

Análise de Diferença de Fase entre Dados Multitemporais de Índice de Vegetação e Climáticos

Humberto N. de Mesquita Jr.¹
Marisa Dantas Bitencourt²

¹ Núcleo de Geoprocessamento da Diretoria de Florestas do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais, SCEN Trecho 2, Ed. Sede IBAMA, Bloco “E”, 70818-900, Brasília-DF, Brasil
humberto.mesquita-junior@ibama.gov.br

² Departamento de Ecologia da Universidade de São Paulo, Rua do Matão 321, Trav. 14, 05508-900. São Paulo – SP, Brasil
tencourt@ib.usp.br

Abstract: The spectral indices of vegetation are frequently associated with biophysical parameters of the vegetation. The good results reached for these relations, mainly with the amount of green leaves, had propitiated the inferences on the state of the vegetation. The dynamics of the vegetation can be studied with secular series of the indices of vegetation gotten by images of orbital sensors. In this work a secular series of 2 years, of biweekly images of the Terra-MODIS satellite, was used to study the sazonal dynamics of the fisionomias of Open pasture. The IVDN variation was correlated with pluviométricos data and had been diagnosed differences of secular phase. The oscillations of the IVDN had been represented, mathematically, for co-sine trigonometrical function.

Palavras-chave: Cerrado, Temporal Analysis, Climate, NDVI, Terra-MODIS.

1. Introdução

Os índices de vegetação espectrais são relacionados com a quantidade de folhas verdes numa determinada área. Esta característica dos índices de vegetação foi associada à possibilidade de estudar a dinâmica da vegetação (Tucker *et al.*, 1985; Tucker, 1986; Justice *et al.*, 1991). No entanto, em regiões onde ocorre variação sazonal, com o comprometimento da estimativa da quantidade de folhas verdes, os índices servem como indicadores desta sazonalidade (Muller, 1995; Reed *et al.* 1994; Batista *et al.*, 1997; França & Setzer, 1998; Paruelo *et al.*, 1998; Huete *et al.*, 2002). Em alguns casos, as variações sazonais dos índices foram relacionadas com a fenologia vegetativa, com o reconhecimento das fenofases da cobertura vegetal (Ludeke *et al.* 1996; Duchemin *et al.*, 1999).

Por meio de análise em escala global, com alta frequência temporal de imagens, já foram produzidos modelos que representam a variação fenológica dos tipos vegetais do globo (Kremer & Running, 1993; Ehrlich *et al.*, 1994). Em alguns casos, comparando as variações sazonais do IVDN com variáveis ambientais como a temperatura, no caso das florestas decíduas, e a precipitação, no caso das savanas (Di *et al.*, 1994; Shinoda, 1995; Fuller & Prince, 1996; Moulin *et al.*, 1997; Chidumayo, 2001). Nas savanas, é preciso considerar os componentes herbáceo e arbóreo da vegetação (Santos & Shimabokuro, 1993). Cada componente da paisagem pode ter uma resposta espectral diferente para cada variação sazonal (Fuller *et al.*, 1997; Fuller, 1999; Mesquita Jr, 1998; Roderick *et al.*, 1999; Scanlon *et al.* 2002).

A maior parte dos trabalhos realizados utilizou séries temporais de imagens dos satélites multispectrais da NOAA (*National Atmospheric and Oceanic Administration*). As últimas gerações dos satélites da NOAA foram dotadas do sensor multispectral AVHRR (sensor avançado com radiômetro de alta resolução), com cinco faixas espectrais sendo uma no visível (0,52-0,72 μ m), uma no infravermelho (3,78-4,03 μ m) e as demais na faixa do termal (6,47-7,02 μ m; 10,2-11,2 μ m; 11,5-12,5 μ m). O objetivo principal da série de satélites NOAA é a previsão das condições do tempo e outros propósitos meteorológicos. Após a implementação da nova geração destes satélites, dotados dos sensores AVHRR, ocorreu uma grande motivação aos estudos da dinâmica do clima global e mapeamentos da superfície oceânica e da vegetação terrestre (Jensen, 2000).

A partir do ano de 2000, foi colocado em órbita o satélite *Terra* com o sensor *MODIS* (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*). A partir de então, a motivação aos estudos da dinâmica da vegetação no globo aumentou. Aliado a este satélite há também o satélite *Aqua* (também com o sensor *MODIS*), em órbita desde 2002, que trabalha em constelação¹ com o *Terra*.

Além dos avanços tecnológicos que podem auxiliar as pesquisas da comunidade científica, a área do Sensoriamento Remoto, relacionada aos recursos naturais, tem propiciado grandes avanços no que diz respeito a projetos integrados que otimizam as oportunidades de recursos. Uma dessas iniciativas é promovida pelo programa *EOS* (*Earth Observation System*) da *NASA* (*National Agency of Space and Aeronautics*), no qual grande quantidade de dados é disponibilizada para a pesquisa. Dentre os produtos disponibilizados pela *EOS*, estão os índices de vegetação MOD13-V003 (Huete & Justice, 1999). O Sensor *MODIS* possui 36 faixas espectrais. As faixas espectrais utilizadas para gerar os produtos de índice de vegetação quinzenais (média de 16 dias) são as do visível e do infravermelho próximo, com resoluções espaciais de 250m e 500m. Além dos índices de vegetação, são disponibilizadas as médias quinzenais das faixas espectrais do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, os ângulos de azimute, zênite, assim como o índice de qualidade das imagens derivadas.

O sucesso deste sensor, aliado à forma de disponibilização dos dados, tem motivado seu uso nas pesquisas. Além destas características, as faixas espectrais do sensor, o momento de aquisição (aproximadamente 10:30h, hora local) das imagens e a órbita coincidem com os sensores *ETM+* e *TM* da série de satélites *Landsat*. Outra característica deste sensor é a alta resolução temporal. Em conjunto, o satélite *Terra* e o *Aqua*, dotados do sensor *MODIS*, estarão produzindo imagens com resolução temporal de até 1 a 4 dias, dependendo do ângulo de visada (Running, 1999). A utilização deste sensor aliada às imagens dos satélites *Landsat*, serão cada vez mais frequentes em estudos na escala regional, considerando a temporalidade.

O objetivo deste trabalho é analisar a variação temporal da resposta espectral do IVDN, para as fisionomias de Cerrado, e relacionar estas variações com as variáveis meteorológicas.

¹ Neste caso, o termo constelação refere-se a dois ou mais satélites com o mesmo tipo de sensor e órbita similar com passagens defasadas temporalmente (adquirindo imagens de um mesmo local da superfície da terra em tempos diferentes).

2. Área de estudo

A área de estudo foi a gleba Pé-de-Gigante, uma unidade de conservação situada no Município de Santa Rita do Passa Quatro, no estado de São Paulo, Brasil (21°37'30" Sul, 47°37'30" Oeste). Esta área foi escolhida por possuir uma coleção de dados disponíveis e úteis para a análise temporal. Há também ótimo mapeamento das fisionomias de Cerrado da gleba. Considerando a atual fragmentação da pretérita cobertura vegetal do Cerrado no estado de São Paulo, esta gleba é relativamente extensa (área de 12,25 km²) e bem conservada. O tamanho da área, o conhecimento e a quantidade de dados acumulados foram importantes nesta escolha.

4. Material e Métodos

Na **figura 1**, estão representados os limites da área de estudo nas imagens *Terra-MODIS* de 500 e 250m de resolução. Para realizar a análise das fisionomias, foram utilizadas as áreas de provável ocorrência das fisionomias, segundo Mesquita Jr (1998). Também foram extraídos os valores de cada cela da gleba Pé-de-Gigante.

A comparação das imagens com resolução de 500 e 250 metros do *Terra-MODIS* com imagens com resolução espacial de 30m x 30m, *Landsat-TM*, e 4m x 4m, *Ikonos-Multispectral*, serviram para checar o georeferenciamento das imagens (convertida da projeção sinusoidal para coordenadas geodésicas em projeção Mercator ou UTM).

As imagens com resolução de 500m foram utilizadas para extrair os valores de IVDN quinzenais das fisionomias que ocorrem dentro da unidade de conservação Pé-de-Gigante. Para realizar esta análise, foram escolhidos alguns pontos onde ocorre quase ou exclusivamente cada fisionomia. Estes valores foram comparados com os valores obtidos por outros sensores, em datas distintas, para a mesma região da imagem. As curvas de variação temporal de cada fisionomia foram comparadas com os padrões de variação temporal obtidos com as imagens *Landsat-TM*.

Na **figura 2**, estão representadas graficamente as variações do IVDN de todas as celas da imagem IVDN com resolução de 500m, bem como o fotoperíodo e a precipitação pluvial, dentro da gleba Pé-de-gigante, durante o período de novembro de 2000 até dezembro de 2002.

Todas as fitofisionomias no interior da gleba foram consideradas para a análise temporal. Para esta análise, foram consideradas todas as celas da imagem no interior da gleba (**fig. 1**), com exceção das celas limítrofes nas zonas de contato com outro tipo de alvo. A variação fisionômica foi representada em valores de 0 a 1, valores resultantes da normalização em relação ao número de celas, ordenadas pelas médias dos valores de IVDN na pré-estiagem, nos dois anos. Esta representação baseia-se na premissa de que o período de pré-estiagem é o mais correlacionado com o gradiente estrutural de todas as fitofisionomias presentes na gleba.

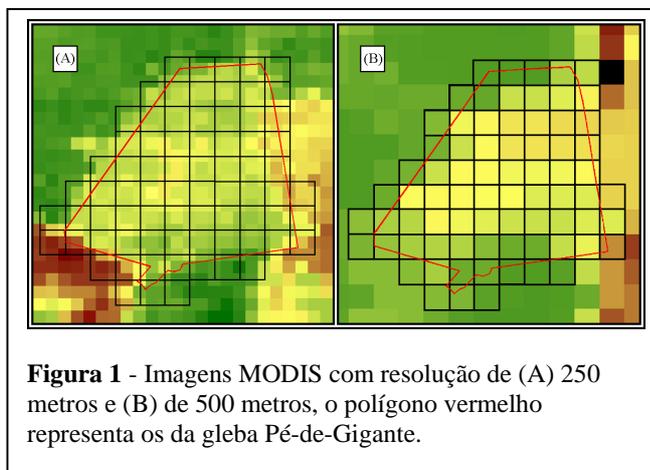


Figura 1 - Imagens MODIS com resolução de (A) 250 metros e (B) de 500 metros, o polígono vermelho representa os da gleba Pé-de-Gigante.

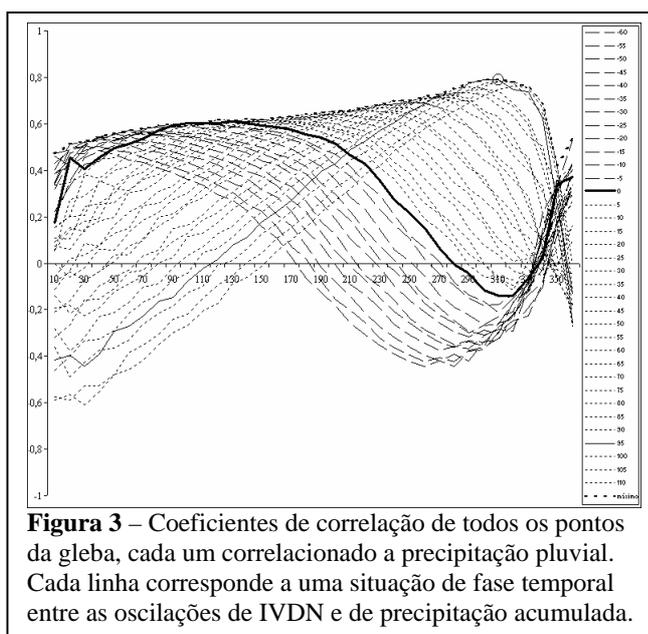
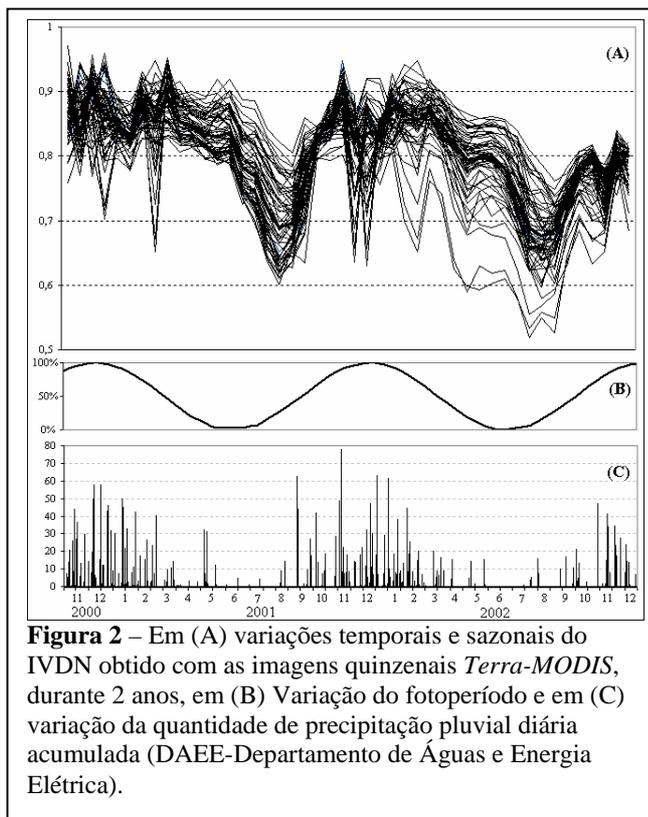
Os períodos de pré e pós-estiagem foram analisados, pois estes são os períodos de maior variabilidade na quantidade de folhas verdes. É preciso notar que o período interestiagem, correspondente aos meses de dezembro a março, é considerado o de máxima quantidade de chuvas. No entanto, esta simplificação não é sempre verdadeira, podendo ocorrer eventos que podem alterar a quantidade de folhas verdes, mesmo no verão, tais como estiagens curtas, eventos de floração intensa e mesmo a troca de folhagem.

O período pré-estiagem, iniciado em abril, quando as primeiras espécies decíduas começam a perder as folhas, pode prolongar-se até setembro.

O período de pós-estiagem parece ser parcialmente dependente da quantidade de chuvas. À medida que a precipitação começa a ser acumulada, ocorre a resposta da vegetação. As fisionomias campestres geralmente respondem rapidamente ao início das chuvas, por suas características de crescimento, e porque pouca chuva em intervalos regulares pode ser suficiente para umedecer as camadas superficiais do solo.

Os valores de IVDN foram correlacionados com a quantidade de chuvas, dados fornecidos pela estação meteorológica de Santa Rita do Passa Quatro (C4-107, DAEE). Cada ponto da imagem foi correlacionado com a precipitação acumulada em milímetros de chuva, de 30 até 360 dias anteriores. Na **figura 3**, estão representados graficamente as médias dos coeficientes de correlação de todos os pontos da gleba, cada um correlacionado a precipitação pluvial.

Para as condições sem defasagem temporal (defasagem igual zero), os melhores resultados foram obtidos com



aproximadamente 120 dias (4 meses) de precipitação acumulada. No entanto, se considerarmos a defasagem temporal, os melhores resultados foram obtidos com 360 e um deslocamento positivo do IVDN de 95 dias. As variações de fase temporal não são iguais durante todo o ano. Os coeficientes de correlação e os respectivos deslocamentos de fase no período de pré-estiagem e pós-estiagem estão representados na **figura 4**.

De maneira geral, quanto maior a quantidade de precipitação acumulada, melhor é a correlação. No

período de pós-estiagem, coeficientes de correlação relativamente altos podem ser obtidos com defasagem positiva, enquanto no período de pré-estiagem, coeficientes de correlação relativamente altos podem ser obtidos com defasagem negativa. Os resultados mais parcimoniosos com precipitação acumulada de 30 dias são no período de pós-estiagem de -30 dias e no período de pré-estiagem de -60 dias.

Foram feitas correlações entre as oscilações do IVDN e as oscilações de precipitação em relação às diferentes condições do gradiente fisionômico. Na **figura 5**, estão ilustradas as variações do coeficiente de correlação em relação ao gradiente de fisionomias de vegetação na gleba. As fisionomias campestres têm um padrão mais regular, enquanto as fisionomias florestais apresentam maior variabilidade.

A maior variação das fisionomias florestais pode estar relacionada com a maior variedade de estratégias de fenologia vegetativa das espécies que a compõem. Nas

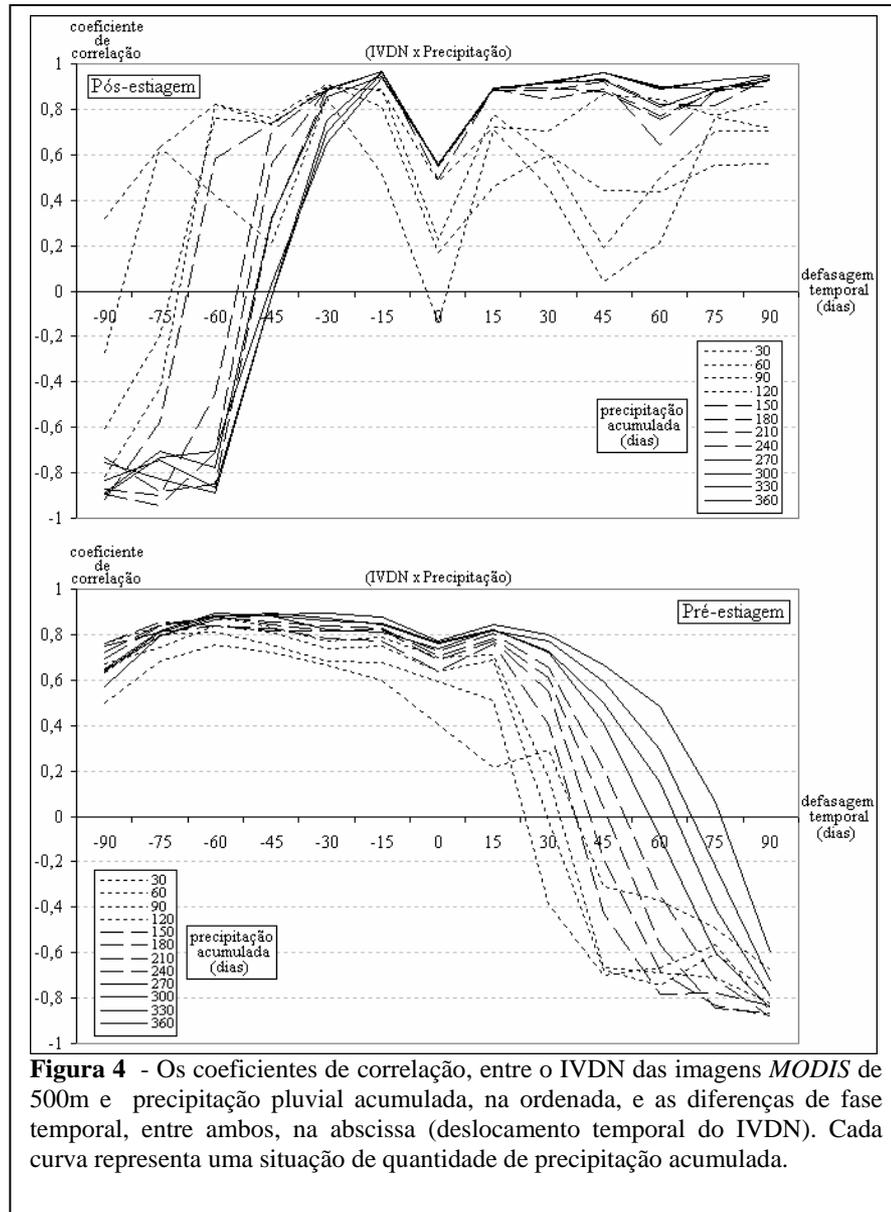


Figura 4 - Os coeficientes de correlação, entre o IVDN das imagens MODIS de 500m e precipitação pluvial acumulada, na ordenada, e as diferenças de fase temporal, entre ambos, na abscissa (deslocamento temporal do IVDN). Cada curva representa uma situação de quantidade de precipitação acumulada.

fisionomias campestres existe maior sincronismo da fenologia vegetativa das espécies que compõem a cobertura vegetal. O componente herbáceo apresenta poucas espécies perenes e muitas espécies decíduas com resposta sincronizada no período de estiagem. Nas fisionomias florestais existe um espectro mais amplo de espécies com variação de intensidade e sincronismo da deciduidade durante a estiagem (Sarmiento & Monasterio, 1983 e 1984). Espera-se maior espectro de variação da fenologia vegetativa do componente herbáceo durante o período chuvoso (variação da razão parte vegetativa e reprodutiva, amplo espectro de estratégias reprodutivas e presença de espécies efêmeras).

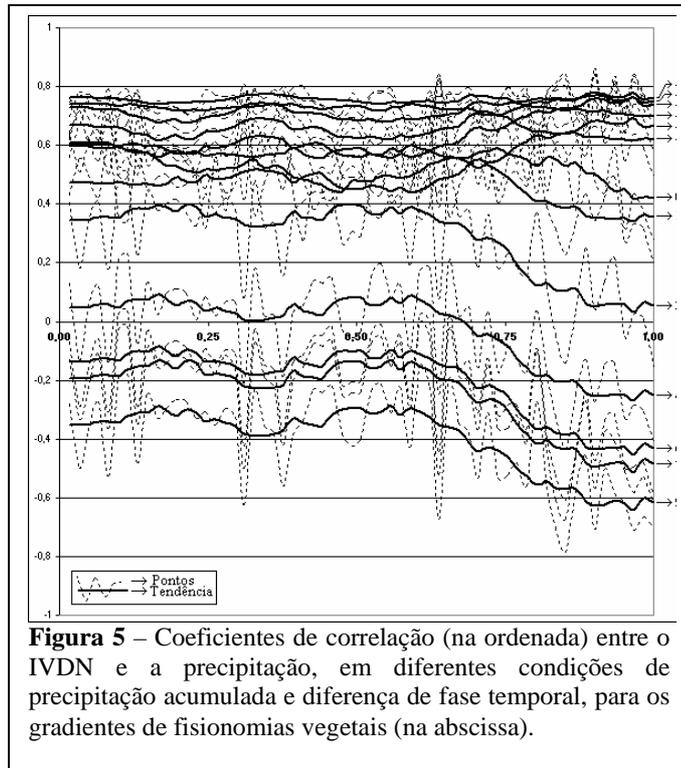


Figura 5 – Coeficientes de correlação (na ordenada) entre o IVDN e a precipitação, em diferentes condições de precipitação acumulada e diferença de fase temporal, para os gradientes de fisionomias vegetais (na abscissa).

5. Discussão

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que as variações temporais do IVDN das fisionomias vegetais no tempo podem ser descritas matematicamente. A hipótese da relação entre variação da fenologia vegetativa e as variáveis precipitação pluvial e fotoperíodo não pode ser descartada, ao menos no período de pré-estiagem. As variações no período de pós-estiagem indicam menor intervalo de confiança. Os resultados na pós-estiagem indicam que o intervalo de tempo e a resolução temporal do satélite não são suficientes para que a variância destas variáveis explique esta relação.

As variações do IVDN foram bem correlacionadas com as variações na quantidade de precipitação. No entanto, foram diagnosticadas diferenças de fase temporal para o ajuste destas correlações. Outros autores já mencionaram o mesmo tipo de variação de fase temporal, entre o IVDN e a precipitação, em outros tipos de vegetação. Malo & Nicolson (1990) relacionaram a diferença de aproximadamente 2 meses entre o IVDN e as chuvas, possivelmente devido à capacidade de carga do solo. Shinoda (1995) estudou a diferenças de fase em florestas equatoriais e savanas africanas e encontrou resultados similares: aproximadamente 1 mês para as florestas tropicais; 2 meses para as savanas; e 3 meses para as savanas secas.

6. Conclusões

As variações temporais do IVDN das fitofisionomias da gleba Pé-de-Gigante podem ser relacionadas com as variações climáticas. O período mais bem correlacionado foi o de

pré-estiagem. Nesta relação, foi diagnosticado deslocamento de fase temporal. A variação anual do IVDN foi correlacionada com fotoperíodo. O período de pós-estiagem é muito curto e a resolução quinzenal, utilizada neste trabalho, não foi suficiente para descrever uma relação com a precipitação pluvial com um bom grau de confiança.

Dada a resolução espacial e temporal das imagens *Terra-MODIS*, os resultados obtidos foram satisfatórios para análise de fragmentos de Cerrado, com extensão similar em área. As séries temporais das imagens *Terra-MODIS*, podem ser utilizadas para complementar as imagens do satélite *Landsat*. No caso do Cerrado do estado de São Paulo, que é fragmentado, o sensor de moderada resolução espacial é uma alternativa para se obter informações multitemporais. É importante notar que o lançamento do satélite *Aqua-MODIS* (em constelação com o *Terra-MODIS*) vai resultar em aumento da resolução temporal. Estes avanços, aliados a facilidade de obtenção das imagens, serão de extrema utilidade para a análise de dados de sensores orbitais, com menor resolução espacial e temporal, considerando a sazonalidade da vegetação do Cerrado.

Os resultados também foram satisfatórios para análise temporal das fisionomias de Cerrado em relação à floresta estacional semidecidual, confusão comum no estado de São Paulo. Algumas variações temporais do IVDN das fisionomias florestais em relação às fisionomias campestres podem estar associadas com as diferenças de fase temporal da fenologia das espécies que as compõem.

Referências

- Batista, G.T., Shimabukuro, Y.E., Lawrence, W.T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data, **International Journal of Remote Sensing**, Londres, 18(15):3195-3210. 1997.
- Chidumayo, E.N. Climate and phenology of savanna vegetation in southern Africa. **Journal of Vegetation Science**, Knivsta, 12(3):347-354.
- Di, L., Rundquist, D.C., Han, L. Modeling relationships between NDVI and precipitation during vegetative cycles, **International Journal of Remote Sensing**, Londres, 15(10):2121-2136. 1994.
- Duchemin, B.; Goubier, J.; Courier, G. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, New York, 67(1):68-82. 1999.
- Ehrlich, D., Estes, J.E., Singh, A. Applications of NOAA-AVHRR 1km data for environmental monitoring, **International Journal of Remote Sensing**, Londres, 15(1):145-161. 1994.
- França, H.; Setzer, A.W. AVHRR temporal analysis of a savanna site in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, 19(16):3127-3140. 1998.
- Fuller, D.O. Canopy phenology of some mopane and miombo woodlands in eastern Zambia. **Global Ecology and Biogeography**, Londres, 8(3-4):199-209. 1999.
- _____; Prince, S.D. Rainfall and foliar dynamics in tropical southern Africa: Potential impacts of global climatic change on savanna vegetation. **Climatic Change**, Dordrecht, 33(1):69-96. 1996.
- _____; Prince, S.D.; Astle, W.L. The influence of canopy strata on remotely sensed observations of savanna-woodlands. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, 18(14):29-85-3009. 1997.
- Huete, A; Justice C. **MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document**, Greenbelt: NASA Godard Space Flight Center, <http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/#vegetation-indeces>, 129p. 1999.
- _____; 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**, New York, 83(1-2): 195-213. 2002.
- Jensen J.R. **Remote Sensing of Environment: A resource perspective**. Practice Hall series in geographic information science. New Jersey: Practice Hall. 2000.
- Justice, C.O.; Townshend, J.R.G.; Kalb, V.L. Representation of Vegetation by Continental data sets derived from NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Londres 12(5):999-1021. 1991.

- Kremer, R.G., Running, S.W. Community Type Differentiation Using NOAA/AVHRR Data within a Sagebrush-Steppe Ecosystem, **Remote Sensing of Environment**, New York, 46:311-318. 1993.
- Ludeke, M.K.B.; Ramage, P.H.; Kohlmaier, G.H. The use of satellite NDVI data for the validation of global vegetation phenology models: Application to the Frankfurt Biosphere Model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, 91(1-3):255-270. 1996.
- Malo A.R.; Nicholson S.E. A study of Rainfall and Vegetation Dynamics in the Africal Sahel using Normalize Difference Vegetation Index. **Journal of Arid Environment**, London, 19:1-24.1990.
- Mesquita Jr, H.N. **Análise temporal com sensor orbital de unidades fisionômicas de cerrado na Gleba Pé-de-Gigante (Parque Estadual de Vassununga – SP)**, Dissertação defendida no Depto. De Ecologia Geral do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em ciências. 1998.
- Moulin, S., Kergoat, N., Viovy, N., Dedieu, G. Global-Scale Assessment of Vegetation Phenology Using NOAA/AVHRR Satellite Measurements, **Journal of Climate**, Boston, 10(6):1154-1170. 1997.
- Muller, E. Phenology of Woodlands Revealed by Thematic Mapper Images. **Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Série 3, Sciences de la vie**, Paris, 318(9):993-1003. 1995.
- Paruelo, J.M.; Jobbagy, E.G.; Sala, O.E.; Lauenroth, W.K.; Burke, I.C. Functional and structural convergence of temperate grassland and shrubland ecosystems. **Ecological Applications**, Washington, 8(1): 194-206. 1998.
- Reed, B.C.; Brown, J.F.; Vanderzee, D.; Loveland, T.R.; Merchant, J.W.; Ohlen, D.O. Measuring Phenological Variability from Satellite Imagery. **Journal of Vegetation Science**, Knivsta, 5(5):703-714. 1994.
- Rocha, H.R.; Freitas, H.C.; Rosolem, R.; Juarez, R.I.N.; Tannus, R.N.; Ligo, M.A.; Cabral, O.M.R.; Silva Dias, M.A.F. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado *sensu stricto*) in Southeast Brazil. **Biota Neotropica**, Campinas, 2(1):1-11. 2002.
- Roberts, E.A. **Sequential Data in Biological Experiments** – An introduction for research workers. London: Chapman & Hall. 1992. 240p.
- Roderick, M.L.; Noble, I.R.; Cridland, S.W. Estimating woody and herbaceous vegetation cover from time series satellite observations. **Global Ecology and Biogeography**, Londres, 8(6):501-508. 1999.
- Running S.W.; Collatz, G.J.; Washburne, J.; Sorooshian, S. **Earth Observing System Program - Science Plan**. Washigton: National Agency for Space and Aeronautics. p. 201-255. 1999.
- Sarmiento, G.; Monasterio, M. Life Forms and Phenology. In: Bourlière, F. (ed), **Tropical Savannas. Ecosystems of the World** n. 13. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1983. p. 79-108.
- _____; Monasterio, M. Life forms and phenology. In: Sarmiento, G. (ed.). **The ecology of tropical savannas**. Harvard: Cambrige University Press. 1984. p. 43-74.
- Santos, J.R., Shimabukuro, Y.E. O Sensoriamento Remoto como indicador das fenofases dos cerrados brasileiros: Estudo de caso com dados AVHRR-NOAA. **Anais...** Annals of VII Brazilian symposium of remote sensing, 10 a 14 de maio, Curitiba – Brazil. P. 249-257. 1993.
- Scanlon, T.M.; Albertson, J.D.; Caylor, K.K.; Williams, C.A. Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savanna ecosystem. **Remote Sensing Of Environment**, New York, 82(2-3):376-388. 2002.
- Shinoda, M. Seasonal phase lag between rainfall and vegetation activity in tropical Africa as revealed by NOAA satellite data. **International Journal of Climatology**, Chichester West, 15:639-656. 1995.
- Tucker C.J.; Townshed J.R.G.; Goff, T.E. African Land-Cover Classification Using Satellite Data. **Science**, Washington, 227(4685):369-375. 1985.
- _____. Maximum Normalized Difference Vegetation Index Images for Sub-Saharan Africa for 1983-1985. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, 7(11):1383-1384. 1986.