

ÍNDICES DE SECA PARA O ESTADO DE SÃO PAULO ATRAVÉS DO USO CONJUNTO DE IMAGENS MODIS E ESTAÇÕES CLIMÁTICAS

Antônio Heriberto de Castro Teixeira^{1} & Janice Freitas Leivas² & Gustavo Bayma-Silva³*

Resumo – O Estado de São Paulo, Brasil, tem passado por eventos de seca, enquanto que em algumas áreas ocorreram excesso hídrico para períodos e anos específicos. Estes cenários demandam estudos de balanço hídrico em larga escala para subsídio às políticas públicas. Imagens MODIS foram usadas em conjunto com dados climáticos para elaboração e aplicação de índices de seca no Estado, durante os anos de 2013 e 2015, enfatizando-se as áreas agrícolas para acesso aos riscos climáticos, e possibilidades de armazenamento de água da chuva para mitigação dos problemas de escassez hídrica. Estes índices podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica dos eventos de seca. Analisando-se os resultados para os dois anos de dados nas regiões agrícolas Assis e Itapetinga, pôde-se concluir que esta última se apresenta com condições mais úmidas, enquanto que a mesorregião Assis se mostrou com menores condições de umidade do solo, com períodos mais críticos de julho a novembro.

Palavras-Chave – precipitação, evapotranspiração, balanço hídrico.

DROUGHT INDICES FOR THE SÃO PAULO STATE THROUGHOUT THE JOINT USE OF MODIS IMAGES AND WEATHER STATIONS

Abstract – São Paulo state, Brazil, has experienced drought events, while in some places water excess occurred during specific periods and years. These scenarios require large-scale water balance studies to subsidize public policies. MODIS images were used together with weather data for elaborations and applications of drought indices in the state, during the years 2013 and 2015, highlighting the agricultural growing areas for climatic risk assessments, and to possibilities for rainfall water storage for mitigating the water scarcity problems. These indices may help a better understanding of the drought events dynamics. Analyzing the results for the two years of data in the agricultural growing regions Assis and Itapetinga, one could conclude that the last one presented better moisture conditions, while Assis agricultural growing region presented worse soil moisture conditions, with the most critical periods from July to November

Keywords – precipitation, evapotranspiration, water balance.

INTRODUÇÃO

Eventos de seca podem ocorrer em quaisquer regimes climáticos, podendo ser consequências de vários processos hidro meteorológicos como redução das precipitações e/ou limitações nas águas

^{1,2,3} Embrapa Monitoramento por Satélite: {heriberto.teixeira; janice.leivas; gustavo.bayma}@embrapa.br

* Autor Correspondente

superficiais e subterrâneas. Indicadores são frequentemente usados para o monitoramento destes eventos, dependendo das escalas espaciais e temporais (WMO e GWP, 2016).

A agricultura no estado de São Paulo tem se destacado nas últimas décadas, com elevação da demanda de água para irrigação em algumas regiões de crescimento agrícola. Por um lado, boa parte da produção, é em geral grãos, fruteiras e cana-de-açúcar para os mercados interno e externo. Por outro lado, o principal impacto entre o uso dos recursos hídricos e o ambiente é a poluição causada pela drenagem dos produtos agrícolas se tornando pior na ocorrência de eventos de seca nos anos recentes (Teixeira et al., 2015, 2016).

O objetivo deste trabalho foi combinar geotecnologias para a modelagem de índices de seca visando aplicações em largas escalas com uso de imagens de satélites e dados climáticos envolvendo as diferentes condições termo hídricas. Dados de precipitação (P) foram interpolados e o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi usado com o produto MODIS reflectância para estimativa da evapotranspiração atual (ET) (Teixeira et al., 2015, 2016). Para consideração do balanço hídrico climático e das condições de umidade na superfície, estes parâmetros foram combinados, enfatizando-se duas principais regiões agrícolas do estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. Os resultados podem ser usados para monitoramentos dos riscos de seca nas políticas públicas.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a localização do estado de São Paulo (SP), Sudeste do Brasil, a rede de estações climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a máscara agrícola em duas importantes regiões agrícolas do Estado.

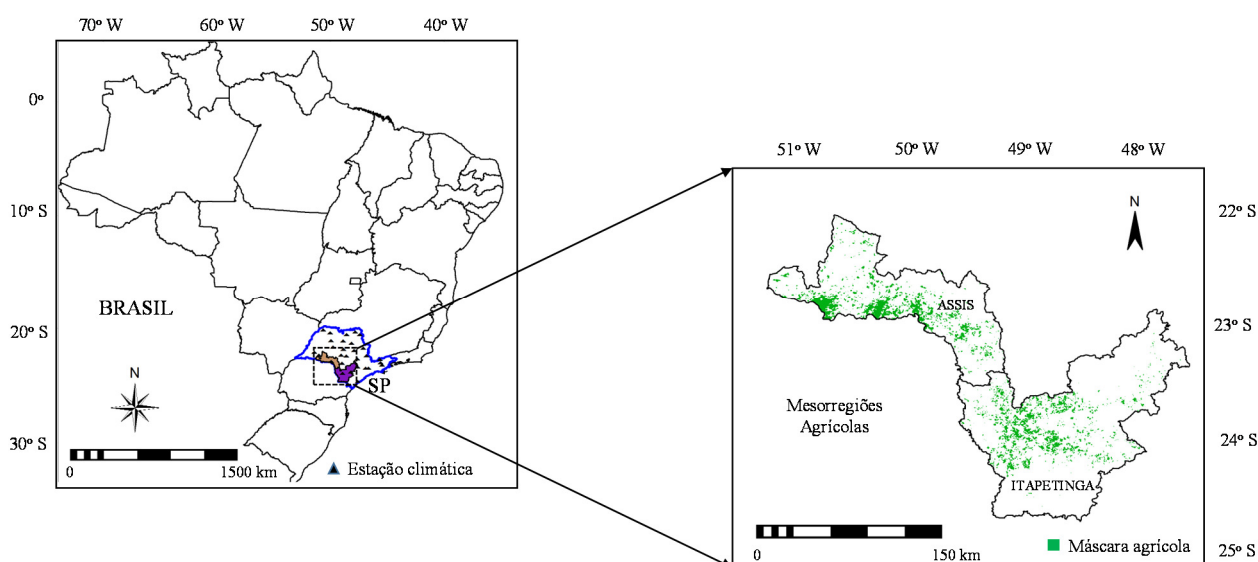


Figura 1 – Localização do estado de São Paulo (SP), Sudeste do Brasil, a rede de estações climáticas, e a máscara agrícola em duas importantes regiões agrícolas.

Os parâmetros climáticos obtidos de 31 estações climáticas do INMET foram a radiação solar global incidente (R_G), a temperatura (T_a) e umidade relativa (UR) do ar e velocidade do vento (u). Estes foram usados para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) em larga escala pelo

método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). R_G , T_a e precipitação (P) foram também usados em conjunto com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto para a aplicação dos índices hídricos. A máscara agrícola foi obtida do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e usada para aplicação dos índices de seca nas áreas agrícolas nas mesorregiões Assis e Itapetinga.

Os parâmetros climáticos de entrada foram escalados para o período de 16 dias do produto MOD13Q1 (resolução espacial de 250 m). A temperatura da superfície (T_0) foi estimada como resíduo no balanço de radiação após estimativas das emissividades da atmosfera e da superfície (Teixeira et al., 2016).

De acordo com Teixeira et al. (2016), o SAFER foi usado para obtenção do índice de umidade na zona das raízes, razão da evapotranspiração ($ET_r = ET/ET_0$)

$$ET_r = \left\{ \exp \left[f + g \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \text{NDVI}} \right) \right] \right\} \frac{ET_{0\text{ano}}}{5} \quad (1)$$

onde α_0 e T_0 são respectivamente o albedo e a temperatura da superfície, NDVI é o Índice da diferença da Vegetação Normalizado e f e g são os coeficientes de regressão originais, 1.8 e - 0.008, respectivamente. O fator de correção ($ET_{0\text{ano}}/5$) foi aplicado, em que $ET_{0\text{ano}}$ é a grade anual da ET_0 nos anos de 2013 e 2015, e 5 mm é o valor de $ET_{0\text{ano}}$ no período de modelagem original no Nordeste do Brasil.

As grades diárias de ET_0 foram multiplicadas por ET_r para obtenção da evapotranspiração atual (ET) e similarmente ao que foi realizado em larga escala na Austrália (Cleugh et al., 2007), um o índice diferença no balanço hídrico (BH_d) foi aplicado.

$$BH_d = P - ET \quad (2)$$

onde P é a precipitação obtida de interpolação dos dados de pluviômetros

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta suas tendências das médias de 16 dias das imagens MODIS para P, ET e ET_0 , em termos de Dia Juliano (DJ) dos anos de 2013 e 2015, para todo o estado de São Paulo.

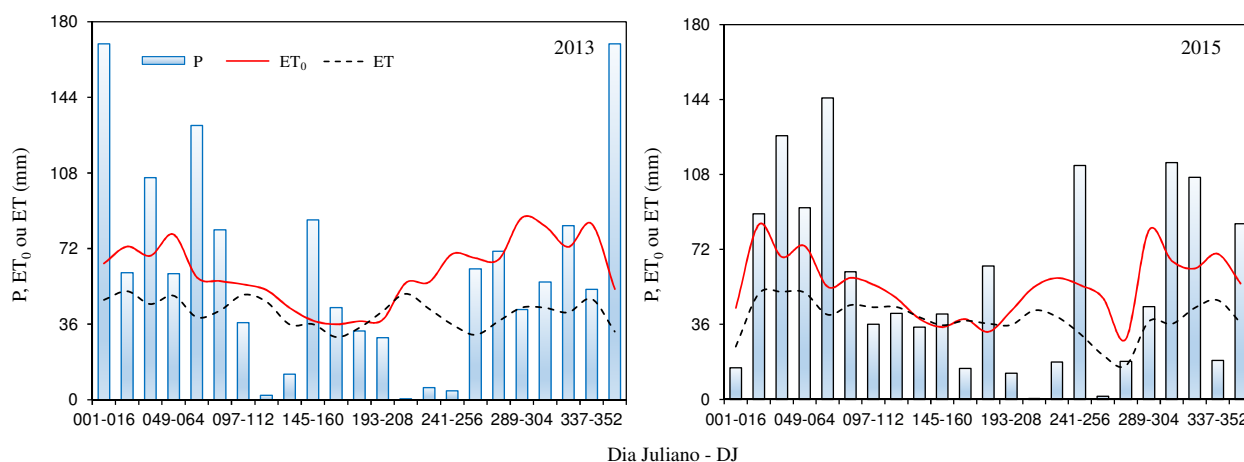


Figura 2 – Médias de 16 dias das imagens MODIS dos pixels para precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração atual (ET) durante os anos de 2013 e 2015 no estado de São Paulo (SP).

Considerando P, durante os anos de 2013 e 2015, pode-se ver dois períodos de concentração de chuvas de janeiro ao início de abril (DJ 001 a 096) e da segunda quinzena de setembro ao final de dezembro (DJ 241–365). Os períodos mais secos foram da segunda metade de junho ao final de agosto (DA 193–240), sendo que em 2015 constata-se uma precipitação quinzenal superior a 100 mm do final de agosto ao início de setembro (DJ 241-256). Considerando-se os valores anuais para todo o estado, o ano de 2015 foi o mais seco, com totais médios dos pixels de 1292 mm ano⁻¹ e o de 2013 mais úmido com 1397 mm ano⁻¹.

Com relação a demanda atmosférica, os valores de ET_0 tiveram menores oscilações ao longo dos anos, quando comparados aos de P. O período com menor demanda coincidiu com o final das estações chuvosas. Após este período ocorreram crescimentos contínuos da ET_0 da segunda metade de julho a primeira quinzena de dezembro (DJ 209 a 352) enquanto que os valores de P declinaram subindo apenas no final de setembro (DJ 273). Ao ano mais seco de 2015 correspondeu o maior valor total de ET_0 (1254 mm ano⁻¹), enquanto que o ano mais chuvoso de 2013, apresentou também a maior demanda atmosférica, com ET_0 de 1394 mm ano⁻¹.

Os valores mais elevados da ET ocorreram dentro dos períodos chuvosos, da segunda quinzena de janeiro ao início de março (DJ 017 a 064), quando os fluxos hídricos quinzenais ultrapassando 50 mm. As menores taxas nesta escala de tempo, abaixo de 30 mm, aconteceram de setembro (DJ 257) ao final da primeira quinzena de outubro (DJ 288). Considerando a escala anual para todo o estado de São Paulo, o ano com maior ET (958 mm ano⁻¹) foi 2013 enquanto que o de menor foi 2015 (892 mm ano⁻¹).

ET_0 e ET representaram respectivamente faixas entre 100% e 69% (2013) a 97% e 69% (2015) de P. Pelos cenários apresentados na Figura 2 torna-se claro que o período mais crítico com relação a escassez natural de água foi da primeira quinzena de julho (DJ 193) ao final de setembro (DJ 272). Para minimização deste problema, técnicas para armazenamento de água nas áreas previamente apresentando períodos com excesso hídrico devem ser incentivadas nas políticas públicas. Na Austrália, de acordo com Cleugh et al. (2007), a ET refletiu variações de acordo com as condições de chuvas, energia disponível e temperatura do ar.

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial dos valores médios dos pixels do índice ET_r para períodos específicos de 16 dias das imagens MODIS, envolvendo diferentes condições termo hídricas durante os anos de 2013 e 2015, no estado de São Paulo.

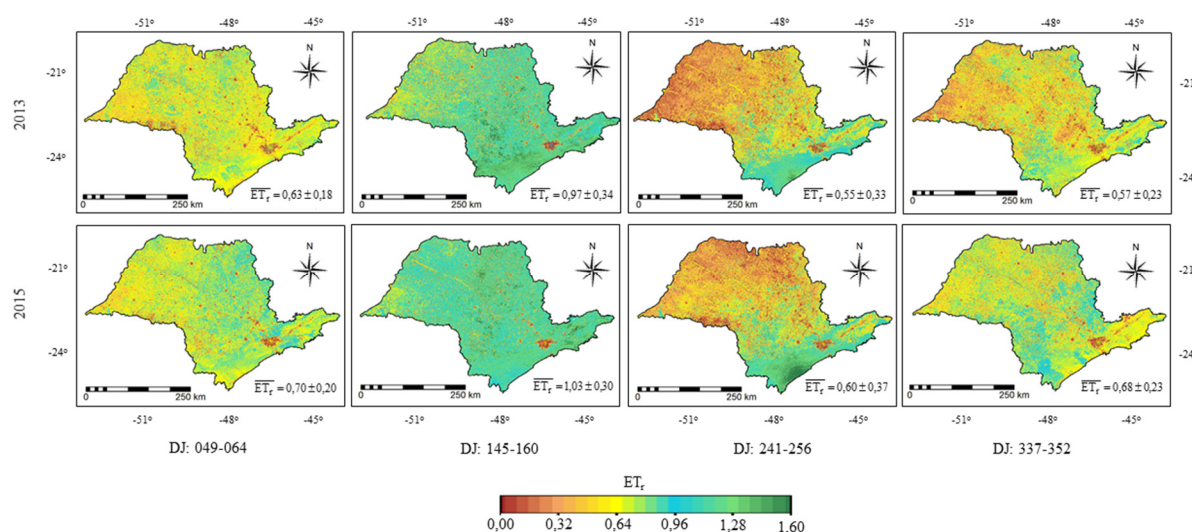


Figura 3 – Distribuição espacial dos valores médios de 16 dias para o índice ET_r durante os anos de 2013 e 2015, no estado de São Paulo. As barras significam médias dos pixels apresentadas juntamente com os desvios padrões.

As variações espaciais e temporais dos valores de ET_r são evidentes, confirmando a sensibilidade do algoritmo SAFER. As diferenças nas condições de umidade são mais fortemente notadas comparando-se os períodos de DJ 145-160 (maio a junho) no final do período chuvoso em 2015 com aquele de DJ 241-256 (agosto a setembro), período climaticamente mais seco de 2013. Os valores mais elevados, com médias acima de 0,90, ocorreram no primeiro período em ambos os anos, enquanto os menores aconteceram no segundo período, com médias ficando abaixo de 0,60 em 2013. As fortes variações do índice ET_r com as condições termo hídricas evidenciam o seu potencial para uso na identificação dos eventos de seca no monitoramento das condições da umidade do solo (Teixeira et al., 2016).

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos valores médios dos pixels do índice BH_d para períodos específicos de 16 dias das imagens MODIS, envolvendo diferentes condições termo hídricas durante os anos de 2013 e 2015, no estado de São Paulo.

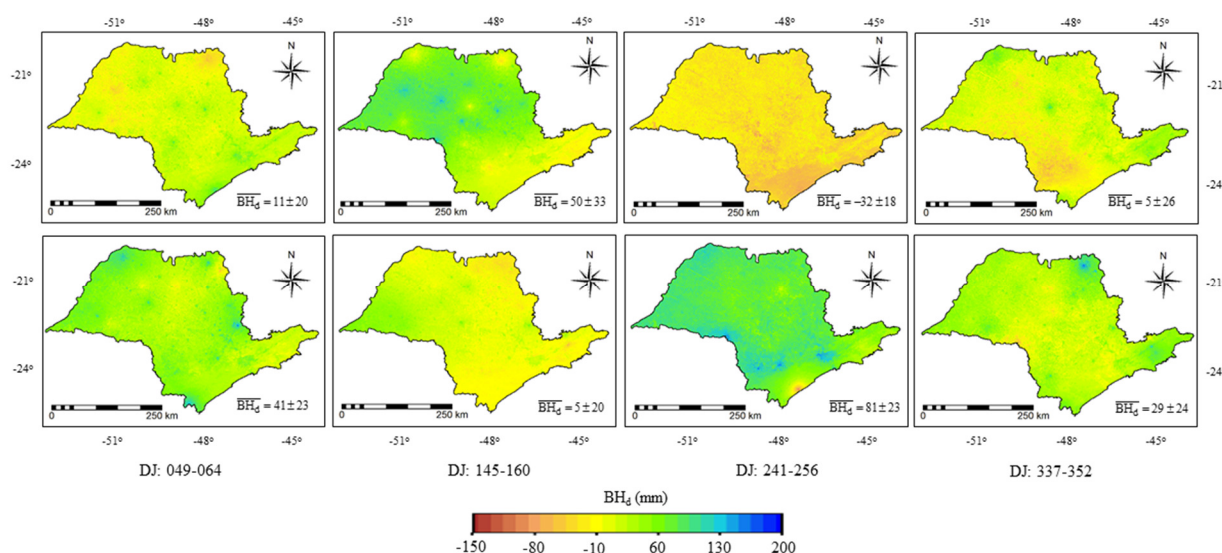


Figura 4 – Distribuição espacial dos valores médios de 16 dias para o índice BH_d durante os anos de 2013 e 2015, no estado de São Paulo. As barras significam médias dos pixels apresentadas juntamente com os desvios padrões.

As variações espaciais e temporais dos valores de BH_d são também evidentes ao longo dos anos de 2013 e 2015. Entretanto os valores positivos ($P > ET$) máximos ocorreram no período de DJ 145-160 (maio a junho) no ano de 2015 e de DJ 241 a 256 em 2013, com vários pixels acima de 100 mm neste último período. Os menores e negativos valores ($P < ET$) aconteceram com maior frequência no período de agosto a setembro em 2013 e de maio a junho em 2015, com pixels inferiores a -10 mm em grande parte do Estado. Pelas tendências dos componentes do balanço hídrico representadas pela Figuras 3 e 4 percebem-se variações ano a ano e diferentes possibilidades de armazenamento de água das chuvas para posterior uso nos períodos climaticamente mais secos.

A Figura 5 apresenta as variações estacionais dos índices hídricos ET_r e BH_d nas áreas agrícolas das mesorregiões paulistas Assis (AS) e Itapetinga (IT), para os períodos de 16 dias das imagens MODIS, ao longo dos anos de 2013 e 2015, no estado de São Paulo.

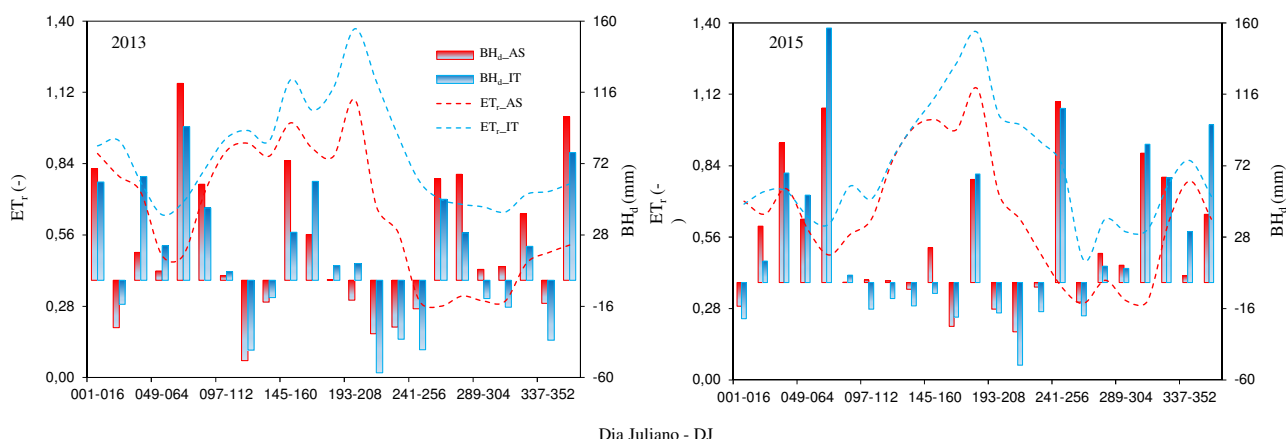


Figura 5 – Variações estacionais das médias dos pixels para os índices hídricos BH_d e ET_r , durante os anos de 2013 e 2015, nas áreas agrícolas das mesorregiões paulistas Assis (AS) e Itapetinga (IT), estado de São Paulo.

Em geral os maiores valores de ET_r foram de DJ 097(abril) a 208 (julho), chegando, em vários casos a ET ser acima de 70% da ET_0 , indicando boas condições de umidade na zona das raízes das culturas agrícolas. Por um lado, em culturas agrícolas bem irrigadas, os valores de ET_r (denominados como coeficiente de cultura – K_c), podem ser usados para estimativas dos requerimentos hídricos em diferentes escalas espaciais (Teixeira et al., 2015). Por outro lado, valores baixos da ET_r podem caracterizar as condições de estresse hídrico na zona das raízes (Lu et al., 2011).

Zang et al. (2012), estudando vegetação natural em deserto da Mongólia, China, encontraram variações de ET_r com valores médios diários de 0,16 a 0,75, sendo o limite superior desta faixa similar a várias condições das culturas agrícolas no meio dos anos do estudo corrente. Lu et al. (2011), na mesma região chinesa, reportaram valores maiores que 1,00 para seis diferentes ecossistemas, enquanto que Summer e Jacobs (2005) encontraram valores de ET_r entre 0,47 e 0,92 em pastagem não irrigada na Flórida (Estados Unidos), também similares a vários casos das áreas agrícolas do atual estudo após o período chuvoso no estado de São Paulo. Entretanto percebe-se valores inferiores de ET_r em Assis (AS) que em Itapetinga (IT), destacando melhores condições de umidade na zona das raízes ao longo de ambos os anos nesta última região agrícola, com respectivas médias de 0,64 e 0,87 para 2013 e 0,65 e 0,82 para 2015.

Zhou e Zhou (2009) concluíram que a temperatura e umidade do ar e a energia disponível foram os parâmetros mais importantes para as variações dos valores de ET_r no Nordeste da China. No atual estudo, o fator mais importante para os valores mais altos de ET_r foram os períodos prévios de abastecimento da umidade do solo pelas chuvas. Entretanto, os valores de ET_r em condições de estresse hídrico dependem também do mecanismo de regulação da abertura e fechamento dos estômatos e da adaptação das espécies às condições de escassez hídrica (Mata-González et al., 2005).

Elevados valores positivos de BH_d nas áreas agrícolas de Assis (AS) e Itapetinga (IT) indicam a magnitude dos possíveis excessos hídricos com percolação ou escoamento da água, dependendo da capacidade de retenção do solo, enquanto que valores negativos podem indicar possibilidades de deficiência hídrica natural para as plantas e necessidade de irrigação suplementar. Ao longo dos períodos estudados há maiores concentrações de valores positivos no início e final do ano nas áreas agrícolas de ambas as regiões agrícolas. Entretanto em janeiro de ambos os anos e regiões, constatam-se situações de deficiências, o que pode ter afetado a agricultura dependente de chuvas. De acordo com Cleugh et al. (2007) valores pequenos de BH_d refletem reduções de chuvas e/ou aumentos na ET . Para ambas as regiões no ano de 2015 no estudo corrente, o valor de BH_d anual foi de 25 mm

ano⁻¹, porém no ano de 2013, Assis (AS) apresentou o valor superior de 20 mm ano⁻¹ quando comparado ao de Itapetinga (IT) de 14 mm ano⁻¹.

Dentro de um ano específico, tendências similares de ET_r e BH_d entre as mesorregiões abordadas foram observadas, porém estas foram diferentes entre os anos analisados, variando principalmente com a distribuição e quantidade das chuvas (ver Figuras 2 e 5). Pelas variações dos índices hídricos nas áreas agrícolas de Assis e Itapetinga, percebe-se que, em geral, após os períodos chuvosos, mesmo em situações de BH_d negativo, a irrigação não seria necessária para satisfação dos requerimentos hídricos das culturas. Entretanto irrigações suplementares são recomendáveis, principalmente em Assis, do final de julho (DJ 209) para o final de novembro, quando os valores de ET_r caem abaixo de 0,50. Neste último caso os locais e períodos com maiores valores positivos BH_d indicam as possibilidades de armazenamento da água da chuva para posterior suplementação dos requerimentos hídricos via irrigação. Comparando-se os valores de ET_r e BH_d na Figura 5, observa-se diferentes tempos de ocorrência dos valores máximos e mínimos devido ao tempo requerido do solo recuperar a sua capacidade de armazenamento de água após as chuvas.

Devido à importância para o desenvolvimento rural diante dos cenários de escassez hídrica, a agricultura dependente de chuvas com irrigação suplementar deve ser estimulada no estado de São Paulo, principalmente na região agrícola de Itapetinga, que onde a agricultura tem possibilidade de apresentar melhor produtividade da água, como consequência de um maior retenção de umidade na zona das raízes das plantas.

CONCLUSÕES

O uso conjunto de parâmetros obtidos de imagens MODIS e dados climáticos permitiram a aplicação de índices hídricos ao longo dos anos de 2013 e 2015 no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. Estes índices podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica dos eventos de seca. Analisando-se os resultados para os dois anos de dados nas regiões agrícolas Assis e Itapetinga, pôde-se concluir que esta última se apresenta com condições mais úmidas, enquanto que a mesorregião Assis se mostrou com menores condições de umidade do solo, com períodos mais críticos de julho a novembro.

Foi demonstrado que as tendências das condições hídricas em larga escala podem ser analisadas a partir das medições das radiações espectrais das bandas do vermelho e infravermelho próximo, respectivamente bandas 1 e 2 do sensor MODIS, através da modelagem das evapotranspirações atual e de referência, no momento da passagem do satélite. A combinação das imagens com estações climáticas destaca-se no monitoramento dos componentes do balanço hídrico, contribuindo para políticas de enfrentamento dos problemas gerados pelos eventos de seca em algumas áreas do Sudeste do Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- CLEUGH, H.A.; LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S.W. (2007) Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 106, pp. 285-304.

LU, N.; CHEN, S.; WILSKE, B.; SUN, G.; CHEN, J. (2011). Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology* 4, pp. 49-60.

MATA-GONZÁLEZ, R., MCLENDON, T. AND MARTIN, D.W. (2005). The inappropriate use of crop transpiration coefficients (K_c) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: a review. *Arid Land Research and Management* 19, pp. 285-295.

SUMNER, D.M.; JACOBS, J. (2005). Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 308, pp. 81-104.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. de C.; BOLFE, E. L. (2015). Corn Water Variables Assessments from Earth Observation Data in the São Paulo State, Southeast Brazil. *Journal of Hydraulic Engineering* 1, pp. 1-11.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. (2016). Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state, Brazil. *International Journal of Remote Sensing Applications* 6, pp. 84-95.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) AND GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP) (2016): Handbook of Drought Indicators and Indicators (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.

ZHANG, F.; ZHOU, G.; WANG, Y.; YAN, F.; CHRISTER NILSSON, C. (2012). Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China. *Hydrological Processes* 26, pp. 379-386.

ZHOU, L.; ZHOU, G. (2009). Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. *Journal of Hydrology* 372, pp. 41-47.