

Análise de tendência sazonal de série temporal de EVI (Índice de Vegetação Realçado) na bacia do Rio Pardo – SP – Brasil por meio da ferramenta Earth Trends Modeler

Demarchi, Julio Cesar¹, Fuzzo, Daniela Fernanda da Silva², Piroli, Edson Luís³

1 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista - UNESP
Rua Roberto Simonsen, 305 - Presidente Prudente/São Paulo/Brasil
julio.demarchi@gmail.com

2 Curso de Geografia/Câmpus de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista - UNESP
Avenida Renato da Costa Lima, 451 - Ourinhos/São Paulo/Brasil
silva.danielaf@gmail.com

3 Curso de Geografia/Câmpus de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista - UNESP
Avenida Renato da Costa Lima, 451 - Ourinhos/São Paulo/Brasil
piroli@ourinhos.unesp.br

RESUMO

Os fenômenos ambientais apresentam variabilidades e tendências sazonais e interanuais decorrentes de processos e causas naturais e das alterações produzidas pelo homem na superfície terrestre. O objetivo deste trabalho foi realizar a análise de tendência sazonal e interanual da série temporal de imagens do Índice de Vegetação Realçado (EVI) do satélite MODIS na bacia do Rio Pardo, São Paulo, Brasil, no período de 2001 a 2016, por meio da técnica Seasonal Trends Analysis, disponível na ferramenta Earth Trends Modeler do SIG Idrisi Taiga, para detectar tendências sazonais e interanuais no ciclo das culturas agrícolas e dos demais usos da terra. Foi realizada a análise de regressão harmônica em cada pixel das imagens da série temporal para extrair imagens dos parâmetros de forma Amplitude 0 (índice médio anual), Amplitude 1 e Fase 1 (ciclo anual), Amplitude 2 e Fase 2 (ciclo semianual). Em seguida, a tendência da série temporal foi analisada pelo operador de declividade mediana Theil-Sen e calcularam-se os parâmetros de significância Mann-Kendall p e Z. Os parâmetros de forma, as curvas sazonais ajustadas e observadas, os períodos 40 % green-up e 40 % green-down de cada classe de uso da terra e os parâmetros de significância evidenciaram a tendência de aumento de EVI ao longo do ano no final da série temporal em todas as classes de uso da terra, com exceção das culturas anuais e zonas urbanas, o aumento da duração do período verde e a existência de tendência em 28,8 % da área de estudo a $p < 0,001$.

Palabras clave: **tendência sazonal, tendência interanual, regressão harmônica, parâmetros de forma, uso da terra.**

ABSTRACT

The environmental phenomena present seasonal and inter-annual variability and trends resulting from natural processes and causes and the man-induced changes over the Earth surface. This paper aims to perform the seasonal and inter-annual trend analysis of the time series of MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) images in Pardo river basin, located in São Paulo State, Brazil, from 2001 to 2016, by means of the "Seasonal Trends Analysis" technique, available in the Earth Trends Modeler tool of the GIS Idrisi Taiga, in order to detect seasonal and inter-annual trends in the cycle of agricultural crops and the other land uses. A harmonic regression analysis was performed in each cell of the time series to extract shape parameters images, such as Amplitude 0 (mean annual index), Amplitude 1 and Phase 1 (annual cycle), Amplitude 2 and Phase 2 (semi-annual cycle). Subsequently, the trend of the time series was analyzed by the median slope operator Theil-Sen and the Mann-Kendall p and Z significance parameters were calculated. The shape parameters, the adjusted and observed seasonal curves, the 40% green-up and 40% green-down periods of each land use class and the significance parameters evidenced an increase in EVI over the year at the end of the time series in all land use classes, with the exception of annual crops and urban areas, the increase in the duration of the green period and the existence of a trend in 28.8% of the study area at $p < 0.001$.

tude 1 and Phase 1 (annual cycle), Amplitude 2 and Phase 2 (semiannual cycle). Then, the time series trend was analyzed by the Theil-Sen median slope operator and both *p* and *Z* Mann-Kendall significance parameters were calculated. The shape parameters, the adjusted and observed seasonal curves, the 40% green-up and 40% green-down periods of each land use class and the significance parameters demonstrated the increasing trend of EVI during the whole year by the end of the time series in all land use classes, except for annual crops and urban areas, besides the increasing length of the green period and the existence of trend in 28.8% of the study site at *p*<0.001 significance.

Keywords: seasonal trend, inter-annual trend, harmonic regression, shape parameters, land use.

I. INTRODUÇÃO

Os fenômenos ambientais apresentam variabilidades e tendências sazonais e interanuais, decorrentes de variações no ciclo de radiação solar global e das alterações produzidas pelo homem na superfície da Terra. As ditas mudanças climáticas globais têm efeitos diretos sobre a agricultura, os recursos hídricos, as florestas, os ecossistemas e, conseqüentemente, sobre a economia, a política e a qualidade de vida da população.

O estudo da fenologia da vegetação tem despertado interesse da comunidade científica nos últimos anos como indicador das mudanças climáticas, dada a sensibilidade da dinâmica da vegetação às variáveis climáticas. Como a detecção de dados fenológicos em campo demanda muito trabalho, tem sido frequente o uso de produtos de sensoriamento remoto orbital para o seu estudo em diversas escalas, como os índices de vegetação (Eastman, Sangermano, Machado, Rogan, & Anyamba, 2013).

Embora o índice de vegetação mais conhecido e utilizado seja o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), ele apresenta algumas desvantagens, como a não linearidade e problemas de escala, a saturação em condições de alta biomassa das folhas da vegetação e sensibilidade à reflectância do solo em condições de vegetação esparsa. Nesse sentido, o satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) disponibilizou o Índice de Vegetação Realçado (Enhanced Vegetation Index, EVI), concebido para ampliar a sensibilidade das medidas em biomas densamente florestados e áreas agrícolas, reduzindo o efeito do substrato abaixo do dossel e as fontes de ruídos de aerossóis. Este índice é mais sensível ao aumento da densidade da cobertura vegetal e aos parâmetros estruturais do dossel, como o Índice de Área Foliar (Justice et al., 1998). O índice EVI é dado pela equação [1].

$$EVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (L + \rho_{nir} + C_1\rho_{red} - C_2\rho_{blue}) \quad (1)$$

Onde: ρ_{nir} é a reflectância no canal infravermelho próximo; ρ_{red} a reflectância no comprimento de onda do vermelho; ρ_{blue} a reflectância no comprimento de onda do azul; *L* é o fator de correção para o substrato do dossel que modela a transmitância da radiação no comprimento de onda vermelho e infravermelho próximo através do dossel; C_1 e C_2 são os coeficientes que usam a banda do azul para corrigir os efeitos dos aerossóis na banda do vermelho (Justice et al., 1998).

Como os índices de vegetação são sensíveis a seus parâmetros biofísicos, eles constituem indicadores efetivos das mudanças ambientais globais, como as mudanças climáticas. Na região Sudeste do Brasil, onde se localiza o estado de São Paulo, há a tendência de aumento das chuvas intensas em até 120 mm por década, mas as chuvas se tornarão irregulares devido à diminuição da umidade proveniente da Amazônia, principalmente no período seco. Estudos publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC/ONU) apontam quedas de 30 % na

produtividade agrícola da América Latina até 2080 devido às mudanças climáticas, afetando aproximadamente 50 % das terras aráveis até 2050 em razão da desertificação e da salinização. Pesquisas simulando aumentos de temperatura de 1 a 5,8°C no Brasil identificaram riscos agroclimáticos em culturas como feijão, arroz, soja, algodão, milho e cana-de-açúcar, com reduções consideráveis na produtividade e na área apta ao cultivo em todas as culturas. As florestas, por sua vez, poderão ser afetadas por alterações nas taxas de crescimento, de regeneração (devido ao aumento da temperatura, redução da umidade e aumento dos incêndios) e pelas alterações fisiológicas nos insetos polinizadores e surgimento de novas pragas (Oliveira & Alves, 2011).

De acordo com Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015), as mudanças na vegetação ocorrem de três formas: mudança sazonal ou cíclica, direcionada pelo clima (temperatura e chuva) impactando a fenologia da planta; mudança gradual ao longo do tempo (monotônica), como alterações no manejo do solo ou a sua degradação; e mudanças abruptas a partir de um determinado ponto no tempo, que podem ser causadas por distúrbios tais como transformações repentinas em políticas de uso da terra, desmatamento, inundações, secas e incêndios.

A análise de séries temporais de índices de vegetação pode relevar tendências de alterações sazonais e interanuais relacionadas às mudanças ambientais em diferentes escalas. Nesse sentido, o SIG Idrisi (Eastman, 2009b) desenvolveu a técnica chamada Análise de Tendência Sazonal (Seasonal Trends Analysis, STA), disponível na ferramenta Earth Trends Modeler (ETM), para analisar e modelar essas tendências. A técnica compreende duas etapas de análise de séries temporais e uma etapa final de processamento para visualização e análise dos resultados. Em todas elas, a análise é realizada pixel a pixel ao longo do tempo (Eastman et al., 2009).

Na primeira etapa, as imagens de cada ano da série temporal de interesse são submetidas à análise de regressão harmônica [2], a saber:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \left\{ a_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right\} + e \quad (2)$$

Em que: α_0 é a média da série; *n* é a harmônica (um número inteiro multiplicador); *t* é o tempo; *T* é a extensão temporal da série; e *e* é o termo relativo ao erro. O número de harmônicas pode variar de 1 a *T*/2 (metade da série temporal), mas Eastman (2009a) recomenda o uso de não mais que duas harmônicas, pois ela fornece uma generalização importante da curva sazonal e quanto maior sua frequência, mais ela será afetada por ruídos sub-anuais.

Rearranjando os termos da equação após resolução e ignorando o fator de erro, a curva sazonal generalizada pode ser expressa como [3]:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \alpha_n \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi n t}{T} + \varphi_n \right) \quad (3)$$

Onde: α_n são amplitudes e φ_n são ângulos de fase variando de 0° a 360° . A sazonalidade de todos os pixels é expressa na forma de cinco imagens de parâmetros de forma harmônica para cada ano: a imagem média anual (Amplitude 0), as imagens amplitude e fase para o ciclo anual (Amplitude 1 e Fase 1) e as imagens amplitude e fase para o ciclo semi-anual da série temporal (Amplitude 2 e Fase 2).

Tendo calculado os cinco parâmetros de forma supracitados, a segunda etapa da análise de tendência sazonal consiste na verificação da existência de tendência nestes parâmetros usando o operador de declividade mediana Theil-Sen, que calcula a declividade (inclinação ou slope) de cada combinação pareada de amostras ao longo da extensão temporal da série para cada pixel individualmente [4]. A mediana dessas inclinações é utilizada para caracterizar a tendência, resultando em um mapa de tendência para cada parâmetro de forma (Eastman et al., 2009).

$$TS \text{ slope} = \operatorname{mediana} \left(\frac{X_j - X_i}{t_j - t_i} \right) \quad (4)$$

Onde: X representa o valor das amostras e t é a posição no tempo de cada amostra, em que $1 \leq j \leq n$, sendo n o tamanho da amostra (Eastman, 2009a).

A declividade mediana é um parâmetro estatístico robusto resistente ao impacto de dados discrepantes. É, portanto, muito efetiva na caracterização de tendências de pequenas séries temporais, por adotar um limiar de 29 % do tamanho da série temporal, ou seja, para que um valor discrepante (outlier) possa ser incluído no cálculo da tendência, ele deve ocorrer em pelo menos 29 % da extensão da série temporal (Teferi, Uhlenbrook, & Belket, 2015). No presente trabalho, a série temporal contém 368 imagens EVI (23 imagens por ano e 16 anos), o que significa que um valor deve estar presente em pelo menos 107 imagens ou 4,64 anos, excluindo, portanto, os efeitos dos fenômenos ENOS (El Niño - Oscilação Sul) e La Niña, cuja duração é de 12 meses e de 12 a 24 meses, respectivamente.

A ferramenta STA também calcula o parâmetro interceptação mediana [5] de cada parâmetro de forma para poder gerar representações das curvas sazonais. Isto é feito projetando a inclinação mediana através dos valores dos dados de um pixel em cada intervalo de tempo e calculando a mediana dos interceptos assim determinados (Eastman et al., 2009).

$$\operatorname{Intercepto} = X_i - \operatorname{Inclinação mediana} * t_i \quad (5)$$

É impossível resumir os cinco parâmetros de forma de curvas sazonais em apenas uma imagem, mas eles podem ser reunidos em composições coloridas RGB. A ferramenta STA produz a composição colorida Amplitude, associando a imagem Amplitude 0 ao canal vermelho, a Amplitude 1 ao canal verde e a Amplitude 2 ao canal azul. O mesmo ocorre com a imagem Fase, que aloca a imagem Amplitude 0 no canal vermelho, a Fase 1 no canal verde e a Fase 2 no canal azul (Eastman et al., 2009).

Tais composições coloridas possuem número muito elevado de classes temáticas, o que torna difícil, ou quase impossível, sua interpretação. Para facilitá-la, foi desenvolvida uma ferramenta interativa de auxílio à interpretação, na qual uma área de interesse pode ser delineada por meio de um arquivo

vetorial ou por uma amostra circular. A declividade mediana e os valores de intercepto são calculados sobre todos os pixels da amostra e curvas ajustadas de cada parâmetro de forma são criadas para o início e o final da série temporal, conforme preferência do usuário. Tais curvas são idealizadas com base nas tendências determinadas para a série inteira e, sendo plotadas no mesmo gráfico, permitem a comparação e a análise da sazonalidade. Também, é possível plotar curvas sazonais da mediana observada de um número de anos do início e do final da série temporal. Este intervalo é definido pelo usuário, descreve um período de tempo menor e apresenta mais ruídos que as curvas ajustadas (Eastman et al., 2009).

A significância dos parâmetros Theil-Sen slope e intercept pode ser analisada por meio do teste de significância Mann-Kendall, um teste não-paramétrico por meio do qual se obtém imagens dos parâmetros Z e p. A estatística Z segue a distribuição normal padrão com média zero e variância unitária sob a hipótese nula de ausência de tendência. Um valor positivo de Z indica tendência ascendente, ao passo que valores negativos de Z indicam tendência descendente. O parâmetro probabilidade (p) representa as medidas de evidência para rejeitar a hipótese nula (distribuição normal). Valores p inferiores ao intervalo de confiança são aceitos como tendência significativa, e valores superiores a este intervalo são rejeitados. Tais parâmetros são determinados pelas equações [6], [7] e [8].

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{para } S > 0 \\ 0 & \text{para } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Em que: S é o coeficiente de correlação Mann-Kendall e Var(S) é a variância de S.

$$p = 2[1 - \phi(|Z|)] \quad (7)$$

Onde:

$$\phi(|Z|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-t^2} dt \quad (8)$$

Vários pesquisadores utilizaram a Análise de Tendência Sazonal em diversos estudos de tendências sazonais e interanuais. Eastman et al. (2013) analisaram as tendências sazonais globais do índice NDVI no período de 1982-2011 e verificaram tendências de aumento dos valores médios anuais, da amplitude anual do índice de vegetação e do pico de verde no verão em diferentes áreas, prováveis reflexos das mudanças climáticas globais. Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015) estudaram as tendências interanuais e sazonais de NDVI na bacia do Alto Nilo Azul (bacia Abay), localizada na Etiópia, por meio das séries temporais de 1981-2006 (dados do Global Inventory Modeling and Mapping Studies - GIMMS) e 2001-2011 (MODIS) e verificaram aumento na tendência positiva de NDVI no primeiro período, mas tendência de redução do índice em parte dela a partir de meados da década de 2000. Os autores também identificaram cinco classes de tendências nos parâmetros combinados de NDVI médio anual, amplitude anual do NDVI e ângulo de fase (posição temporal do pico de verde da vegetação). Mishra & Chaudhuri (2015) avaliaram as ten-

dências sazonais e interanuais de imagens NDVI (MODIS) na região de Uttarakhand, nos Himalaias indianos, entre os anos 2000 e 2014, e verificaram tendências negativas nas altitudes inferiores a 800 metros e superiores a 1.600 metros, mas tendências positivas nas altitudes entre 800 e 1.600 metros. Culturas irrigadas e áreas de expansão urbana nos contrafortes dos Himalaias apresentaram tendência à redução do índice de verde, enquanto culturas de sequeiro apresentaram tendência ao aumento do verde. A maioria da região apresentou também tendência à antecipação do início da estação verde.

No Brasil, no entanto, há poucos estudos de tendências sazonais e interanuais utilizando a técnica Seasonal Trends Analysis. A área de estudo deste trabalho abrange parcialmente vinte municípios do estado de São Paulo e sua principal atividade econômica é a agricultura, responsável por constantes mudanças no uso da terra e substituição da cobertura vegetal original. Ademais, apresenta diferentes tipos de solos e climáticos, o que torna sua vegetação propícia a diferentes comportamentos sazonais e interanuais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar a análise de tendência sazonal da série temporal de imagens EVI (Índice de Vegetação Realçado) do satélite MODIS na bacia do Rio Pardo, estado de São Paulo, Brasil, no período de 2001 a 2016, por meio da ferramenta Seasonal Trends Analysis (STA), com a finalidade de detectar tendências sazonais e interanuais no ciclo das culturas agrícolas e dos demais usos da terra ao longo do período analisado.

II. MÉTODO

A. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Pardo está localizada na região Centro-Sudoeste do Estado de São Paulo, Brasil, sendo parte da Região Hidrográfica do Paraná e componente da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema. No sistema paulista de gerenciamento de recursos hídricos, faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), que contém os tributários do médio curso do Rio Paranapanema. Os principais afluentes do Rio Pardo são o Rio Claro, em sua margem direita, e o Rio Novo, na margem esquerda (Piroli, 2013).

Sua área é de 4.801,47 km² e envolve parte ou a totalidade de vinte municípios, sendo os de maior área na bacia do Rio Pardo os municípios de Avaré, Botucatu, Santa Cruz do Rio Pardo, Águas de Santa Bárbara, Iaras e Itatinga (Figura 1). Os municípios mais populosos são: Botucatu (127.370 habitantes), Ourinhos (103.026 habitantes), Avaré (82.935 habitantes), Lençóis Paulista (61.454 habitantes) e Santa Cruz do Rio Pardo (43.929 habitantes), de acordo com o Censo Demográfico 2010 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2010). Dos vinte municípios integrantes, dezesseis possuem zona urbana total ou parcial dentro da área de estudo.

Geologicamente, a bacia do Rio Pardo é constituída por formações litoestratigráficas caracterizadas por rochas sedimentares e ígneas da Bacia do Paraná e por depósitos sedimentares recentes, de idade Cenozóica. Os arenitos do Grupo Bauru (Formações Adamantina e Marília) predominam nos interflúvios, e as rochas ígneas basálticas da Formação Serra Geral acompanham os leitos e várzeas dos rios principais, além de escarpas e cornijas na região das cuestas (Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema [CBH-MP], 2007).

Estando localizada na Bacia Sedimentar do Paraná, a bacia do Rio Pardo tem suas principais nascentes no Planalto Residual de Botucatu, no reverso da cuesta, onde predominam as coli-

nas com topos amplos, cujas altitudes variam entre 600 e 900 metros, com declividade média de 10 a 20 %. A região central e a foz do Rio Pardo estão localizadas no Planalto Centro-Ocidental, cujos relevos dominantes são as colinas amplas e baixas com altitude entre 300 e 600 metros e declividade entre 10 e 20 % (Ross & Moroz, 1997). As altitudes máxima e mínima são 1.003 metros e 376 metros, perfazendo a amplitude altimétrica de 627 metros. Aproximadamente 89 % da área da bacia possui declividade inferior a 12 %, o que caracteriza seu relevo plano, tendo favorecido a ocupação agrícola, a mecanização e o desmatamento de grande parte da vegetação original (Piroli, 2013).



Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Pardo, Estado de São Paulo.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a maioria dos municípios localizados no centro, sul e leste da bacia do Rio Pardo é caracterizada pelo tipo climático Cwa, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. Os municípios de Salto Grande e Lençóis Paulista, a exemplo de grande parte dos municípios do noroeste paulista, apresentam clima do tipo Aw, tropical (megatérmico) com estação seca no inverno, e os municípios de Ourinhos e Canitar possuem clima Am, tropical monçônico com inverno seco e chuvas excessivas no verão (Miranda et al., 2005).

Nos municípios situados na porção oeste da área de estudo, o tipo de vegetação original predominante é a Floresta Estacional Semidecidual, subtipo Antrópica (Vegetação secundária e atividades agrárias). Já na porção leste destaca-se a vegetação de Cerrado, também antropizada (subtipo Atividades agrárias) (IBGE, 2004). O Inventário Florestal da Vegetação Nativa do Estado de São Paulo (São Paulo, 2009) evidencia a conservação de fragmentos florestais de cerrado na porção central da área de estudo e de fragmentos de menor tamanho de floresta estacional semidecidual nas porções oeste e leste. A maior parte da vegetação natural, no entanto, foi substituída pelas atividades agrícolas.

De acordo com Oliveira, Camargo, Rossi & Calderado Filho (1999), os principais tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio Pardo são os Latossolos Vermelhos, que ocupam a maior área na bacia, os Latossolos Vermelho-Amarelos, os Nitossolos

Vermelhos e os Argissolos Vermelho-Amarelos. Dentre eles, os mais suscetíveis à erosão são os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Argissolos Vermelho-Amarelos, sobretudo os localizados nas áreas de declividade mais elevada.

B. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se os seguintes materiais:

- Cartas topográficas do IBGE correspondentes à área de estudo, na escala 1:50.000 e equidistância entre as curvas de nível de 20 metros;
- Imagens do satélite Landsat-8, sensor Operational Land Imager (OLI), órbitas/pontos 220/76 (data de passagem: 30/07/2016) e 221/76 (data de passagem: 06/08/2016), bandas 3 (0,53 – 0,59 μm), 4 (0,64 – 0,67 μm), 5 (0,85 – 0,88 μm) e 6 (1,57 – 1,65 μm), de resolução espacial 30 metros e resolução radiométrica 16 bits, obtidas do Catálogo de Imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) - <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>;
- Imagens EVI (Índice de Vegetação Realçado) do satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), sensor Terra, produto MOD13Q1, do período de 01/01/2001 a 31/12/2016, com resolução espacial de 250 metros e resolução temporal de 16 dias, obtidas da ferramenta MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb) - <https://mrtweb.cr.usgs.gov/>;
- Sistema de Informação Geográfica Idrisi Taiga (Eastman, 2009b), com destaque para a ferramenta Earth Trends Modeler (ETM);
- Sistema de Informação Geográfica ArcMap versão 10 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2010).

C. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A base de dados da bacia hidrográfica do Rio Pardo foi elaborada no SIG ArcMap versão 10, a partir do mosaico das cartas topográficas do IBGE que a compõem. A bacia hidrográfica foi delimitada considerando os pontos cotados que representam os divisores de águas e as curvas de nível.

As imagens EVI do satélite MODIS foram reprojetaadas da projeção sinusoidal para a projeção UTM e obtidas por meio da ferramenta MRTWeb. Como elas são fornecidas em resolução radiométrica de 16 bits, no intervalo de -2.000 a 10.000, realizou-se o reescalonamento para o intervalo -0,2 a 1,0 no SIG Idrisi Taiga utilizando o fator de escala 0,0001.

Em seguida, criou-se o projeto “rio_pardo” e a série temporal de EVI no módulo “Explore” da ferramenta “Earth Trends Modeler”, definindo-se o intervalo de 16 dias, os dias Julianos correspondentes às imagens e as datas e horários de início (01/01/2001, à zero hora) e término (31/12/2016, às 23:59 horas) da série de dados.

Na sequência, gerou-se a visualização da série temporal na aba “Explore Space / Time Dynamics”, na qual se verificaram as mudanças temporais do índice EVI a partir do cubo de visualização dinâmica.

Na aba “Explore Temporal Profiles”, selecionou-se como amostra vetorial o limite da bacia do Rio Pardo para obter o gráfico de valores médios de EVI ao longo da série temporal de dezesseis anos e analisar, desta forma, as flutuações médias interanuais do índice de vegetação em cada ano da série, assim como a linha de tendência Theil-Sen.

A Análise de Tendência Sazonal foi realizada no módulo “Analysis”, aba “STA (Seasonal Trend Analysis)”. O limite da bacia hidrográfica do Rio Pardo foi utilizado como máscara para a análise. Definiu-se o período de cinco anos como intervalo de tempo para a análise das curvas sazonais observadas do início e do fim da série temporal, ou seja, 2001 a 2005 e 2012 a 2016. O número de harmônicas utilizado foi 2, conforme recomendado por Eastman et al. (2009), e optou-se por calcular a significância Mann-Kendall do parâmetro Theil-Sen. As etapas da Análise de Tendência Sazonal estão descritas na introdução deste artigo.

Para interpretar os resultados da Análise de Tendência Sazonal, utilizou-se o painel “Explore Trends” da aba “Explore”. Como as composições coloridas dos parâmetros de forma Amplitudes e Fases são difíceis de interpretar por análise visual e levando em consideração o objetivo da análise, de compreender as tendências sazonais e interanuais dos diferentes tipos de uso da terra, elaborou-se o mapa de uso da terra da bacia do Rio Pardo do período de julho/agosto de 2016. As classes de uso da terra foram individualizadas e convertidas ao formato vetorial para uso como amostra vetorial na análise dos parâmetros de forma.

Para a elaboração do mapa de uso da terra da bacia do Rio Pardo, foram utilizadas as bandas 3, 4, 5 e 6 do satélite Landsat, correspondentes às faixas do verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Inicialmente, elaborou-se o mosaico entre as imagens correspondentes às órbitas/pontos 220/76 e 221/76 que compõem a área de estudo. Em seguida, foi elaborada a composição colorida falsa-cor RGB 654, na qual as bandas utilizadas e sua combinação possibilitam a adequada identificação dos alvos por análise visual. No SIG Idrisi Taiga, a classificação de imagens por segmentação é realizada em três etapas: segmentação, geração das assinaturas espectrais dos segmentos e classificação da imagem. A primeira etapa (módulo “Segmentation”) agrupa pixels adjacentes em segmentos de imagem de acordo com a similaridade espectral entre eles, empregando a abordagem de delineamento de bacias hidrográficas para criar os segmentos segundo sua variância. Uma imagem variância derivada é tratada como imagem superfície alocando pixels a segmentos específicos baseado na similaridade de variância. Todas as bandas foram utilizadas no cálculo da segmentação, com pesos iguais. Os demais parâmetros foram: largura da janela móvel 3 x 3, tolerância de similaridade 5 (quanto maior for este índice, maiores serão o tamanho dos segmentos gerados e o grau de generalização da classificação), e pesos iguais para os fatores média e variância.

Na segunda etapa (módulo “Segtrain”), o arquivo vetorial de segmentos é sobreposto à imagem de satélite por meio da qual é possível identificar as classes de uso da terra, e o usuário define as amostras de treinamento para cada classe, criando assim suas assinaturas espectrais. Cada classe amostrada deve ter no mínimo 40 pixels de treinamento. Neste trabalho, algumas classes de uso da terra que possuem variações espectrais foram separadas em classes diferentes conforme a assinatura espectral e reclassificadas para agrupamento após o término da classificação. A classe culturas anuais, por exemplo, foi separada em seis classes de comportamentos espectrais distintos, incluindo as diferentes culturas agrícolas, diferentes densidades de cobertura vegetal e as áreas de solo exposto, uma vez que as imagens de satélite utilizadas são do período de inverno, quando o solo agrícola está em repouso ou após a colheita dos cultivos de inverno, ou ainda após a colheita da cana-de-açúcar, realizado ao longo do ano.

A etapa final da segmentação de imagens consiste na classificação por segmentação (módulo “Segclass”). O “Segclass” é um classificador de regra majoritária que utiliza uma imagem classificada do tipo pixel a pixel e um arquivo vetorial de segmentos, atribuindo a cada segmento a classe majoritária presente na classificação pixel a pixel, melhorando sua acurácia, produzindo uma classificação mais suave e preservando os limites entre os segmentos (Eastman, 2009a). Nesse sentido, foi realizada uma classificação supervisionada por máxima verossimilhança (módulo “Maxlike”) a partir das assinaturas espectrais geradas na etapa de treinamento da segmentação, e a imagem resultante foi utilizada na etapa final para produzir a classificação por segmentação. Como as áreas urbanas possuem resposta espectral heterogênea, próxima à de um solo exposto, realizou-se sua vetorização manual em tela e a rasterização sobre o mapa de uso da terra resultante da segmentação de imagem.

Para que o comportamento sazonal dos diferentes usos da terra pudesse ser analisado, as classes do mapa foram convertidas ao formato vetorial para entrada no painel de análise como amostra vetorial. A união de todos os polígonos de uma mesma classe em um mesmo indicador foi realizada no SIG ArcMap 10, de modo a se considerar toda a área ocupada por ela nos parâmetros de forma.

O painel “Explore trends” é uma ferramenta de auxílio à visualização e interpretação dos resultados da Análise de Tendência Sazonal, possuindo ferramentas para análise das tendências sazonais e das tendências interanuais. O módulo de tendências sazonais produz gráficos e informações sobre os parâmetros de forma das áreas selecionadas sobre as composições coloridas de Amplitude e Fase a partir de amostras circulares ou amostras vetoriais. Os parâmetros analisados neste trabalho, para cada classe de uso da terra, foram:

- Amplitude 0: média anual e linha de tendência Theil-Sen do índice de vegetação EVI ao longo da série temporal;
- Amplitude 1: diferença entre os valores máximo e mínimo de EVI ao longo do ano e linha de tendência Theil-Sen ao longo da série temporal;
- Fase 1: denota a temporização do pico de verdor anual expresso pelos valores EVI, representado pela posição do ponto de início da onda senoidal do verdor anual. Os valores da imagem Fase 1 variam entre 0 e 359°. Um aumento ou redução no ângulo de fase significa uma mudança no tempo de pico de verde para um período anterior ou posterior do ano, respectivamente. Cada 30° de fase indica a antecipação ou atraso de um mês no calendário anual. A redução no valor da Fase 1 representa um atraso no pico de verde ou no período de aumento de verde ao longo do ano, e o aumento deste valor significa a antecipação deste pico (Eastman et al., 2009; Teferi, Uhlenbrook, & Belket, 2015);
- Curvas sazonais ajustadas: linhas ajustadas baseadas na tendência de valores EVI nos meses do ano no primeiro ano da série temporal (linha verde) e no último ano da série (linha vermelha), determinadas ao longo de toda a série temporal. A análise das duas curvas possibilita a fácil interpretação das tendências de mudança sazonal da amostra analisada (Eastman et al., 2009a);
- Curvas sazonais observadas: representam os valores medianos observados da curva sazonal de um número determinado de anos do início e do final da série temporal (neste trabalho, cinco anos). Tais curvas apresentam mais ruídos que as curvas sazonais ajustadas, mas são utilizadas como auxílio na interpretação das variações sazonais;

- Green up/down: permite analisar as tendências na fenologia da vegetação. O parâmetro green up representa o período de maior verdor da vegetação e o parâmetro green down, o tempo de máxima perda de verde (clorofila) das plantas ao longo do ciclo anual. A ferramenta STA determina a data e horário de uma porcentagem dos intervalos de aumento e de redução do conteúdo verde. O valor padrão, utilizado neste trabalho, é de 40 % de cada período, ou seja, a data no ciclo anual em que o aumento do verde excede 40 % da trajetória completa de mínimo para máximo verde, e o momento em que excede 40 % da trajetória de máximo para mínimo teor de verde. Tal parâmetro possibilita analisar e comparar a duração do “período verde” no início e no final da série temporal. Neste trabalho, analisou-se a duração do período verde de todas as classes de uso da terra.

Os parâmetros de forma Amplitude 2 e Fase 2, que representam a amplitude do ciclo semianual e o tempo de início da curva senoidal do ciclo semianual, respectivamente, não foram analisados neste trabalho pois são de difícil interpretação (Eastman et al., 2009).

A análise de tendência interanual do painel “Explore trends” exhibe os mapas de inclinação mediana Theil-Sen (TS Slope) e os mapas dos parâmetros de significância p e Z, resultantes do teste não-paramétrico de significância Mann-Kendall.

O mapa do parâmetro de significância p apresenta escala de valores entre 0 e 1. Testaram-se neste mapa os níveis de significância de 99,9 %, 99 % e 95 %, ou seja, reclassificou-se o mapa de p em mapas booleanos, nos quais os valores $p < 0,001$, $p < 0,01$ e $p < 0,05$, considerados de tendência significativa (positiva ou negativa), tiveram valor 1 atribuído, e os valores p superiores a estes limites foram reclassificados em valor 0. Como a área com tendência significativa a 99,9 % de significância foi de 1.382,12 km², representando 28,8 % da área total da bacia do Rio Pardo, e os níveis 99 % e 95 % adicionaram 415,04 e 914,07 km² às áreas de tendência significativa, respectivamente, optou-se por adotar a significância de 99,9 % neste trabalho para as análises posteriores, considerado nível elevado de significância e cuja área representativa pode ser considerada prioritária para estudo e intervenção.

Em seguida, as áreas de significância positiva e negativa a $p < 0,001$ foram sobrepostas ao mapa do parâmetro Z de significância Mann-Kendall para verificar a força da significância e a sua distribuição espacial, assim como ao mapa TS Slope da Fase 1, de forma a avaliar as áreas de antecipação ou retardamento temporal do pico de verde anual e sua distribuição espacial. Também, foram comparadas as curvas sazonais observadas de EVI de dois municípios da bacia do Rio Pardo que apresentaram diferentes usos da terra predominantes, para verificar seu comportamento e evidenciar a importância da ferramenta STA como subsídio à gestão agrícola e ambiental municipal.

III. RESULTADOS

A variabilidade do índice de vegetação EVI na bacia hidrográfica do Rio Pardo ao longo da série temporal 2001-2016 decorre de inúmeros fatores, tais como o uso da terra e suas alterações sazonais e interanuais, o regime pluviométrico, a ocorrência de secas e geadas, os fenômenos El Niño - Oscilação Sul e La Niña, o balanço hídrico do solo, a temperatura do ar, entre outros.

A Figura 2 apresenta os valores médios mensais de EVI na bacia do Rio Pardo no período 2001-2016 e a linha de tendência obtida pelo operador Theil-Sen.

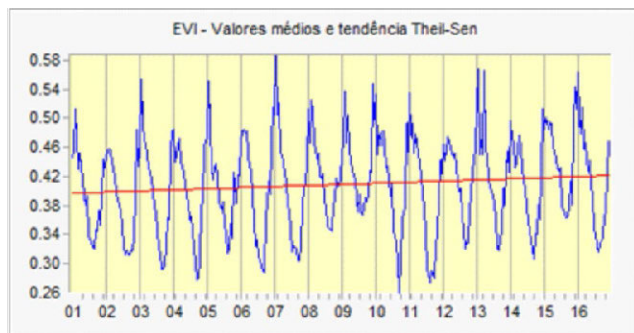


Figura 2. Valores médios mensais de EVI na bacia do Rio Pardo, SP, Brasil, no período 2001-2016 e linha de tendência Theil-Sen.

Os maiores valores máximos de EVI ocorreram no verão 2007-2008, seguido dos verões 2012-2013 e 2015-2016, correspondentes ao período chuvoso na região Sudeste do Brasil. Neste mesmo período (dezembro a fevereiro, aproximadamente), os menores valores de EVI ocorreram nos períodos 2001-2002 e 2012-2013. O período 2015-2016 foi caracterizado pela atuação do fenômeno ENOS de intensidade muito forte, e o período 2006-2007, pela ocorrência do mesmo fenômeno, mas com intensidade fraca. Embora não haja alteração comprovada no regime de chuvas na região Sudeste provocada pelo El Niño, a exemplo do que ocorre na região Sul (aumento do regime de chuvas, principalmente na primavera), pode ocorrer aumento nas temperaturas médias (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos [CPTEC], 2016), o que favorece a evapotranspiração e a ocorrência de chuvas convectivas no período, aumentando a disponibilidade hídrica para as plantas.

No período seco, os menores valores médios de EVI foram observados no inverno/primavera de 2011, seguido do ano 2012 e do ano 2004. No ano 2011 ocorreram duas geadas no centro-oeste do estado de São Paulo nos meses de junho e julho (Demarchi & Piroli, 2015), que provocaram perdas de safras ou redução do rendimento agrícola e, principalmente, a redução da atividade fotossintética das plantas. Já os maiores valores médios de EVI no período seco ocorreram nos anos 2009, 2015 e 2008, respectivamente, os quais foram influenciados pelos índices pluviométricos e, possivelmente, pela produtividade agrícola das culturas de inverno, que elevaram os valores de EVI. Em dois anos (2009 e 2015), houve atuação do fenômeno El Niño, sobretudo a partir do período chuvoso, e em 2008, atuação do fenômeno La Niña de intensidade forte, o que implica a necessidade de estudos aprofundados sobre a influência destes fenômenos climáticos de macroescala no regime pluviométrico e na vegetação da área de estudo. Os meses de menores valores médios de EVI na série temporal ocorreram entre agosto e outubro, com predomínio do mês de setembro.

A linha de tendência Theil-Sen evidencia uma tendência de aumento nos valores EVI durante a série temporal em aproximadamente 0,01. Como a Análise de Tendência Sazonal empregada neste estudo desconsidera as pequenas oscilações e ruídos até que estejam presentes em pelo menos 29 % da extensão da série temporal, os eventos climáticos destacados anteriormente têm influência reduzida ou nula na caracterização das tendências e os valores médios de EVI podem esconder variações espaciais, pois enquanto algumas áreas podem ter tendência de aumento da cobertura e atividade vegetal, outras podem ter tendência de redução das mesmas, até mesmo como consequência das mudanças no uso da terra.

A Figura 3 apresenta o mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do Rio Pardo de julho/agosto de 2016.

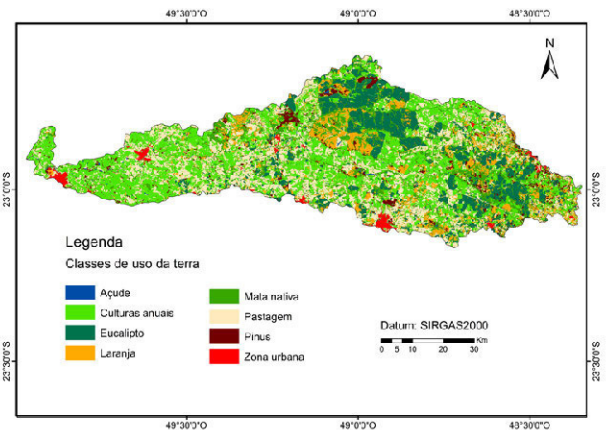


Figura 3. Mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do Rio Pardo, de julho/agosto de 2016.

As áreas ocupadas pelas classes de uso da terra, em km² e porcentagem da área total, são apresentadas na Tabela 1.

TABELA I
ÁREA DAS CLASSES DE USO DA TERRA DA BACIA DO RIO PARDO (JULHO/AGOSTO DE 2016)

USO DA TERRA	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Mata nativa	633,41	13,19
Laranja	501,93	10,45
Açude	22,34	0,47
Eucalipto	673,31	14,02
Pinus	176,95	3,69
Culturas anuais	1.600,77	33,34
Pastagem	1.124,11	23,41
Zona urbana	68,66	1,43
Total	4.801,47	100

As culturas anuais, que representam mais de 33 % da área de estudo, compreendem os cultivos de milho, soja, cultivos de inverno (plantas de cobertura, por exemplo), cana-de-açúcar (apesar do ciclo do cultivo ser de cinco anos, o solo fica descoberto durante o período do ano compreendido entre o corte e o desenvolvimento vegetativo após a rebrota, ou coberto pela palhada do período anterior) e solo exposto, os quais estão cobertos por algum cultivo em parte do ano, sobretudo no verão. Elas se distribuem por todos os municípios da bacia, mas apresentam maior concentração nos municípios de Santa Cruz do Rio Pardo, Ourinhos, Canitar, Chavantes e Ipaçu, Cerqueira César, Avaré e Iaras, com destaque para a cana-de-açúcar, que abastece algumas usinas de açúcar e álcool situadas nestes municípios.

As pastagens também se distribuem por toda a bacia hidrográfica ocupando aproximadamente 23 % de sua área. Destacam-se as pastagens extensivas, com nível médio de manejo e adoção de práticas de conservação do solo (terraços) em grande parte das áreas cuja declividade do terreno exige tal prática.

A citricultura representa mais de 10 % da área da bacia do Rio Pardo, mas está concentrada em alguns municípios nas proximidades de algumas indústrias de suco, como Santa Cruz do Rio Pardo, Águas de Santa Bárbara, Iaras, Avaré e Botucatu. O cultivo de laranja proporciona alta densidade de cobertura vegetal ao solo, pois as entrelinhas são em geral vegetadas.

O cultivo de eucalipto se concentra nos municípios de Iaras, Borebi, Lençóis Paulista, Botucatu, Itatinga e Avaré, nas porções norte e leste da bacia do Rio Pardo. Tais lavouras abastecem as indústrias de papel, celulose, madeira, de geração de energia, entre outras localizadas nos respectivos municípios. Há também, no município de Itatinga, a Fazenda

Experimental pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), que também desenvolve pesquisas na área de produção florestal e conservação do solo e da água. De acordo com Araújo Jr., Campos, Barros & Cardoso (2002), o cultivo de eucalipto substituiu áreas de cerrado, campos sujo e limpo no município de Botucatu devido aos incentivos fiscais, à instalação de companhias reflorestadoras na região, ao baixo valor das terras e à baixa fertilidade do solo, adequada para tal cultura. O cultivo de pinus ocupa área menor, mas segue os princípios da produção de eucalipto, estando localizado em áreas próximas a elas, além de ocupar também área significativa no município de Águas de Santa Bárbara.

As áreas de mata nativa estão esparsamente distribuídas sobre a bacia do Rio Pardo, nas proximidades dos cursos d’água (mata ciliar) e em fragmentos preservados. Sua área total (13,19 % da superfície da bacia), no entanto, está em desacordo com a legislação florestal brasileira (Brasil, 2012), que define em 20 % a área mínima de cada imóvel rural a ser preservada com vegetação nativa a título de Reserva Legal, além das Áreas de Preservação Permanente ao redor dos cursos d’água, nascentes, áreas de declividade superior a 45° e topos de morros com altura superior a 100 metros e declive superior a 25°. Dos 20 municípios que integram a bacia do Rio Pardo, 16 possuem toda a área urbana ou parte dela dentro da bacia, à exceção de Borebi, Lençóis Paulista, Salto Grande e São Manuel. Algumas delas, sobretudo as da porção sul, estão situadas nos divisores de água da bacia, ou seja, nos topos das colinas que caracterizam o Planalto Ocidental Paulista, pois surgiram ao redor da Estrada de Ferro Sorocabana.

As curvas de tendência sazonal ajustadas e observadas das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo resultantes da Análise de Tendência Sazonal são apresentadas na Figura 4 a seguir. Os gráficos de curvas ajustadas plotam as curvas sazonais de índice de vegetação EVI no primeiro e no último ano da série temporal (2001 e 2016), levando em consideração na análise sazonal toda a série temporal. O gráfico das curvas sazonais observadas, por sua vez, considera apenas os cinco primeiros e os cinco últimos anos da série e apresenta mais ruídos.

Os gráficos da Figura 4 evidenciam o aumento dos valores médios de EVI durante todo o ciclo anual nas classes de mata nativa, laranja, açude, eucalipto, pinus e pastagem. As diferenças entre os índices EVI no início e no final da série temporal são menores nas classes de mata nativa, açudes e pastagens, e maiores nas áreas cultivadas com eucalipto, sendo o aumento de aproximadamente 0,05. Este aumento pronunciado do vigor vegetativo das lavouras de eucalipto pode ter ocorrido em razão do plantio após o início da série temporal, em substituição a culturas anuais ou pastagens, por exemplo, do calendário de corte e desbaste, ou por alterações favoráveis nas características climáticas, que propiciaram maior desenvolvimento vegetativo e densidade de cobertura vegetal do solo. Os cultivos de laranja também apresentaram aumento significativo nos valores EVI, de aproximadamente 0,05 - 0,06, os quais também podem ser explicados pela expansão da área cultivada, pelo aumento do nível de manejo, pela vegetação das entrelinhas do cultivo, pelo crescimento das árvores, entre outros fatores. Enquanto os cultivos de laranja, os açudes, cultivos de pinus, culturas anuais, pastagens e zonas urbanas apresentam os menores índices EVI em setembro, as lavouras de eucalipto têm seus menores valores em outubro, e as matas nativas entre agosto e setembro. Tal comportamento, avaliado pelo parâmetro de forma “fase”, não apresenta variações visualmente significativas no decorrer da série temporal.

Curvas sazonais ajustadas Curvas sazonais observadas

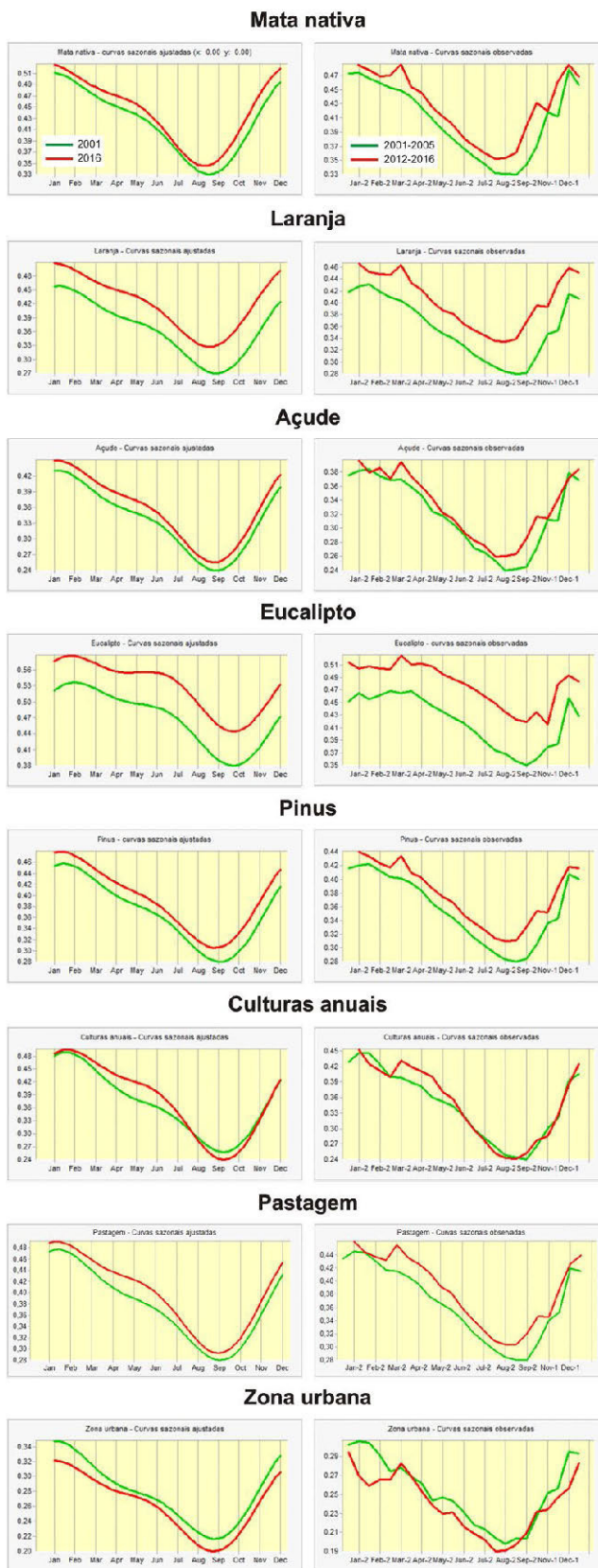


Figura 4. Curvas sazonais ajustadas (esquerda) e observadas (direita) das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

Em oposição à maioria das culturas agrícolas ou florestas nativas, as culturas anuais apresentaram nos últimos anos aumento dos valores EVI de janeiro a julho, mais pronunciado de abril a junho, mas redução em relação aos primeiros anos nos meses de setembro e outubro, além de tendência semelhante de novembro a janeiro, meses de desenvolvimento das culturas de verão. Esta característica necessita ser mais bem avaliada e interpretada, pois o tipo de cultura anual cultivado a cada ano e o seu rendimento variam em razão do seu preço de mercado, dos índices pluviométricos e temperaturas, do plantio ou não de culturas de inverno para produção e/ou cobertura e fertilização do solo, da implantação de culturas anuais durante a série temporal em substituição a áreas de pastagem ou silvícolas, e no caso da cana-de-açúcar, do calendário anual de corte estabelecido pelas usinas de açúcar e álcool. De qualquer maneira, nos meses de setembro e outubro ocorrem o preparo do solo e o plantio das culturas de verão, sendo a densidade de cobertura vegetal verde reduzida em relação aos meses anteriores mesmo em caso de manutenção dos restos culturais em sistema de plantio direto, o que pode explicar a redução nos valores de EVI. Já nos meses de março a maio, o aumento dos valores EVI pode estar associado à ampliação da área cultivada pelo milho safrinha, usualmente plantado após a colheita da soja ou milho em sistema de plantio direto, o que aumenta a densidade de cobertura vegetal e a disponibilidade de água no solo para o desenvolvimento da planta.

Em relação às zonas urbanas, a redução dos índices EVI ao longo de todo o ano de 2001 a 2016 está relacionada ao crescimento urbano, que ocupou áreas antes utilizadas para fins agrícolas.

As curvas sazonais observadas mostram que em todas as culturas houve aumento nos valores EVI no mês de março em relação ao mês de fevereiro, possivelmente em consequência dos elevados índices pluviométricos característicos dos meses anteriores. Observou-se, também, em todas as classes de uso da terra, exceto nas culturas anuais e zona urbana, uma pequena redução no índice no início do mês de novembro, em comparação com outubro, e elevação pronunciada no mês de dezembro. As curvas sazonais observadas se apresentaram, em geral, condizentes com as curvas sazonais ajustadas.

A Figura 5 apresenta os gráficos do parâmetro de forma Amplitude 0 em função do tempo (16 anos) de dados EVI da série temporal, assim como as linhas de tendência mediana Theil-Sen para cada classe de uso da terra da bacia do Rio Pardo.

O parâmetro Amplitude 0 representa valores médios anuais de EVI das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo. Com exceção da zona urbana, todos os demais usos da terra apresentaram tendência de aumento dos valores médios anuais de EVI no decorrer da série temporal. As tendências de aumento mais significativas ocorreram nas culturas de eucalipto e laranja, da ordem de 0,05. A linha de valores anuais de EVI aponta para um possível aumento da área cultivada com ambas as culturas a partir do ano 2005. A mesma tendência ocorre para as culturas de pinus e as áreas de pastagem. Observam-se também, em todos os usos da terra, dois picos de índice EVI, nos anos 2009 e 2015, anos de atuação moderada e forte do fenômeno El Niño, respectivamente, e provável aumento dos índices pluviométricos, assim como anos de baixo EVI, a exemplo dos anos 2002, 2004, 2011 e 2014, nos quais pode ter havido estresse hídrico em razão de índices pluviométricos menores e ocorrência de geadas, como no ano 2011.

A tendência de aumento global do índice EVI na bacia hidrográfica estudada pode estar relacionada a mudanças climáticas e ambientais, com reflexo positivo (aumento) nas temperaturas, regime de chuvas e umidade do solo.

Os gráficos dos parâmetros Amplitude 1 (amplitude do ciclo anual) da bacia do Rio Pardo são apresentados na Figura 6 a seguir.

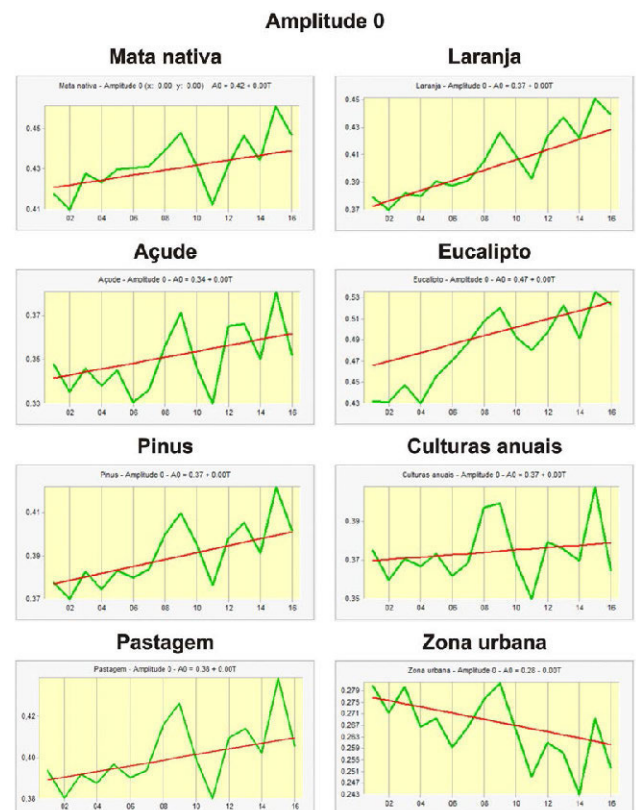


Figura 5. Amplitude 0 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

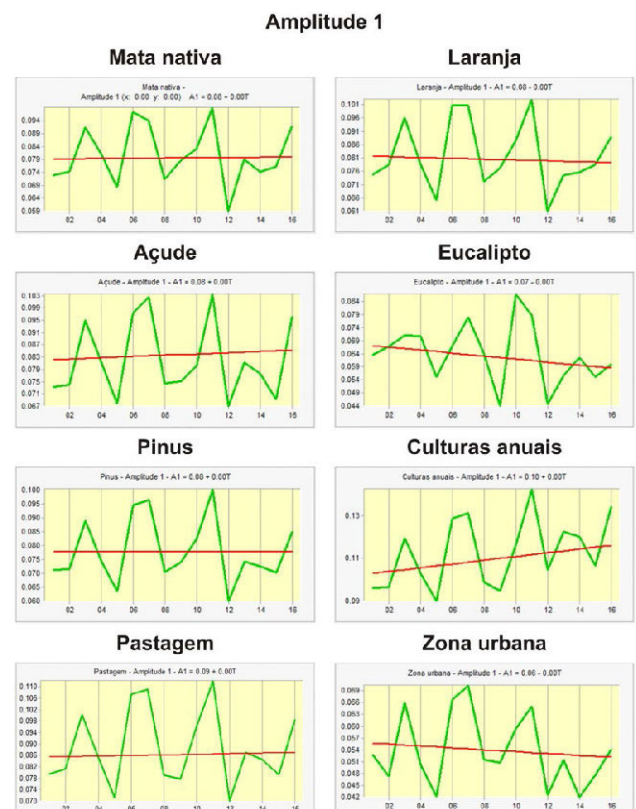


Figura 6. Amplitude 1 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

As linhas de tendência mediana indicam tendência nula de EVI no ciclo anual do cultivo de pinus; tendência positiva, porém próxima a zero, para a amplitude de valores EVI de mata nativa, açude e pastagem; tendência negativa, mas com valores próximos à nulidade, para os cultivos de laranja e eucalipto; e tendência positiva para as culturas anuais, com aumento de aproximadamente 0,01 na amplitude anual de EVI. Esta característica era esperada para as culturas anuais, uma vez que a atividade fotossintética reduz e/ou deixa de existir em determinados períodos do ano em datas variáveis a cada ano. Ademais, os cultivos de verão (milho e soja, principalmente), mas também a cana-de-açúcar, são vulneráveis a extremos climáticos tais como geadas, escassez ou excesso de chuvas e umidade do solo. No caso das zonas urbanas, que apresentaram tendência negativa de aproximadamente 0,02 na amplitude anual de EVI, o comportamento se deve à substituição de cultivos agrícolas por áreas urbanas e à consolidação destas, apresentando áreas verdes de tamanho reduzido.

Analisando individualmente os anos da série temporal, os períodos de maior amplitude de valores EVI foram 2011, 2007 e 2006, nos quais houve redução significativa do índice em função de limitações hídricas e climáticas. Nos anos 2005 e 2012, principalmente, houve variações menores de EVI, consequência provável de maior regularidade climática. Todos os usos da terra apresentaram quatro ciclos bem definidos de aumento e redução da amplitude do índice de verde no decorrer da série temporal, e um quinto ciclo que se iniciou no ano 2016.

Os gráficos do parâmetro de forma Fase 1, que indica a posição temporal do pico anual de verde da vegetação, e as linhas de tendência mediana Theil-Sen, são apresentados na Figura 7.

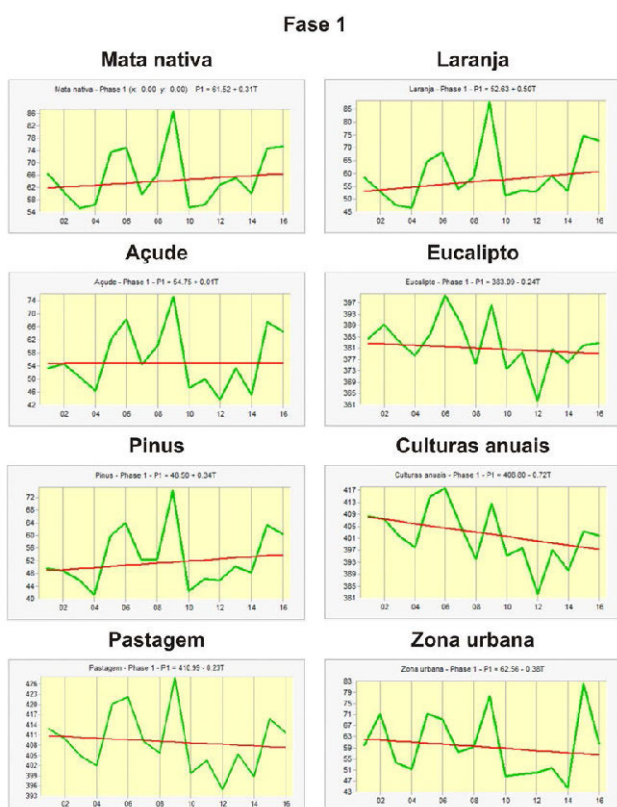


Figura 7. Fase 1 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

Os gráficos mostram a tendência de aumento no ângulo de fase durante a série temporal nas classes mata nativa, laranja

e pinus, evidenciando que o pico da onda senoidal de vigor vegetativo está iniciando antes no decorrer do ano. Porém, tal tendência é pequena, variando de 3 a 5 graus, aproximadamente, o que representa 3 a 5 dias de antecipação. As culturas agrícolas eucalipto, culturas anuais, pastagem e as zonas urbanas tiveram tendência de redução do ângulo de fase, o que significa atraso no pico de vigor vegetativo. A diferença mais pronunciada foi detectada nas culturas anuais, de aproximadamente 9°, ou 9 dias, o que pode ter tido influência de inúmeros fatores, como o atraso no plantio devido a condições climáticas adversas, a variedade de culturas plantadas ao longo dos dezesseis anos que possuem diferentes datas de plantio, o número de cultivos por ano, o uso da terra ao longo da série temporal, (pode ter havido substituição das culturas anuais por pastagem ou outro cultivo), o calendário de corte da cana-de-açúcar, entre outros. Os anos 2006, 2009 e 2015 apresentaram valores medianos elevados de Fase 1, com variações entre os diferentes usos da terra, indicando a antecipação do plantio ou de máximo desenvolvimento vegetativo das plantas em decorrência da disponibilidade hídrica.

A Tabela II apresenta as datas e horários estimados de início e término dos períodos “40 % Green-up” e “40 % Green-down” das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo, assim como as diferenças de duração do chamado “período verde” entre os anos 2001 e 2016.

TABELA II
DATAS E HORÁRIOS DE INÍCIO E TÉRMINO DOS PERÍODOS “GREEN-UP” E “GREEN-DOWN” E DURAÇÃO DO “PERÍODO VERDE” (2001-2016)

USO DA TERRA	ESTÁGIO FENOLÓGICO (40 % GREEN-UP/DOWN)	2001	2016	DIF*	DIF PV**
Mata nativa	Green-up	14/Out - 8:00	29/Set - 9:00	-14 dias	+21.98 dias
	Green-down	09/Jun - 1:00	16/Jun - 0:00	+7.98 dias	
Laranja	Green-up	25/Out - 3:00	14/Set - 15:00	-39.5 dias	+73.2 dias
	Green-down	17/Jun - 24:00	20/Jul - 16:00	+33.7 dias	
Açude	Green-up	24/Out - 11:00	13/Out - 21:00	-9.59 dias	+22.39 dias
	Green-down	16/Jun - 14:00	28/Jun - 9:00	+12.8 dias	
Eucalipto	Green-up	09/Dez - 9:00	12/Nov - 23:00	-27.4 dias	+33.6 dias
	Green-down	10/Ago - 19:00	15/Ago - 24:00	+6.2 dias	
Pinus	Green-up	31/Out - 10:00	12/Out - 20:00	-17.6 dias	+32.1 dias
	Green-down	19/Jun - 5:00	02/Jul - 17:00	+14.5 dias	
Culturas anuais	Green-up	05/Nov - 11:00	06/Nov - 18:00	+2.29 dias	+13.71 dias
	Green-down	16/Jun - 9:00	01/Jul - 7:00	+16 dias	
Pastagem	Green-up	30/Out - 19:00	20/Out - 23:00	-8.86 dias	+26.46 dias
	Green-down	16/Jun - 16:00	03/Jul - 6:00	+17.6 dias	
Zona urbana	Green-up	23/Out - 0:00	02/Nov - 17:00	+11.7 dias	-29.8 dias
	Green-down	01/Jun - 9:00	13/Mai - 7:00	-18.1 dias	

*Dif: Diferença de início do período 40 % Green-up e 40 % Green-down entre o ano final (2016) e o ano inicial (2001) da série temporal.

**Dif PV: Diferença de duração do período verde entre o ano final (2016) e o ano inicial (2001) da série temporal.

A comparação entre as datas de 40 % do período de verdejamento e de 40 % do período de redução do teor de clorofila e do vigor vegetativo da cobertura vegetal da bacia do Rio Pardo no início e no final da série temporal evidenciou que todas as culturas e florestas, com exceção das culturas anuais e da zona urbana, tiveram a data de 40 % de green-up antecipado e a data de 40 % de green-down atrasado. Destaca-se, entre os usos da terra, o cultivo de laranja, que teve aumento superior a 73 dias no período verde, possivelmente em decorrência do estabelecimento de parte das áreas cultivadas e/ou crescimento das árvores plantadas durante a série temporal. Também merecem destaque os cultivos de eucalipto e pinus, que tiveram aumento superior a um mês no período verde, devendo ser levado em

consideração seus calendários de plantio e exploração, bem como seu crescimento e aumento da cobertura do solo e fechamento do dossel no período analisado. Entre ambos os cultivos, há diferença de aproximadamente um mês entre o início do período green-up e green-down, sendo que o pinus ganha e perde biomassa verde antes do eucalipto. No caso da mata nativa, a tendência é de redução do período de perda de parte das folhas, que caracteriza a Floresta Estacional Semidecidual presente em parte da bacia do Rio Pardo. As pastagens também tiveram aumento no período verde em função da melhoria do manejo e das práticas de conservação do solo.

O período verde das culturas anuais tem a tendência de iniciar com atraso de dois dias (considerando que 2016 foi ano bissexto), no início de novembro, quando a parte vegetativa das culturas de verão começa a se desenvolver, mas o período da perda de clorofila tende a atrasar de junho ao início de julho. Para o estudo da tendência sazonal das culturas anuais, recomenda-se utilizar quatro harmônicas na análise de regressão, pois tais culturas apresentam dois períodos anuais de máxima e mínima produção de biomassa (duas safras anuais), sendo que no intervalo entre a colheita dos cultivos de verão e o estabelecimento das safras de inverno a redução da cobertura do solo e a perda de clorofila das plantas são menores.

Os parâmetros de forma e os períodos green-up/down analisados neste trabalho em função do uso da terra de julho/agosto de 2016 levaram em consideração, em sua determinação, valores medianos de EVI de toda área ocupada por cada classe de uso, que em alguns casos é superior a mil quilômetros quadrados, distribuindo-se sobre a bacia hidrográfica em diferentes tipos de solo, tipos climáticos e formas de manejo. Tais parâmetros podem variar para a mesma cultura agrícola, a exemplo do eucalipto (Figura 8), no qual as curvas sazonais ajustadas de uma área de plantio situada na porção leste da bacia são similares às apresentadas pela cultura na Figura 4, enquanto outra área de cultivo de eucalipto situada em sua porção norte apresenta curvas sazonais ajustadas em 2001 e 2016 bastante diferentes dos valores medianos da classe de uso da terra eucalipto, inclusive com tendência de redução dos valores EVI no período de fevereiro a novembro.

A significância dos parâmetros de forma mediana da análise de tendência sazonal e operador Theil-Sen slope foi avaliada pelos parâmetros de significância p e Z.

A Figura 9 apresenta as áreas de tendência significativa positiva e negativa nos níveis de significância de 95 %, 99 % e 99,9 %. O nível de significância de 95 % também inclui as áreas com tendência a 99 % e 99,9 % de significância, e o nível de significância de 99 % inclui as áreas com tendência a 99,9 % de significância.

A Tabela III apresenta as áreas com tendência significativa positiva e negativa para cada nível de significância na bacia do Rio Pardo.

A Figura 9 e a Tabela III evidenciam que quanto menor o nível de significância e, conseqüentemente, a confiabilidade dos dados, maior será a área com tendência significativa de aumento ou redução no índice de verde da vegetação. Como a área com tendência significativa a 99,9 % de significância é de 1.383,12 km², correspondente a 28,8 % da área total, considerou-se que este nível de significância garante mais confiabilidade à tendência, devendo a área representada por tal probabilidade ser tomada como prioritária para estudos posteriores, sobretudo quanto aos impactos das mudanças climáticas na atividade fotossintética e fenologia da vegetação.

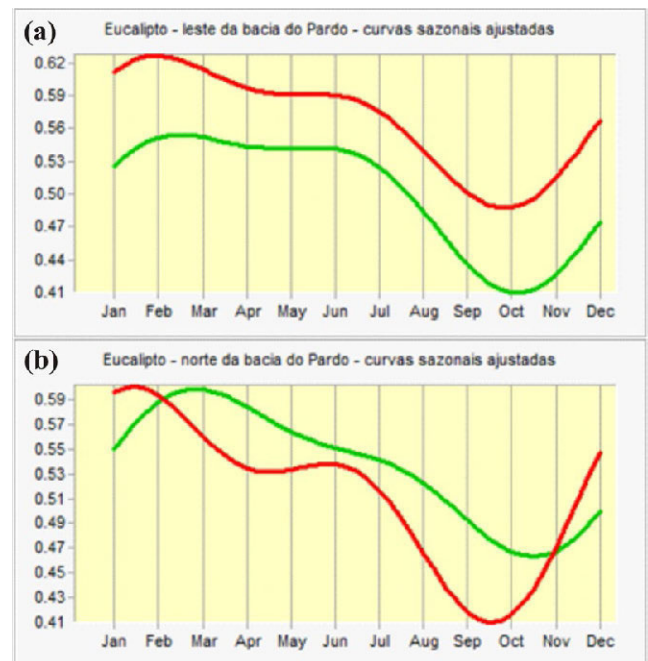


Figura 8. Curvas sazonais ajustadas de áreas de plantio de eucalipto (série temporal: 2001-2016): a) leste; b) norte da bacia do Rio Pardo (curva verde: 2001; curva vermelha: 2016).

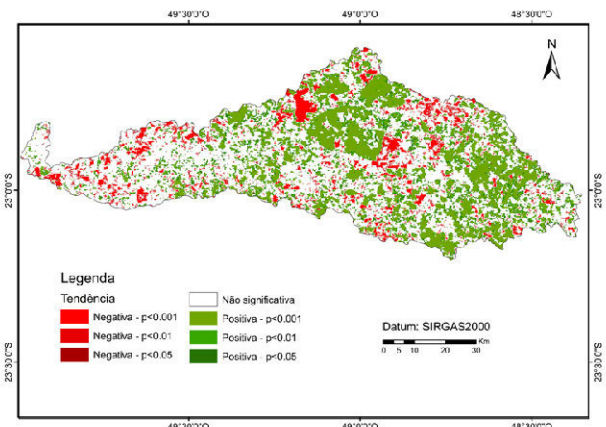


Figura 9. Bacia do Rio Pardo: áreas de tendência significativa (positiva e negativa) a 95 % (p<0,05), 99 % (p<0,01) e 99,9 % (p<0,001) de significância.

TABELA III
TENDÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA E NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA: ÁREA EM KM² E PORCENTAGEM DA ÁREA TOTAL

TENDÊNCIA E SIGNIFICÂNCIA	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Tendência negativa - p<0,001	286,06	5,96
Tendência negativa - p<0,01	441,63	9,2
Tendência negativa - p<0,05	652,16	13,58
Tendência positiva - p<0,05	1.645,03	34,26
Tendência positiva - p<0,01	1.356,53	28,25
Tendência positiva - p<0,001	1.097,06	22,85
Tendência não significativa em nenhum nível de significância	2.504,28	52,16
TOTAL	4.801,47	100

A Tabela IV apresenta a área ocupada pelas classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo com significância positiva, negativa e com tendência não significativa (p<0,001).

TABELA IV

ÁREA DAS CLASSES DE USO DA TERRA COM SIGNIFICÂNCIA POSITIVA, NEGATIVA E SEM SIGNIFICÂNCIA (P<0,001)

USO DA TERRA	TENDÊNCIA (P<0,001)	ÁREA (KM ²)	ÁREA (%)
Mata nativa	não significativa	449,64	9,37
	negativa	24,60	0,51
	positiva	159,17	3,32
Laranja	não significativa	239,34	4,99
	negativa	13,75	0,29
	positiva	248,83	5,18
Açude	não significativa	15,23	0,32
	negativa	2,24	0,05
	positiva	4,88	0,10
Eucalipto	não significativa	311,60	6,49
	negativa	14,26	0,30
	positiva	347,45	7,24
Pinus	não significativa	106,25	2,21
	negativa	17,29	0,36
	positiva	53,41	1,11
Culturas anuais	não significativa	1.334,68	27,80
	negativa	132,80	2,77
	positiva	133,29	2,78
Pastagem	não significativa	921,17	19,19
	negativa	56,08	1,17
	positiva	146,86	3,06
Zona urbana	não significativa	40,45	0,84
	negativa	25,03	0,52
	positiva	3,18	0,07
TOTAL		4.801,47	100

Os dados da Tabela IV mostram que, no total, 3.418,35 km², ou mais de 71 % da superfície da bacia do Rio Pardo não apresentam tendência significativa de EVI, com destaque para as culturas anuais e para as pastagens, cuja área total sem tendência perfaz 47,7 % da área total da bacia. Para compreender melhor a tendência sazonal e interanual das culturas anuais, no entanto, é necessário fazer um levantamento histórico dos cultivos implantados em cada área agrícola ao longo da série temporal, assim como suas datas de plantio. Merecem também destaque as florestas (mata nativa, eucalipto e pinus) e as lavouras de laranja, que por apresentarem elevada densidade de cobertura do solo e fechamento do dossel em relação aos outros usos da terra e serem culturas perenes ou naturais (mata nativa), apresentam menor suscetibilidade às flutuações climáticas.

As culturas agrícolas que apresentaram maior área com tendência significativa positiva, porém, foram eucalipto, laranja, mata nativa e pastagem, na ordem decrescente, seguidas das culturas anuais. No entanto, apenas as culturas de eucalipto e laranja apresentaram área com tendência positiva superior às áreas com tendência não significativa. Nas culturas anuais, por exemplo, a área com tendência positiva equivale a 10 % da área sem tendência. As razões para a tendência a aumento do teor de verde da vegetação já foram aqui discutidas, e podem estar relacionadas às mudanças climáticas globais.

Em relação às tendências significativas negativas, apenas as culturas anuais e as pastagens apresentam áreas superiores a 2 % e 1 %, respectivamente, da bacia do Rio Pardo. Para a compreensão deste comportamento, faz-se necessário analisar o uso da terra em todos os anos da série temporal e, no caso das culturas anuais, os dois ciclos anuais.

A Figura 10 apresenta o mapa do coeficiente Z de significância Mann-Kendall do operador de tendência interanual TS Slope da série temporal de EVI da bacia do Rio Pardo.

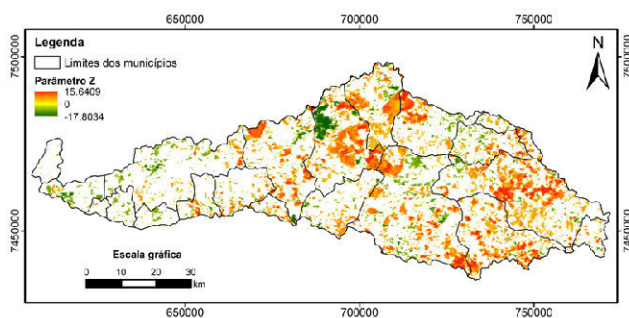


Figura 10. Coeficiente Z de significância Mann-Kendall do operador TS Slope da série temporal de EVI (2001-2016) da bacia do Rio Pardo.

Como o coeficiente Z é calculado com média padronizada de 0 e desvio padrão 1, admite-se que os valores Z situados entre -3 e +3 desvios padrões integram a distribuição normal dos dados. Neste mapa, foram excluídos os pixels de tendência não significativa a 99,9 % de significância e, como resultado, todos os pixels que apresentaram desvio padrão no intervalo da distribuição normal foram excluídos do mapa. Assim, quanto mais distantes de -3 (valores menores) e de +3 (valores maiores), maior é a probabilidade de o dado constituir um outlier, ou seja, um dado discrepante, apresentando tendência. Na bacia do Rio Pardo, em linhas gerais, apresentaram coeficiente Z positivo com tendência significativa os cultivos de laranja, eucalipto e pinus, além dos açudes e das matas nativas, e coeficiente Z negativo com tendência significativa as culturas anuais e zonas urbanas.

A Figura 11 apresenta os valores medianos do operador TS Slope da imagem do ângulo de Fase 1, que indica a posição temporal do pico de verdor anual, ou seja, o ponto de início da onda senoidal, de áreas com tendência significativa a 99,9 % de significância.

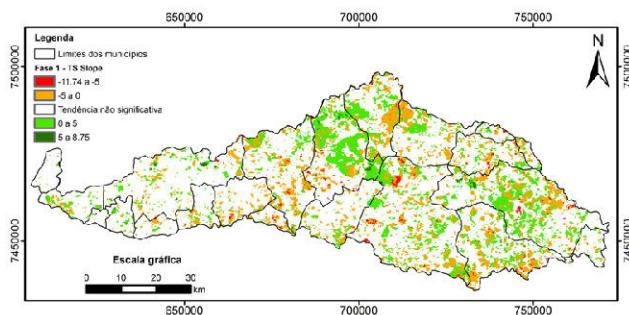


Figura 11. Tendência Theil-Sen de posição temporal do pico anual de verde (fase 1) da série temporal de EVI (2001-2016) da bacia do Rio Pardo.

O mapa indica a tendência de início do pico de verdor da vegetação. Valores positivos evidenciam tendência de antecipação do pico de atividade fotossintética da vegetação, e valores negativos, tendência de retardamento desse período fenológico. Cada ângulo corresponde a, aproximadamente, um dia. Embora todas as classes de uso da terra tenham apresentado tendência de alteração positiva e negativa no ângulo de fase, as culturas anuais apresentam tendência negativa, e culturas como eucalipto, laranja e pinus, tendência positiva. Estes dados podem subsidiar os produtores rurais e órgãos de extensão rural no planejamento agrícola das propriedades.

A Análise de Tendência Sazonal pode ser aplicada também na escala municipal para subsidiar o poder público com informações para a gestão rural e ambiental. Os gráficos da Figura 12 a seguir comparam as curvas sazonais observadas nos cin-

co primeiros anos (2001-2005) e nos últimos cinco anos (2012-2016) da série temporal em dois municípios da bacia do Rio Pardo dominados por diferentes usos da terra.

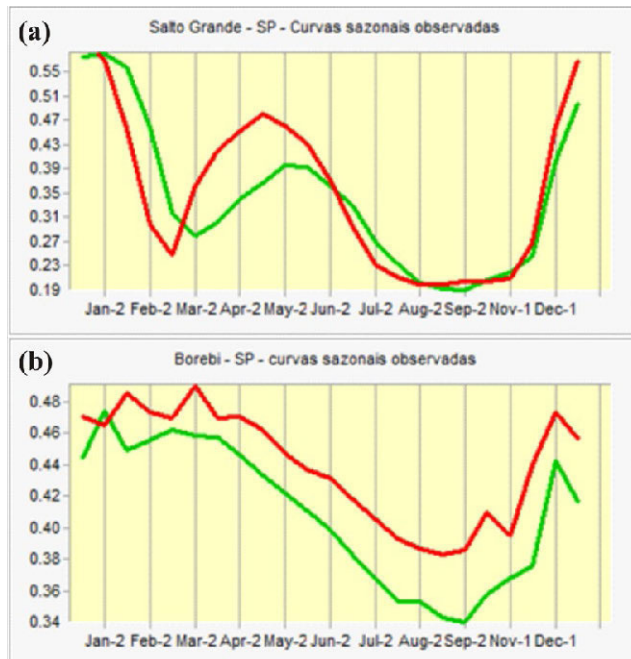


Figura 12. Curvas sazonais observadas (série temporal: 2001-2016): a) município de Salto Grande - SP; b) município de Borebi - SP (curva verde: 2001-2005; curva vermelha: 2012-2016).

Embora nenhum dos municípios tenha sido analisado na totalidade de sua área, já que partes deles não integram a bacia do Rio Pardo, ambos apresentaram comportamentos distintos de tendência do índice de vegetação EVI nos anos iniciais e finais da série temporal. O município de Salto Grande, no qual predominam as culturas anuais, com destaque para a soja (verão), o milho (verão e inverno), o trigo (inverno) e a cana-de-açúcar (todo o ano), além de mata nativa e pastagem, apresentou curvas sazonais equivalentes a dois ciclos anuais de cultivo, um deles iniciando-se em março no período 2001-2005 e em fevereiro no período 2011-2016, com término em agosto (culturas de inverno), e o outro iniciando em novembro e terminando em março (período 2001-2005) ou fevereiro (período 2012-2016). Observam-se também o aumento nos valores de EVI nos anos finais da série temporal no período de março a junho e em dezembro, períodos de máxima atividade fotossintética da vegetação nos cultivos de inverno e verão, respectivamente. Já o município de Borebi, amplamente dominado pelo cultivo de eucalipto e, secundariamente, de pinus, apresenta curvas sazonais observadas típicas dos respectivos cultivos, com aumento do índice EVI no período chuvoso (outubro a março) e redução no período seco (abril a setembro). Comparado aos anos iniciais da série, os anos finais apresentam apenas aumento nos valores medianos de EVI nos meses de outubro, fevereiro e março, e pequena redução no mês de janeiro.

IV. CONCLUSÕES

A análise de tendência sazonal e interanual do índice de verde da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Pardo por meio do índice de vegetação EVI pela técnica STA possibilitou uma primeira aproximação da compreensão da fenologia vegetal das principais culturas agrícolas e florestas naturais e cultivadas,

com destaque para as estações verdes e marrons (browning season, estação de perda da clorofila das plantas) e as suas tendências nos primeiros e últimos anos da série temporal, evidenciadas pelos parâmetros de forma mediana.

Em geral, os usos da terra agrícolas e naturais apresentaram tendência de aumento dos valores EVI ao longo de todos os meses, estações e durante a série temporal. Tal comportamento pode estar relacionado às mudanças climáticas, que propiciaram o aumento da precipitação, das temperaturas e a melhoria da disponibilidade hídrica no solo, e a fatores como manejo do solo e das pragas, época de plantio e colheita, evolução dos sistemas de cultivo, entre outros. Em relação às mudanças climáticas, os aumentos de temperatura já registrados no estado de São Paulo nas últimas décadas propiciaram o aumento do desenvolvimento vegetal, mas os cenários de maior aumento da temperatura média poderão levar a área de estudo à redução da produtividade agrícola e a restrições ao cultivo de vários produtos, conforme destacado por Oliveira & Alves (2011). Eastman et al. (2013) constataram aumento nos valores médios anuais de NDVI e da produtividade vegetal nas florestas de folhas largas e em coníferas, o aumento da amplitude anual de NDVI nas pastagens e florestas semidecíduais tropicais e temperadas, sendo o fator restritivo no período seco a umidade do solo, e o aumento do NDVI no período úmido nos biomas frios da tundra e da taiga. Os autores sugeriram que tais alterações são consequências das mudanças climáticas globais (aumento das temperaturas médias, principalmente).

No entanto, para compreender melhor as mudanças climáticas e seus impactos na agricultura e no uso da terra, recomenda-se realizar a análise de tendência sazonal e interanual dos elementos climáticos, como temperatura, precipitação e umidade do solo e do ar, pelo período mínimo de trinta anos. Destaca-se ainda a necessidade de ampliar a série temporal de imagens EVI, para possibilitar a compreensão de seu comportamento em períodos anteriores a 2001.

Com relação às culturas anuais, a variedade de culturas agrupadas em uma única classe, seus calendários de cultivo e colheita, a variedade de culturas plantadas em uma mesma área ao longo da série temporal, o manejo adotado, entre outros fatores, prejudicaram a qualidade dos resultados da análise de tendência sazonal, sendo o comportamento das curvas observadas no município de Salto Grande, tal como indicado na Figura 12.a, a característica mais provável das culturas anuais em geral no período analisado. Nesse sentido, recomenda-se a análise do uso da terra nos campos de culturas anuais ao longo de toda a série temporal e a separação das mesmas em diferentes classes conforme os tipos e combinações de culturas existentes, assim como a separação das lavouras de cana-de-açúcar para a análise de tendência sazonal, pois seu calendário de cultivo e colheita difere do das demais culturas anuais. Sugere-se ainda a adoção de quatro harmônicas para o cálculo da regressão harmônica das culturas anuais, pois apesar de constituir um modelo mais complexo, pode modelar de forma mais eficaz os dois ciclos anuais apresentados pelas referidas culturas.

A análise de significância Mann-Kendall da série temporal permitiu diferenciar as áreas de tendência significativa das áreas sem tendência de mudanças no índice EVI de acordo com diferentes níveis de confiança, assim como avaliar o grau de significância da tendência por meio do coeficiente Z. No entanto, recomenda-se nos próximos trabalhos a análise de significância pela abordagem Mann-Kendall Contextual (CMK), apresentada por Neeti & Eastman (2011) e disponível a

partir da versão Selva do SIG Idrisi, que leva em consideração a autocorrelação espacial entre pixels vizinhos e permite a redução na detecção de tendências espúrias e a ampliação da confiabilidade da tendência quando esta estiver presente.

No presente trabalho, foi dado enfoque à análise das tendências sazonais e interanuais das classes identificadas no mapa de uso da terra de julho/agosto de 2016. Recomenda-se, portanto, em trabalhos futuros, a separação e análise das classes de tendência sazonal de acordo com as combinações de va-

lores das Amplitudes e Fases sobre as composições coloridas análogas geradas pela ferramenta STA para auxílio à interpretação dos resultados, tal como realizado por Eastman et al. (2013) e Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015). Tal análise permitirá a identificação das áreas com aumento ou redução dos valores médios anuais de EVI, da amplitude do ciclo anual, do ângulo de fase, e das combinações entre esses parâmetros.

REFERÊNCIAS

- Araújo Jr., A. A., Campos, S., Barros, Z. X., & Cardoso, L. G. (2002). Diagnóstico físico conservacionista de 10 microbacias do Rio Capivara - Botucatu (SP), visando o uso racional do solo. *Irriga*, 7(2), 107-121. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2002v7n2>
- Brasil. Lei n. 12.727, de 17 de outubro de 2012. (2012). Brasília, DF: Diário Oficial da União, ano CXLIX, n. 202, p. 1-3, 18 out. 2012. Seção 1. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm
- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. (2016). El Niño. São José dos Campos: CPTEC/INPE. <http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt>
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema. (2007). Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17). São Paulo: CBH-MP. www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7037/planobacia-mp-caderno.pdf
- Demarchi, J. C. & Piroli, E. L. Análise dos efeitos de geadas na cobertura vegetal do município de Cândido Mota - SP, Brasil, por meio de índices de vegetação. (2015). *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3), 554-573. <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i3.38843>
- Eastman, J. R. (2009a). Idrisi Taiga Manual - version 16. Worcester: Clark Labs.
- Eastman, J. R. (2009b). Idrisi Taiga - GIS and Image Processing Software - version 16. Worcester: Clark Labs (software).
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti, N., Cai, Y., ..., Crema, S. (2009). Seasonal trend analysis of image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2721-2726. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160902755338>
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J. & Anyamba, A. (2013). Global Trends in Seasonality of Normal Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799-4818. <http://doi.org/10.3390/rs5104799>
- Environmental Systems Research Institute. (2010). ArcGIS / ArcMap. Professional GIS for the desktop, release 10. Redlands: ESRI (software).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Cidades@: dados do Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2004). Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE. (escala: 1:500.000).
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., ..., Barnsley, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. (1998). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249. <http://doi.org/10.1109/36.701075>
- Miranda, M. J., Pinto, H. S., Zullo Jr., J., Fagundes, R. M., Fonseca, D. B., Calve, L., & Pellegrino, G. Q. (2005). Clima dos municípios paulistas. Campinas: CEPAGRI/UNICAMP. <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>
- Mishra, N. B. & Chaudhuri, G. (2015). Spatio-temporal analysis of trends in seasonal vegetation productivity across Uttarakhnad, Indian Himalayas, 2000-2014. *Applied Geography*, 56, 29-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.10.007>
- Neeti, N. & Eastman, J. R. (2011). A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, 15(5), 599-611.
- Oliveira, J. B., Camargo, M. N., Rossi, M., & Calderado Filho, B. (1999). Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: IAC (escala: 1:500.000).
- Oliveira, R. D. F. & Alves, J. W. S. (2011). Mudanças climáticas globais no Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente.
- Piroli, E. L. (2013). Geoprocessamento aplicado ao estudo do uso da terra das áreas de preservação permanente dos corpos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pardo (Tese de livre-docência, Universidade Estadual Paulista). <http://www.ourinhos.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo/cediaggeo/materiais/geoprocessamento/dissertacoes-e-teses/>
- Ross, J. L. S. & Moroz, I. C. (1997). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: FFLCH-USP. (escala: 1:500.000).
- São Paulo. (2009). Inventário florestal da vegetação nativa do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente; Instituto Florestal; Biota/Fapesp; FundAg. <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/sifesp/2013/12/mapainventario.pdf>
- Teferi, E., Uhlenbrook, S., & Bewket, W. (2015). Inter-annual and seasonal trends of vegetation condition in the Upper Blue Nile (Abay) Basin: dual-scale time series analysis. *Earth System Dynamics*, 6, 617-636. <http://doi.org/10.5194/esd-6-617-2015>.