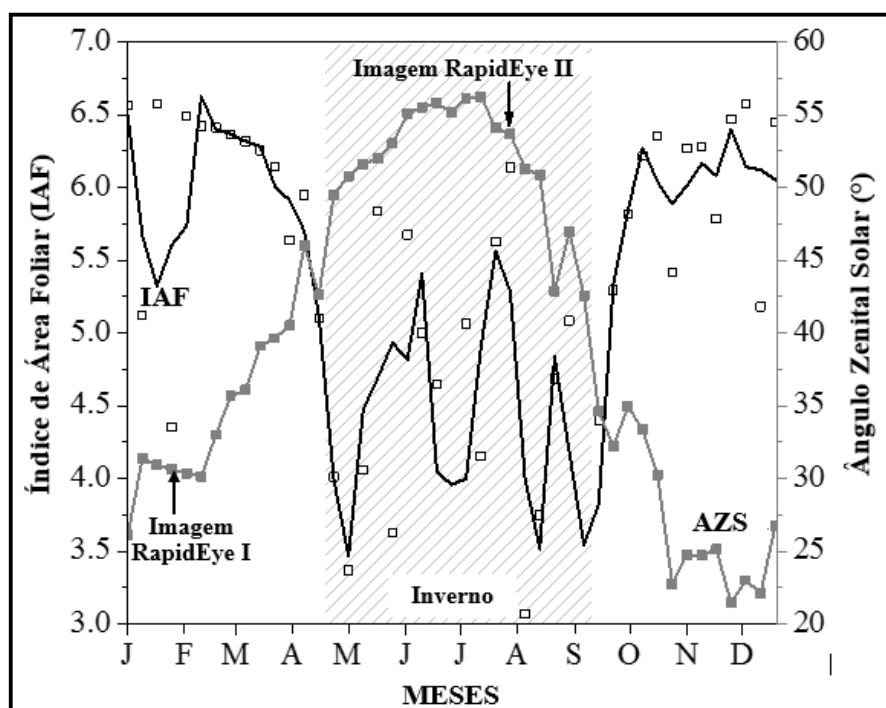


Figura 2 ó Estimativas de Índice de Área Foliar (IAF) do Produto MODIS MOD15A2 e variações sazonais do ângulo zenital solar (AZS) extraídas do produto MODIS MOD13Q1. As duas datas de aquisição das imagens RapidEye em 2013 estão indicadas por setas. O filtro SavitzkyGolay com uma janela de 5 pontos foi usado para ajustar a curva de IAF. Fonte: Adaptado de Breunig et al. (2015).

De acordo com a Figura 2 e com os metadados do RapidEye, a transição de 28 de fevereiro para 1 de agosto representa um aumento no AZS de 25° para 48° (maior sombreamento) e uma diminuição de IAF de 6,5 para 4,5. Entretanto, o produto IAF do MODIS apresenta valores bastante incertos no inverno da área de estudo, mesmo após o uso

somente dos pixels de melhor confiabilidade (Figura 2). Portanto, a amplitude de variação em AZS entre 28 de fevereiro e 1 de agosto foi de 23°, não correspondendo à variação sazonal máxima que é superior a 30°.

Ambas as imagens do RapidEye foram obtidas em órbita descendente com valores de visada próximos ao nadir na primeira data (7°) e fora-do-nadir em agosto (13°). As imagens do nível 3A tiveram seus valores de radiância no topo da atmosfera convertidos para valores de reflectância de superfície usando o algoritmo *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (Exelis, 2014). O FLAASH utiliza como base o MODTRAN-4 para a correção dos efeitos de espalhamento e absorção dos constituintes da atmosfera. O modelo atmosférico utilizado foi o "Mid-Latitude Summer" com modelo de aerossol "Rural". O valor de visibilidade foi 50 km.

O primeiro passo na análise dos dados foi a geração de um modelo linear de mistura espectral, a partir dos dados RapidEye de cada data. Um conjunto único de três *endmembers* (Vegetação Verde, Solo e Sombra) foi selecionado a partir do uso sequencial das técnicas *Minimum Noise Fraction* (MNF) e *Pixel Purity Index* (PPI) sobre cada data (Green et al., 1988; Boardman, 1993; Exelis, 2014). Apesar de ser um constituinte importante, a vegetação seca não foi considerada no modelo para fins de simplificação. As variações relativas nas imagens-frações foram então analisadas na transição do verão para o inverno.

No segundo passo, três índices de vegetação foram calculados: NDVI (Equação 1) (Rouse et al., 1973), RENDVI (Equação 2) (Gitelson et al., 1996) e EVI (Equação 3) (Huete et al., 2002):

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})} \quad (1)$$

$$RENDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red\ edge})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red\ edge})} \quad (2)$$

$$EVI = G \cdot \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + C1 * \rho_{red} - C2 * \rho_{blue} + L)} \quad (3)$$

onde ρ_{NIR} , $\rho_{red\ edge}$, ρ_{red} e ρ_{blue} correspondem aos valores de reflectância de superfície das bandas 5, 4, 3 e 1 do RapidEye, respectivamente; G (2.5) é um fator de escala; L (1.0) é o fator de correção do efeito do substrato; C_1 (6.0) e C_2 (7.5) são os coeficientes para compensação de efeitos de aerossóis.

Para analisar as variações sazonais, imagens-diferenças de IVs entre o verão e o inverno foram geradas. Para permitir a análise comparativa dos IVs em uma mesma escala, as imagens de IVs do verão foram divididas pelas do inverno e as variações relativas foram analisadas. Em ambos os casos, os resultados foram projetados sobre um modelo digital de elevação (MDE) obtido a partir do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer ó Global Digital Elevation Map* (ASTER ó GDEM 30 m).

3. Resultados e Discussão

A Figura 3 mostra os resultados do modelo de mistura espectral em uma composição colorida das imagens-fração vegetação verde, solo e sombra, projetados sobre o MDE do ASTER. Devido à similaridade entre os espectros da água e da sombra, ambos com valores muito baixos de reflectância nas bandas do RapidEye, o Rio Uruguai aparece na cor vermelha. Da imagem do verão (Figura 3a) para a do inverno (Figura 3b), o AZS aumenta de 25° para 48°, com um melhor realce das feições topográficas. Devido a maior quantidade de sombra vista pelo RapidEye em agosto, a composição colorida da Figura 3b é mais avermelhada no PET do que o observado na Figura 3a. Mesmo considerando a diminuição do IAF para a maioria das espécies de vegetação, os efeitos do sombreamento resultantes das

variações na estrutura do dossel, incluindo a presença de árvores emergentes, e das modificações na orientação das vertentes do terreno, se tornam mais evidentes com o aumento do AZS no inverno.

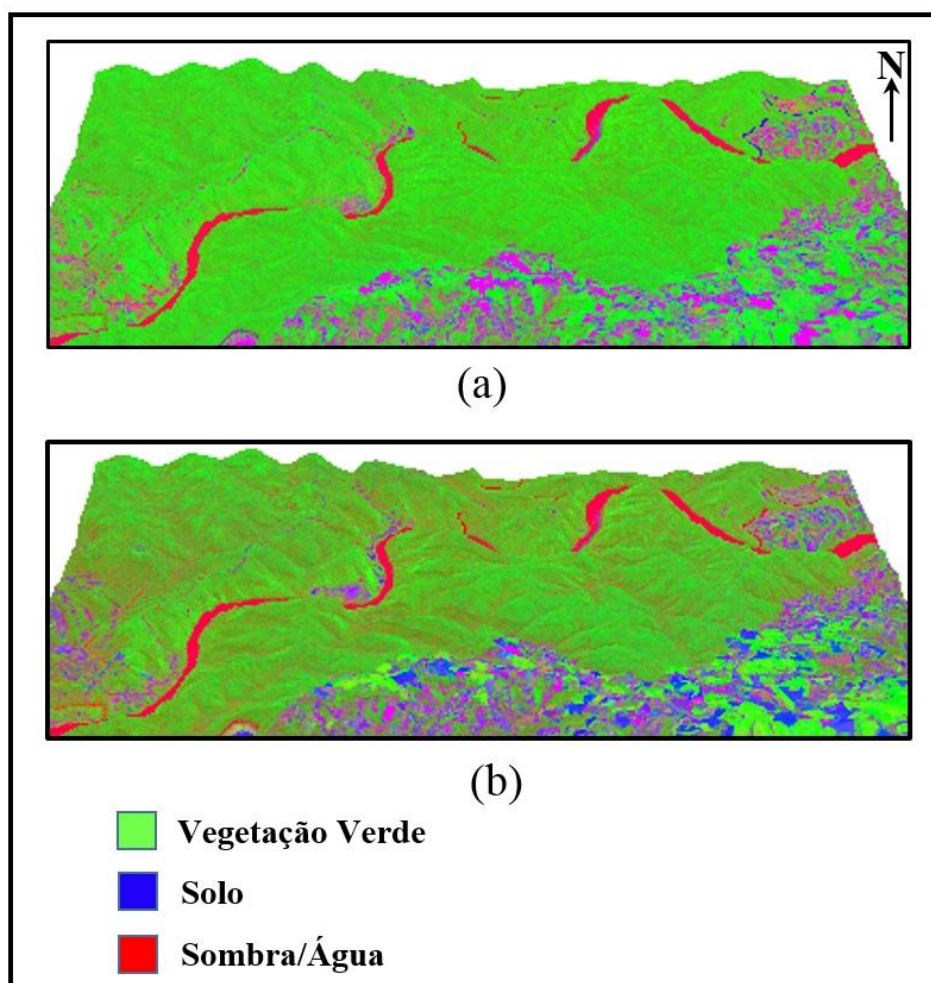


Figura 3 ó Composições coloridas resultantes do modelo linear de mistura espectral aplicado as imagens RapidEye de (a) 28 de fevereiro ($AZS = 25^\circ$) e (b) 1 de agosto de 2013 ($AZS = 48^\circ$). Os resultados estão projetados sobre um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Decorrente dos efeitos acoplados da diminuição do IAF na Floresta Estacional Decidual do PET e do aumento de sombreamento, as diferenças de NDVI foram, do verão para o inverno, geralmente inferiores a 0,15. Estas diferenças são consistentes com as observadas na área de estudo por Breunig et al. (2015), ao analisarem perfis sazonais do NDVI do produto MOD13Q1. No presente estudo, as menores diferenças sazonais foram obtidas para o RENDVI e as maiores foram verificadas para o EVI. Quando comparado com o NDVI e o RENDVI, que se baseiam em diferenças normalizadas entre bandas, o EVI é aparentemente mais sensível às variações locais de iluminação no terreno. Conforme se deduz da inspeção de pares de imagens do verão e do inverno do RapidEye, o EVI realça o relevo dissecado do PET, quando comparado com os demais IVs (Figura 4).

Os efeitos topográficos são então distintos para cada IV. Na Figura 5, índices que normalizam a reflectância das bandas usadas em seu cálculo (RENDVI e NDVI) são menos afetados pelos efeitos topográficos do que aquele fortemente dependente de uma única banda (EVI). A projeção de razões de IVs verão/inverno sobre um MDE mostrou que as variações

sazonais de EVI podem alcançar valores superiores a 60% (cor vermelha na Figura 5c). Embora parte desta variação seja devida a maior sensibilidade do EVI para o IAF, que diminui do verão para o inverno, outra parte é resultante de variações locais nas condições de iluminação do terreno e de sombreamento dos dosséis. A inspeção de porções vizinhas das imagens RapidEye, contendo o mesmo tipo de vegetação em vertentes iluminadas e sombreadas do terreno, mostrou variações superiores a 20% em alguns casos, devidas somente aos efeitos de iluminação. Como as imagens não foram obtidas exatamente com o mesmo ângulo de apontamento, o efeito da visada, que também influencia os resultados, não pôde ser devidamente avaliado.

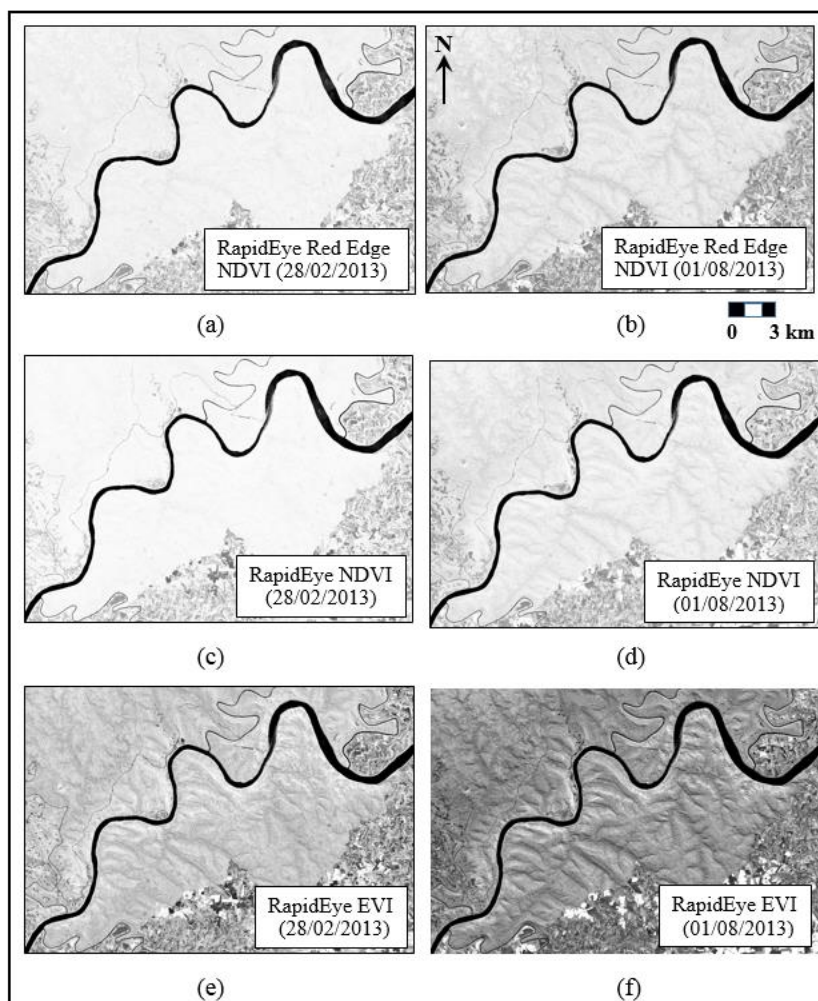


Figura 4 ó Variações de NDVI (a, b), Red Edge NDVI (c, d) e EVI (e, f) para pares de imagens RapidEye obtidas no verão (28 de fevereiro) e inverno (1 de agosto) de 2013.

De qualquer forma, resultados similares na área de estudo também foram obtidos para o NDVI e EVI por Breunig et al. (2015) usando dados MODIS, embora com menor magnitude de variação, provavelmente devido a resolução espacial moderada deste sensor (250 m). Os resultados de nosso estudo também são concordantes com os obtidos por Galvão et al. (2011), que demonstraram que o EVI aumenta com a diminuição do AZS ou com menores quantidades de sombras em florestas tropicais da Amazônia devido a sua maior dependência da banda do infravermelho próximo. Finalmente, os resultados também são consistentes com as conclusões de Matsushita et al. (2007), que observaram que o EVI é muito mais dependente dos efeitos topográficos do que o NDVI.

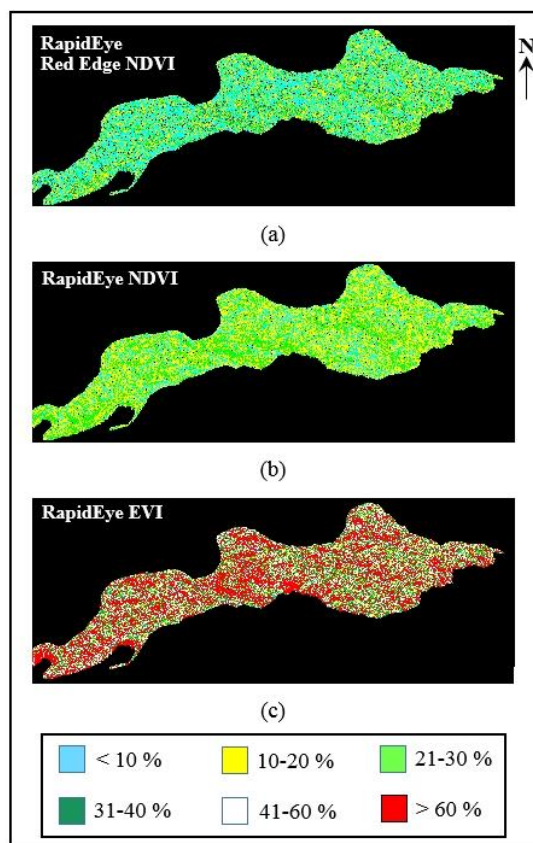


Figura 5 ó Variação relativa dos índices de vegetação do RapidEye {(a) Red Edge NDVI, (b) NDVI e (c) EVI}, resultante da diminuição do IAF e do aumento do AZS (sombreamento) do verão (fevereiro) para o inverno (agosto) no PET.

4. Conclusões

Do verão para o inverno, o aumento no AZS de 25° (fevereiro) para 48° (agosto) no momento de aquisição das imagens RapidEye produziu um aumento nos valores de fração-sombra do modelo de mistura espectral, devido ao sombreamento das copas das árvores e às variações locais de topografia.

Os efeitos acoplados de aumento de AZS e de diminuição do IAF na floresta estacional decidual do PET no inverno produziram um decréscimo nos valores de Red Edge NDVI, NDVI e EVI, que apresentaram diferentes sensibilidades para o IAF e para os efeitos de iluminação de cena. Por não ser um índice de vegetação que se baseia em normalização de bandas, tendo uma forte dependência da banda do infravermelho próximo em sua determinação, o EVI foi mais sensível aos efeitos topográficos do que os outros dois índices estudados. Estudos subsequentes de modelagem e correção topográfica irão avaliar em detalhe estes efeitos usando imagens RapidEye de outras datas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; processo 2013/03908-3), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS; processo 2012/0383-5) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradecimentos também são devidos a Renato Beppler Spohr, Jonathan William Trautenmüller, Luciano Denardi, Rafaelo Balbinot e Rafael Vendruscolo pela ajuda nas atividades de campo.

Referências Bibliográficas

- Boardman, J.W., 1993. Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. In: *JPL Airborne Geoscience Workshop. Proceedings...* Pasadena, 25-29 October 1993. JPL Publication 93626, pp. 116-14.
- Brack, P., Bueno, R.M., Falkenberg, D.B., Paiva, M.R.C., Sobral, M., Stehmann, J.R. Levantamento florístico do Parque Estadual do Turvo, Tenente Portela, Rio Grande do Sul, Brasil. *Roessléria*, v. 7, p. 69-94, 1985.
- Breunig, F.M., Galvão, L.S., Santos, J.R., Gitelson, A.A., Moura, Y.M., Teles, T.S., Gaida, W. Spectral anisotropy of subtropical deciduous forest using MISR and MODIS data acquired under large seasonal variation in solar zenith angle. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 35, p. 294-304, 2015.
- Bulfe, N.M.L. **Dinâmica de clareiras originadas de exploração seletiva de uma floresta estacional semidecidual na Província de Misiones, nordeste da Argentina.** Tese de Doutorado. Universidade federal do Paraná (UFPR) - Curitiba, 73 p., 2008.
- Exelis Visual Information Solutions. ENVI Version 5.1. 2014
- Franco, A.M.S. **Estrutura, diversidade e aspectos ecológicos do componente arbustivo e arbóreo em uma floresta estacional, Parque estadual do Turvo, Sul do Brasil.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Porto Alegre, 82 p., 2008.
- 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, p. 2350-2359, 2011.
- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., Lichtenthaler, H.K., 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*, v. 148, p. 501-508, 1996.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, B., 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, p. 65-74, 1988.
- Guadagnin, D.L. **Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo.** Tese de Doutorado. Universidad Nacional de Córdoba - Córdoba, Argentina. 1994.
- 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.
- Kramer, H.J. RapidEye Earth Imaging System - Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors. Paris: ESA - European Space Agency. 2012. Disponível em: <http://www.eoportal.org/directory/pres_RapidEyeSatelliteConstellation.html>. Acesso em agosto de 2012.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density Cypress forest. *Sensors*, v. 7, p. 2636-2651, 2007.
- Morton, D.C., Nagol, J., Carabajal, C.C., Rosette, J., Palace, M., Cook, B.D., Vermote, E.F., Harding, D.J., North, P.R.J. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. *Nature*, v. 506, p. 221-224, 2014.
- 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 forest. *Remote Sensing of Environment*, v. 127, p. 260-270, 2012.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third ERTS-1 Symposium, Washington, 1973. *Proceedings...* Washington, DC, 10-14 December. NASA, p. 309-317, SP-351. 1973
- Ruschel, A.R., Nodari, R.O., Moerschbacher, B.M. Woody plant species richness in the Turvo State Park, a large remnant of deciduous Atlantic forest, Brazil. *Biodiversity Conservation*, v. 16, p. 1699-1714, 2007.
- Song, C., Woodcock, C.E. Monitoring forest succession with multitemporal landsat images: factors of uncertainty. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, p. 2557-2567, 2003.