ANÁLISE PRELIMINAR DA VARIAÇÃO TEMPORAL DO NDVI DA BACIA DO RIO IGUAÇU

Patrícia Kazue Uda [1]; Pedro Luiz Borges Chaffe [2]; Masato Kobiyama[3] & Filipe Viezzer da Silva[4]*

Resumo – A gestão dos recursos hídricos necessita do acompanhamento sistemático da dinâmica dos fenômenos que ocorrem sobre o espaço físico. Neste sentido, as técnicas de sensoriamento remoto fornecem dados promissores para este processo de gestão. Um exemplo é o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). O NDVI vem sendo utilizado como um indicador da disponibilidade de água para plantas, na detecção de degradação ambiental pela modificação da cobertura do solo, como dado de entrada em modelos que estimam evapotranspiração, etc. O objetivo do presente estudo foi realizar uma análise preliminar da variação temporal do NDVI da bacia do rio Iguaçu (68.410 km^2), região sul do Brasil. Para tanto, foram analisadas amostras de usos e coberturas do solo de 69 imagens NDVI, datadas de 2005 a 2009, do produto MOD13Q1, do sensor MODIS. Observaram-se valores médios elevados de NDVI, próximos a 0,9, para as áreas com vegetação mais densa, ou seja, FOM e reflorestamento. A água apresentou os menores valores médios, variando de -0,10 a 0,32. Para as áreas urbanas, apresentaram baixa amplitude de valores para toda a série histórica, em média, próximos de 0,4. As áreas de agricultura apresentaram as maiores variações de NDVI, em função da variação do estágio de desenvolvimento das culturas e índice de área foliar.

Palavras-Chave – Recursos hídricos, NDVI, bacia do rio Iguaçu.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE NDVI TEMPORAL VARIATION IN THE IGUAÇU RIVER BASIN

Abstract – The management of water resources requires systematic monitoring of changes on the physical space. Thus, remote sensing techniques provide adequate data for this management process. An example is the normalized difference vegetation index (NDVI). The NDVI has been used as an indicator of water availability for plants, an indicator of environmental degradation by modifications in land use, an input data in evapotranspiration modeling, etc.. The aim of this study was to perform a preliminary analysis of the NDVI temporal variation in the Iguaçu River basin (68,410 km²), southern Brazil. Therefore, samples of land uses were analyzed 69 NDVI images, product MOD13Q1 of the MODIS sensor, dating from 2005 to 2009. The results showed that the higher NDVI average values, near 0.9, were observed in areas with dense vegetation, i.e. FOM and reforestation. Water NDVI values figured the lower averages, ranging from -0.10 to 0.32. For urban areas, little variation of means values was observed for the entire series, close to 0.4. Agricultural areas showed the greater NDVI variations, due to changes in the crop development state and leaf area index.

Keywords – Water resources, NDVI, Iguaçu River basin.

[1] Doutoranda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. patrícia.kazue@posgrad.ufsc.br
[2] Professor Dr. do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. pedro.chaffe@ufsc.br.
[3] Professor Dr. do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. masato.kobiyama@ufrgs.br.
[4] Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. fviezzerdasilva@gmail.com.

INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos necessita do acompanhamento sistemático da dinâmica dos fenômenos que ocorrem sobre o espaço físico. Isto demanda a produção de dados e/ou mapas propiciando aos gestores a visualização e a compreensão da atual situação, bem como, as mudanças ocorridas ao longo do tempo. A Lei Federal 9.433/97, que estabelece a bacia hidrográfica como a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, ainda explicita as diretrizes gerais de ação para implementação da PNRH em seus incisos II e V como sendo *"a adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País"* e *a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo".*

Nas últimas décadas, o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento orbital possibilitou que vários fenômenos fossem representados de forma espacial, fornecendo dados geográficos relevantes e parâmetros em escala temporal e espacial apropriada para uso em estudos ambientais, inclusive os relativos a recursos hídricos (FOLHES, 2007; STISEN *et al*., 2008). Dentre esses dados, há os índices de vegetação, que resultam de combinações matemáticas das refletâncias em varias faixas espectrais da radiação eletromagnética, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo (LIU, 2006). Eles são amplamente utilizados no monitoramento e na quantificação das condições e distribuições espaciais da vegetação e na discriminação de usos do solo.

O índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Defference Vegetation Index* – NDVI) é o índice mais amplamente utilizado. O NDVI baseia-se nas diferenças entre a reflectância da região do vermelho visível (devido à absorção da radiação pelos pigmentos fotossintetizantes das plantas) e da máxima reflectância na região do infra-vermelho próximo (causada pela estrutura intracelular e espalhamento nas diferentes camadas de folhas (PONZONI & SHIMABUKURO, 2010; JENSEN, 2009). Ele está altamente relacionado com uma série de parâmetros biofísicos. Segundo Aguilar *et al.* (2012), o NDVI pode ser uma ferramenta útil no estabelecimento de relações entre distribuição de vegetação, clima e variáveis hidrológicas como precipitação, além da possibilidade de ser aplicado em grandes escalas espaciais e temporais. na área de recursos hídricos, é aplicado para a identificação de áreas potencialmente susceptíveis à seca ou desertificação (e.g. ARAUJO *et al*., 2010; ROJAS *et al*., 2011), como um indicador da disponibilidade de água para plantas (e.g. HUBER *et al*., 2011; AGUILAR *et al*., 2012), na detecção de degradação ambiental pela modificação da cobertura do solo (e.g. NAKAYAMA *et al*. 2010), como um dado de entrada em modelos que estimam evapotranspiraçao, como SEBAL (e.g. BASTIAANSSEN, 1998), METRIC (e.g. FOLHES, 2007), etc.

O objetivo do presente estudo foi realizar uma análise preliminar da variação temporal do NDVI da bacia do rio Iguaçu.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Iguaçu possui área de 68.410 km^2, e localiza-se na região fronteiriça entre Paraná e Santa Catarina, conforme mostra a Figura 1. Abrange parte do planalto norte de Santa Catarina, assim como, dos Planaltos de Curitiba, de Ponta Grossa e o de Guarapuava, também chamados respectivamente de Primeiro, Segundo e Terceiro Planaltos Paranaenses. Seu rio principal, o rio Iguaçu, é o maior rio totalmente paranaense, tem sua nascente próxima a cidade de Curitiba, e possui extensão de cerca de 1.000 km, correndo no sentido lesto-oeste (CASTANHARO *et al.*, 2007) e desaguando no rio Paraná.

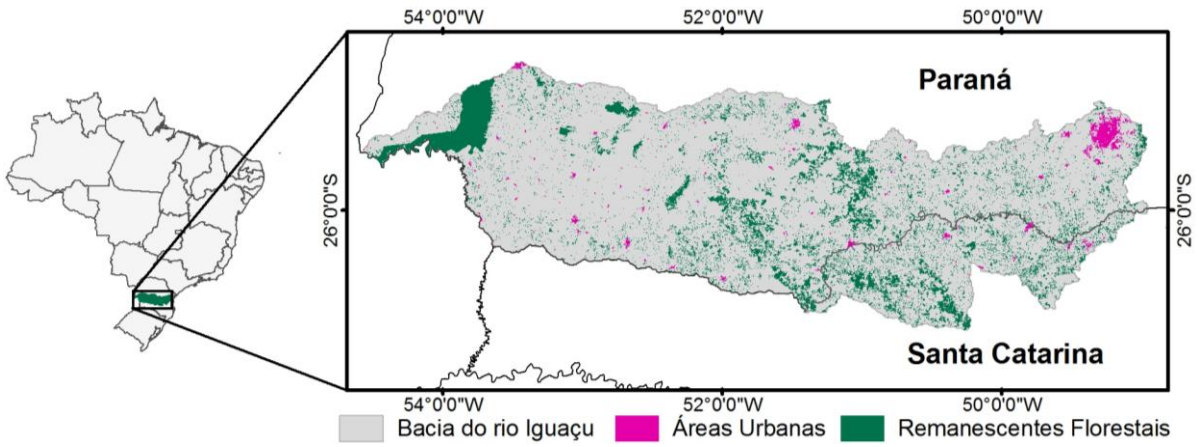

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Iguaçu.

A bacia do rio Iguaçu é uma das sub-bacias do rio Paraná. Esta, com área de 1.510.000 km^2, possui a maior concentração de usinas hidrelétricas do país e, consequentemente, a maior capacidade de geração de energia hidrelétrica e é uma das mais importantes da América do Sul economica e socialmente. A bacia do Rio Iguaçu caracteriza-se por ser a sub-bacia que concentra o maior potencial de geração de energia, tendo uma vazão específica média de 21,8 L.s^{-1}.km^{-2} enquanto que a vazão específica média do rio Paraná é de 13,9 L.s^{-1}.km^{-2} (ANA, 2001).

A maior parte da bacia enquadra-se em clima Cfb, segundo Köppen, ou seja, clima temperado; com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18^{o}C (mesotérmico), média no mês mais quente abaixo de 22^{o}C, verões frescos e sem estação seca definida. Já a parte oeste enquadra-se em clima Cfa - Clima subtropical, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18^{o}C e a média no mês mais quente acima de 22^{o}C, verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (IAPAR, 1994).

Nas cabeceiras da bacia (Região Metropolitana de Curitiba) localiza-se a maior densidade populacional e a maior concentração de atividades industriais. Em direção ao segundo e terceiro Planalto do Paraná, predomina a agropecuária, com destaque para as culturas de soja e trigo, além das pastagens. Áreas de agricultura intensiva localizam-se na região de Guarapuava, seguindo no sentido sudoeste, até a divisa com Santa Catarina (SEMA, 2000).

A vegetação original é composta basicamente por Floresta Ombrófila Mista, pertencente ao bioma Mata Atlântica, e possui algumas áreas de vegetação de várzea e campos de altitude. Atualmente, restam poucos remanescentes florestais (Figura XX) que abrigam Unidades de Conservação, sendo a maior o Parque Nacional do Iguaçu, com 230 mil hectares, localizado a oeste da bacia, próximo a seu exutório (SEMA, 2000).

MATERIAIS

Neste estudo foram utlizadas Imagens Landsat ortorretificados e com cobertura mínima de nuvens adquiridas do conjunto de dados do *Global Land Survey* (GLS), disponibilizadas no catálogo de imagens do INPE (http://www.dgi.inpe.br/CDSR/). As imagens referem-se ao ponto 78 das órbitas 220, 221, 222 e 223, datadas de 30/04/2006, 12/09/2006, 08/03/2005 e 06/10/2004, respectivamente.

Série temporal de 69 imagens NDVI, datadas de 2005 a 2009, do produto MOD13Q1, do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo da plataforma orbital TERRA. A plataforma TERRA foi lançada em dezembro de 1999, sendo parte do programa da NASA denominado *Earth Observing System* (EOS), em parceria com as agências aeroespaciais do

Japão e do Canadá. Seus produtos contribuem para o estudo de mudanças da cobertura e no uso das terras, da dinâmica de vegetações, de agricultura, temperatura da superfície, dentre outros. O sensor MODIS também está a bordo da plataforma AQUA, e tem a largura da faixa de visade de 2330 km, cobrindo toda a superfície terrestre a cada um a dois dias. Seus sensores são capazes de medir em 36 bandas espectrais, produzindo imagens de 250, 500 e 1000 metros de resolução espacial. O produto MOD13Q1 abrange imagens com 250m de resolução espacial, disponibilizadas em uma freqüência de 16 dias. É originado de dados diários de reflectância bidirecional da superfície, corrigidos dos efeitos atmosféricos e usa-se um critério de seleção de pixels em imagens obtidas em escala diária, num período regular de 16 dias. A série temporal dos produtos MOD13Q1 foi adquirida por meio da ferramenta USGS *EarthExplorer* (http://earthexplorer.usgs.gov/)

METODOLOGIA

A análise preliminar da variação temporal do NDVI da bacia do Rio Iguaçu foi realizada por meio do produto MOD13Q1, período de 2005 a 2009, englobando 69 imagens em 5 anos de dados.

O índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Different Vegetation Index - NDVI)* foi proposto por Rouse et al., em 1973. O NDVI é calculado pela diferença de refletância entre a faixa de infra-vermelho próximo e a do vermelho visível, normalizada pela divisão da soma das mesmas. Seus valores variam de +1 a -1. Valores próximos de +1 indicam vegetação densa, enquanto valores negativos indicam água. Para o MODIS, o cálculo do NDVI segue (Equação 1):

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

em que *NDVI* é o índice de vegetação da diferença normalizada; ρ_{NIR} é a refletância da banda do infravermelho próximo (0,841 a 0,876 μm); ρ_{VIS} é a refletância da banda do vermelho (0,62 a 0,67 μm).

Foram analisados os dados de NDVI para os seguintes usos e coberturas do solo da bacia: Água – área no reservatório localizado próximo a cidade de Curitiba e ao longo do rio Iguaçu; Área urbana – áreas em 16 municípios; Reflorestamento – áreas de reflorestamento no município de Rio Negrinho, no leste da bacia; Floresta (Floresta Ombrófila Mista – FOM) – áreas de FOM em remanescentes espalhados em toda a extensão da bacia; três áreas de agricultura – 1) no município de Guarapuava; 2) no município de São Miguel do Iguaçu; 3) no município de Palmas.

A determinação das amostras foi feita com base nas imagens Landsat, em função de a resolução espacial permitir mais facilmente a identificação e distinção dos alvos na superfície terrestre. Em adição, foi utilizado o mapa de remanescentes florestais da Mata Atlântica, elaborado por SOS MATA ATLÂNTICA & INPE (2009) para auxiliar a identificação e delimitação das amostras de áreas urbanas e floresta. A Tabela 1 mostra a área total das amostras para cada classe de uso e cobertura do solo e na Figura 2, visualiza-se a distribuição das mesmas.

Tabela 1: Área das amostras das classes de uso e cobertura do solo.

Classe	**Área (km^2)**	**Classe**	**Área (km^2)**
Água	7	Agricultura 1	15
Área Urbana	200	Agricultura 2	5
FOM	1291	Agricultura 3	1
Reflorestamento	45		

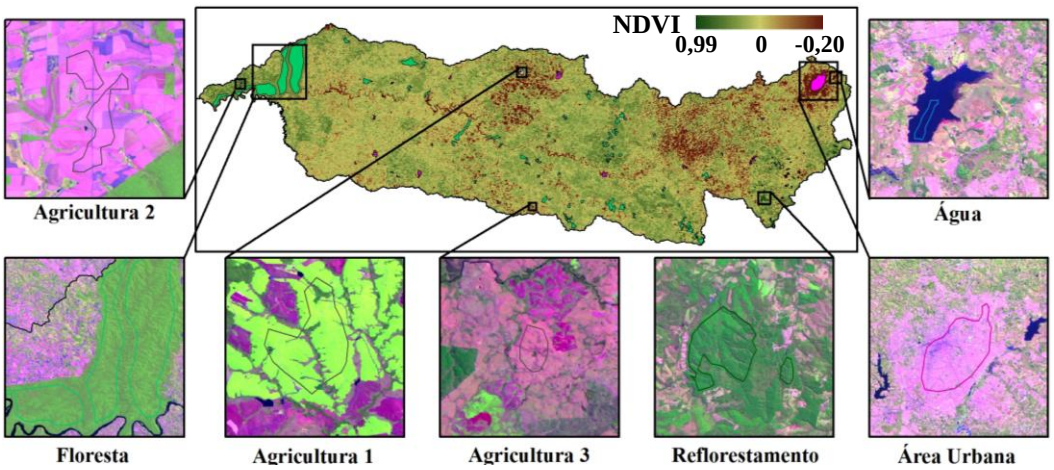

Figura 2 - Amostras selecionadas para análise estatística. No retângulo maior, uma imagem MOD13Q1, de 01/01/2005; nos retângulos menores, exemplos de amostras selecionadas das imagens Landsat (RGB 543).

RESULTADOS

A Figura 3 mostra os valores médios de NDVI para cada classe de uso e cobertura do solo de todas as 69 imagens MOD13Q1. Já a Figura 4 mostra o valor médio, mínimo e máximo do NDVI em escala mensal, evidenciando a sazonalidade do NDVI em função das estações do ano/condições climática. Os resultados obtidos estão coerentes segundo o comportamento do NDVI das diferentes coberturas do solo. Constata-se que o NDVI variou de -0,17 a 0,92 e que os dados destacam a vegetação em relação aos demais elementos, como áreas urbanas, solo exposto e corpos hídricos.

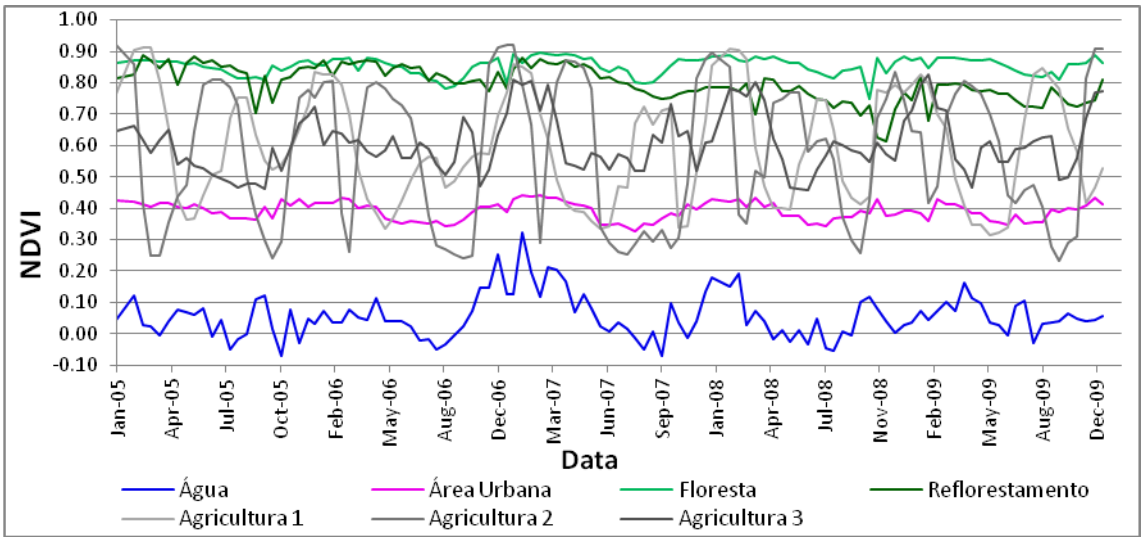

Figura 3 – valores médios de NDVI das 69 imagens NDVI MOD13Q1 analisadas.

Observaram-se valores médios elevados de NDVI para as áreas com vegetação mais densa, ou seja, FOM e reflorestamento. O NDVI para as áreas de FOM mostraram-se predominantemente constantes ao longo dos meses. Este fato pode ser explicado pela influência da seleção das amostras analisadas. Diversas amostras foram selecionadas nos remanescentes florestais, em sua maioria com área pequena (90 amostras com área média de 8 km^2, num total de 699 km^2). No entanto, 3 amostras selecionadas no Parque Nacional do Iguaçu somaram aproximadamente 812 km^2. Portanto, mais de 54% da área total das amostras de FOM foram selecionadas em Unidade de Conservação, destinada à preservação dos ecossistemas naturais e sítios de beleza cênica.

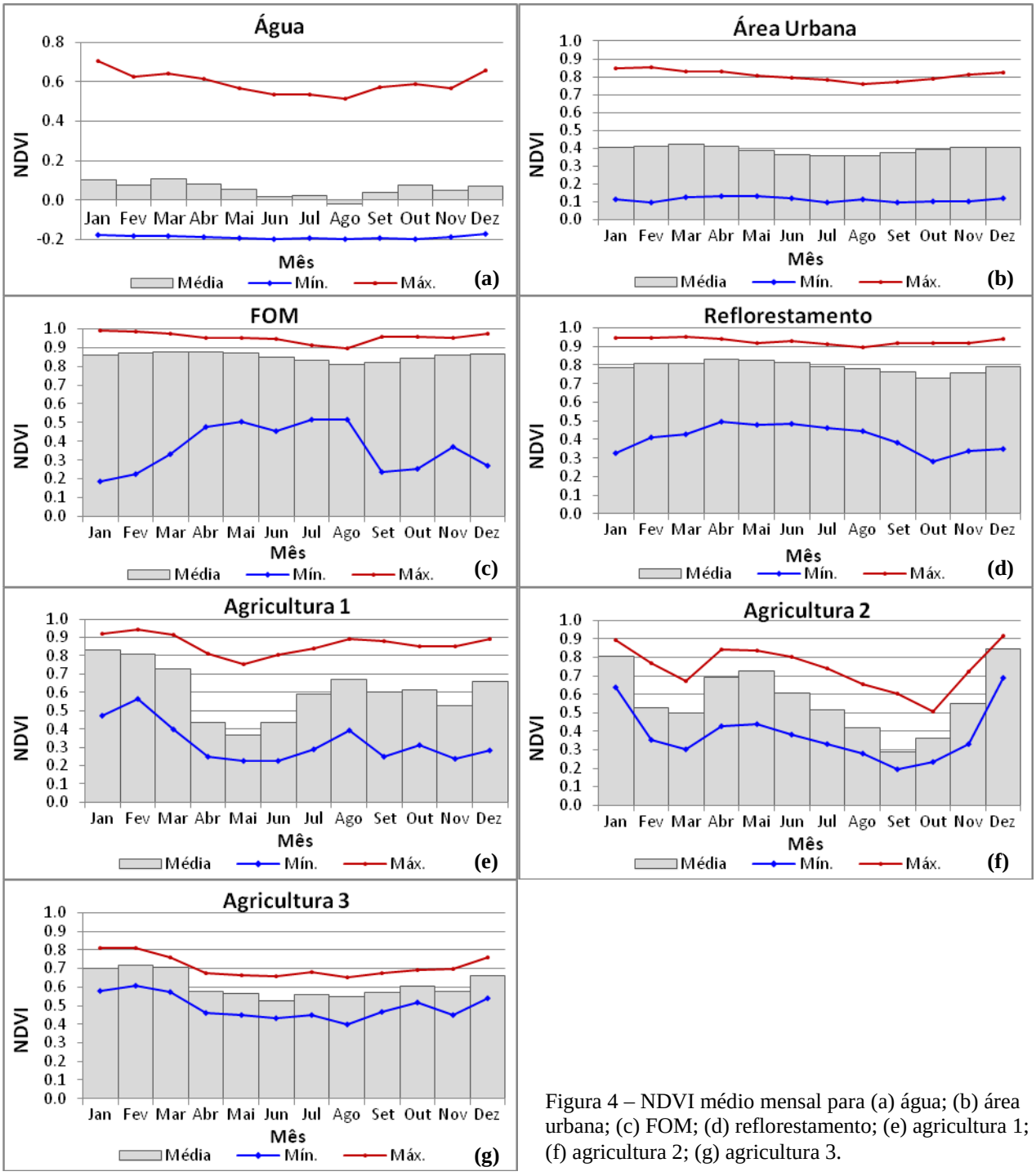

Figura 4 – NDVI médio mensal para (a) água; (b) área urbana; (c) FOM; (d) reflorestamento; (e) agricultura 1; (f) agricultura 2; (g) agricultura 3.

Como esperado, a água apresentou os menores valores médios, que variaram de -0,10 a 0,32. Houve um aumento do NDVI para a água a partir de metade do ano de 2006 até aproximadamente metade do ano de 2007, com outro pico mais elevado nos meses de janeiro e fevereiro de 2008. Isto pode estar relacionado aos períodos de seca intensa na região, diminuindo a vazão no rio Iguaçu e, consequentemente, a abrangência de seu leito, fazendo com que o solo ficasse exposto. Desta maneira, houve um aumento da reflectância das amostras coletadas, principalmente na região do infravermelho-próximo, elevando os valores de NDVI para água. Marengo (2007) constatou que em 2006 o estado do Paraná enfrentou uma das maiores estiagens de sua história e o Rio Iguaçu

apresentou sua menor vazão dos últimos 75 anos em julho de 2006. Santos & Bassegio (2011) verificaram o comportamento da precipitação na região de Cascavel-PR. Os autores constataram que o período mais seco na série histórica de 2000 a 2009 foi nos anos de 2006 e 2007, com os extremos meses de maio de 2006 (7 mm) e junho de 2007 (8,4 mm).

Os valores de NDVI para as áreas urbanas apresentaram uma baixa amplitude de seus valores para toda a série histórica. Em média, ficaram próximos de 0,4 (Figura 4), dentro de um intervalo esperado, ou seja, abaixo dos valores que caracterizam vegetação (mais próximos de 1) e acima dos valores representativos de água (negativos ou mais próximos de -1) (Figura 3).

As áreas de agricultura apresentaram as maiores variações de NDVI, em função da variação do estágio de desenvolvimento das culturas e índice de área foliar. As áreas de agricultura 1 e 2 apresentaram maiores amplitudes variação de NDVI ao longo dos meses, em relação a área de agricultura 3. Seus máximos valores chegaram próximos a 0,7 (indicando alto vigor vegetativo, cultura em estágio avançado de desenvolvimento) e, os mínimos, inferiores aos obtidos para área urbana e próximos a 0,30. Os baixos valores podem indicam uma provável época de colheita da safra, com plantas secas ou com solo exposto resultando em uma significante diminuição da reflectância na região do espectro do infra-vermelho próximo. Conforme pode ser visualizado na Figura 4, a área de agricultura 1, localizada próxima ao município de Guarapuava, no Paraná e destaca-se pela plantação de milho, com pico de produtividade nos meses de janeiro fevereiro e março (em que o NDVI médio foi de 0,83, 0,81 e 0,73, respectivamente, e as máximas próximas a 0,9). Visto que o estado do Paraná é um grande produtor de milho e soja, torna-se importante o monitoramento da variação do NDVI ao longo dos meses, que está intimamente ligada à produção de biomassa e, consequentemente, ao consumo de água pelas plantas, às taxas evapotranspirativas da região e, por fim, ao balanço hídrico das bacias em questão. Com relação à área de agricultura 3, que está situada próxima à divisa com o estado de Santa Catarina, a menor variação do NDVI pode ser constatado tanto na Figura 3, quanto na Figura 4. Isto indica que esta área possui plantio contínuo, com revezamento de culturas, sendo pelo menos uma delas de baixo porte, visto a predominância de NDVI não tão elevados.

CONCLUSÕES

As imagens NDVI possibilitaram a distinção dos diferentes usos e coberturas do solo da bacia do rio Iguaçu, ou seja, da vegetação em relação aos demais elementos, como áreas urbanas e água. Ressalta-se a importância de uma análise mais aprofundada e detalhada da variação do NDVI, utilizando toda a série histórica de imagens MODIS, tanto do satélite TERRA, quanto do AQUA. Isto pode auxiliar na compreensão, por exemplo, dos processos de degradação da cobertura do solo e sua relação com os recursos hídricos da bacia.

A grande variação do NDVI nos diferentes dias e meses, para as áreas de agricultura, constituem importante foco de análise, visto que grande parte da bacia possui esta cobertura, e pode auxiliar no entendimento das demandas hídricas e sua sazonalidade para os plantios, e sua influencia no balanço hídrico da bacia. Eventos climáticos, como as secas, que alteram os regimes de precipitação, afetam o NDVI, como pôde ser constatado nas áreas de água. Isto indica a necessidade de se separar os impactos das atividades humanas daqueles ocasionados por mudanças climáticas no estudo dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, C.; Zinnert, J.C.; POLO, M.J.; YOUNG, D.R. NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation. *Ecological Indicators*, V. 23, p. 290–300, 2012.

ANA. *Bacias brasileiras do rio da Prata: Avaliações e propostas.* Brasília: ANA, 2001. 102p.

ARAUJO, I.R.; SILVA, H.P.; LOPES, A. da S.; ALENCAR, B.P.B.; SILVA; H.D.B. Cálculo de NDVI no Suporte ao Estudo de Desertificação no Município de Orocó – PE. In *Anais* do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, Jul.2010.

BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. *Journal of Hydrology*, v.212, p. 198-212, 1998.

CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R. DE F.C.; MÜLLER, I.I.; ANDRIOLO, M.V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F. Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V. 12, n.3, p. 57-68, Jul/Set 2007.

FOLHES, M.T. Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos. 189 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). INPE. São José dos Campos, 2007.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLANTICA & INPE. *Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período de 2005-2008. Relatório parcial*. Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, São Paulo. 2009.

HUBER, S.; FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, KJELD. Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*, v. 76, p. 186–195, 2011.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO DO PARANÁ. Cartas climáticas do Estado do Paraná 1994. Londrina, IAPAR, 1994. 49 p. ilust. (IAPAR, Documento, 18).

JENSEN, J. R. (1949) *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres* / tradução José Carlos Neves Epiphanio et al. São José dos Campos, SP. 2009

LIU, W. T. H. *Aplicações de Sensoriamento Remoto*. Editora UNIDERP. Campo Grande, 2006. p 217, 218, 220, 417, 811.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a Biodiversidade:Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. *Biodiversidade n^{o}. 26*, MMA, 2007.

NAKAYAMA, T.; SUN, Y.; GENG, Y. Simulation of water resource and its relation to urban activity in Dalian City, Northern China. *Global and Planetary Change*, v. 73, p. 172–185, 2010.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. *Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação.* São José dos Campos: Parêntese, 2010.

ROJAS, O.; VRIELING, A.; REMBOLD, F. Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment.* v. 115, p. 343–352, 2011.

SANTOS, R. F.; BASSEGIO, D. Comportamento histórico da precipitação e ocorrências de dias secos e chuvosos em Cascavel, Paraná. *Revista Thêma et Scientia*.v. 1, n. 1, jan – jun 2011.

SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Bacias Hidrográficas do Paraná – Série Histórica*, Curitiba, 2010.

STISEN, S.; JENSEN, K.H.; SANDHOLT, I.; GRIMES, D.I.F. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology*, v. 354, p. 131-148, 2008.