



ZONEAMENTO DA PRODUTIVIDADE DA ÁGUA PARA A CULTURA DA SOJA NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

Antônio Heriberto de Castro Teixeira^{1} & Fernando Braz Tangerino Hernandez² & Renato
Alberto Momesso Franco³ & Ricardo Guimarães Andrade¹ & Janice Freitas Leivas¹*

Resumo – Imagens do satélite Landsat 8 e dados climáticos foram usados em conjunto para a modelagem do coeficiente de cultura (K_c) como uma função dos graus-dias acumulados (GD_{ac}) em pivôs de irrigação com a cultura da soja de ciclo médio, localizados no noroeste do Estado de São Paulo, Brasil. Com dados de produção atual (Y_a) disponíveis, o modelo foi aplicado para todo o estado para a estimativa da produtividade da água (PA) em larga escala, considerada como a razão de Y_a pelo requerimento hídrico (RH). Diferenças entre as principais regiões produtoras de grãos foram claras. Os maiores valores de PA foram para as mesorregiões do lado mais ao sul do Estado, com média de $0,78 \pm 0,08 \text{ kg m}^{-3}$ em Assis, enquanto que os menores foram para aquelas mais ao norte, com média de $0,75 \pm 0,08 \text{ kg m}^{-3}$ para Ribeirão Preto. Como a soja é uma importante cultura na região sudeste do Brasil, considerada dentro das prioridades do Ministério da Agricultura, os resultados da corrente pesquisa podem subsidiar a expansão racional da atividade, incluindo ambas as condições, com irrigação e na dependência de chuvas.

Palavras-Chave – graus-dias, coeficiente de cultura, *Glycine max L.*

ZONING OF SOYBEAN CROP WATER PRODUCTIVITY IN THE SÃO PAULO STATE, BRAZIL

Abstract – Landsat 8 satellite images together with weather data were coupled for modelling crop coefficient (K_c) as a function of the accumulated degree-days (DD_{ac}) in irrigation pivots with soybean crop of average growing season in the northwestern side of the São Paulo state, Brazil. With the availability of data on actual production (Y_a), the model was applied in the whole state for estimations of the water productivity (WP), considered as the ratio of Y_a to the water requirements (WR). Differences among the grain production growing regions were clear. The highest PA values were for those located at the southern side of the state, with average of $0.78 \pm 0.08 \text{ kg m}^{-3}$ for Assis, while the lowest ones were in the northern side, averaging $0.75 \pm 0.08 \text{ kg m}^{-3}$ in Ribeirão Preto. As soybean is an important crop in the Southeast region of Brazil, being inside of the National Agricultural Ministry priorities, the results of the current research can subsidize the rational expansion of the activity, including both conditions, irrigated and rainfed.

Keywords – degree-days, crop coefficient, *Glycine max L.*

INTRODUÇÃO

Na região Sudeste do Brasil, uma das mais importantes culturas agrícolas é a soja (*Glycine max L.*). Incrementos na produção e redução dos custos e dos riscos climáticos são fundamentais para a sustentabilidade do seu cultivo comercial. A queda de produção de grãos no Brasil tem como uma das principais causas a ocorrência de estiagens, principalmente nos estados da região Sudeste do

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite: heriberto.teixeira@embrapa.br; ricardo.andrade@embrapa.br e janice.leivas@embrapa.br.

² Universidade Estadual Paulista: fbthtang@agr.feis.unesp.br e bioramfranco@yahoo.com.br.

*Autor Correspondente



País. Com os cenários de escassez hídrica, um melhor entendimento dos componentes da produtividade da água (PA) pode contribuir com a redução de riscos de insucesso da exploração comercial da cultura.

De acordo com Payero e Irmak (2013), diferentes condições climáticas afetam o acúmulo dos graus-dias, o desenvolvimento da cultura, a evapotranspiração (ET) e o coeficiente de cultura (K_c). A disponibilidade de água é importante, principalmente em dois períodos de desenvolvimento das plantas: germinação-emergência e floração-enchimento de grão. No primeiro período, tanto o excesso como a deficiência de água é prejudicial à produção de grãos. A ET está diretamente ligada à esta produção, entretanto, seu aumento significa menos água disponível para outros usos em bacias hidrográficas. Medições de campo para obtenção de variáveis hídricas em larga escala são difíceis de serem realizadas. A aplicabilidade de uso conjunto de imagens Landsat com dados agrometeorológicos para esta finalidade foi demonstrada para videiras de mesa na região semiárida do Brasil (Teixeira *et al.*, 2014a).

Para a modelagem da produtividade da água (PA) em larga escala no estudo atual, o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) (Teixeira *et al.*, 2014a) foi usado com imagens Landsat para estimativa do K_c em pivôs de irrigação com a cultura da soja de ciclo médio, localizados no noroeste de Estado de São Paulo, Brasil. Para a extrapolação das variáveis hídricas no Estado, uma relação entre os valores de K_c e dos graus-dias acumulados (GD_{ac}) foi elaborada e aplicada na determinação do requerimento hídrico (RH) de posse de dados climáticos, similarmente com o que foi realizado com videiras na região Nordeste do Brasil (Teixeira *et al.*, 2014b).

A PA é analisada como a razão da produção atual de grãos (Y_a) para RH considerando variedades de soja de ciclo médio no Estado de São Paulo. Nas atuais condições de escassez hídrica, o desafio é encontrar caminhos para elevações da PA através de melhorias do manejo da cultura (Adak *et al.*, 2013). Avaliações da PA têm sido realizadas em culturas em condições de irrigação (Zwart e Bastiaanssen, 2004) e para agricultura dependente de chuva (Rockstrom e Barrom, 2007). Exemplos de medições da PA em larga escala foram reportados por Mo *et al.* (2009).

O objetivo do estudo corrente foi combinar geotecnologias para modelagem da dos componentes da produtividade da água em larga escala para a cultura da soja de ciclo médio no Estado de São Paulo, Brasil. Primeiramente imagens do satélite Landsat 8 foram usadas conjuntamente com dados climáticos em pivôs de irrigação para a modelagem do K_c na parte noroeste do Estado e depois as variáveis hídricas são extrapoladas através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Ênfases são dadas para as principais mesorregiões produtoras de soja, almejando-se subsidiar melhoras no uso da água, considerando-se as condições atuais de escassez hídrica juntamente com mudanças de uso da terra.

MATERIAL E MÉTODOS

A Fig. 1 apresenta a região Sudeste do Brasil, com a localização do Estado de São Paulo (SP), juntamente com as mesorregiões, os pivôs de irrigação e a estação agrometeorológica localizada na mesorregião de Araçatuba, onde as imagens do satélite Landsat 8 foram usadas para a modelagem do coeficiente de cultura (K_c) e posterior extrapolação dos componentes da produtividade da água em larga escala através dos valores da evapotranspiração de referência (ET_0).

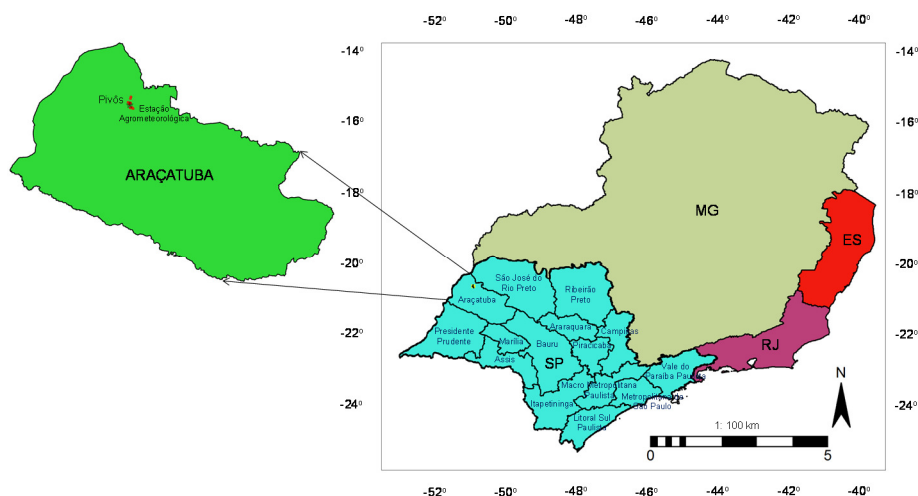


Figura 1 – Localização do Estado de São Paulo (SP) na região Sudeste do Brasil, juntamente com as mesorregiões, pivôs de irrigação e estação agrometeorológica em Araçatuba.

Dados climáticos durante o ciclo da cultura da soja de novembro de 2012 a abril de 2013, obtidos em estação agrometeorológica na vizinhança dos pivôs de irrigação, foram usados conjuntamente com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e aplicação do algoritmo SAFER (Teixeira *et al.*, 2014a). As imagens Landsat 8 para as datas 06/09/2013, 09/11/2013, 27/12/2013, 28/01/2014, 17/03/2014 e 02/04/2014 foram usadas com sucessivas interpolações temporais para cobrir ciclos produtivos completos das variedades de soja de ciclo médio em uma fazenda comercial. Após o desenvolvimento de uma equação de regressão, a qual relaciona o K_c com GD_{ac} , tomando-se com $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura base (T_b), esta foi aplicada com dados climáticos de uma rede 32 estações climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) espalhadas uniformemente no Estado de São Paulo, considerando-se o ciclo da cultura de novembro de 2012 a abril de 2013.

Para o cálculo do albedo da superfície (α_0) foram usadas as bandas de 1 a 7, com resolução espacial de 30 m, sendo a temperatura da superfície (T_0) obtida como resíduo no balanço de radiação, assegurando uma resolução espacial de 30m, seguindo-se a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2014a) para o satélite Landsat 5 mas considerando-se os comprimentos de onda e constantes de conversão para o Landsat 8.

Tendo-se obtido α_0 , T_0 e NDVI por sensoriamento remoto e dados climáticos, o SAFER foi usado para modelar os valores da razão ET/ET_0 :

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (1)$$

onde a e b são os coeficientes de regressão, os quais foram considerados 1,0 e -0,008, respectivamente, para as condições do Estado de São Paulo (Teixeira *et al.*, 2014a).

As médias dos pixels de ET/ET_0 nas áreas centrais dos pivôs com ótimas condições de umidade do solo foram considerado os valores de K_c (Allen *et al.*, 1998), permitindo a sua modelagem em função de GD_{ac} :

$$K_c = cDD_{ac}^2 + dDD_{ac} + f \quad (2)$$

onde c , d e f são as constantes de regressão determinadas na corrente pesquisa.

A distribuição espacial dos requerimentos hídricos (RH) foi obtida, considerando-se como sendo a evapotranspiração em condições potenciais da cultura (Teixeira *et al.*, 2014b):

$$RH = K_c ET_0 \quad (3)$$

Com os valores de RH e da precipitação (P), dois indicadores termo hídricos foram também interpolados. Os indicadores diferença (BH_d) e razão (BH_r) do balanço hídrico:

$$BH_d = P - RH \quad (4)$$

$$BH_r = \frac{P}{RH} \quad (5)$$

Com dados de produção atual (Y_a) obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e cruzando estes com a grade de RH, a distribuição espacial da PA foi estimada para ótimas condições de umidade do solo nas regiões produtoras de soja no Estado de São Paulo:

$$PA = \frac{Y_a}{RH} \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros climáticos mais importantes para a ET é a demanda atmosférica representada pela ET₀ e P. A radiação solar global (R_G), além de ser a maior fonte de energia para os fluxos hídricos, é atuante no processo produtivo através da atividade fotossintética. As médias quinzenais dos pixels juntamente com os desvios padrões destes parâmetros para o Estado de São Paulo, durante o ciclo produtivo da soja, variedade de ciclo médio, são apresentados na Fig. 2.

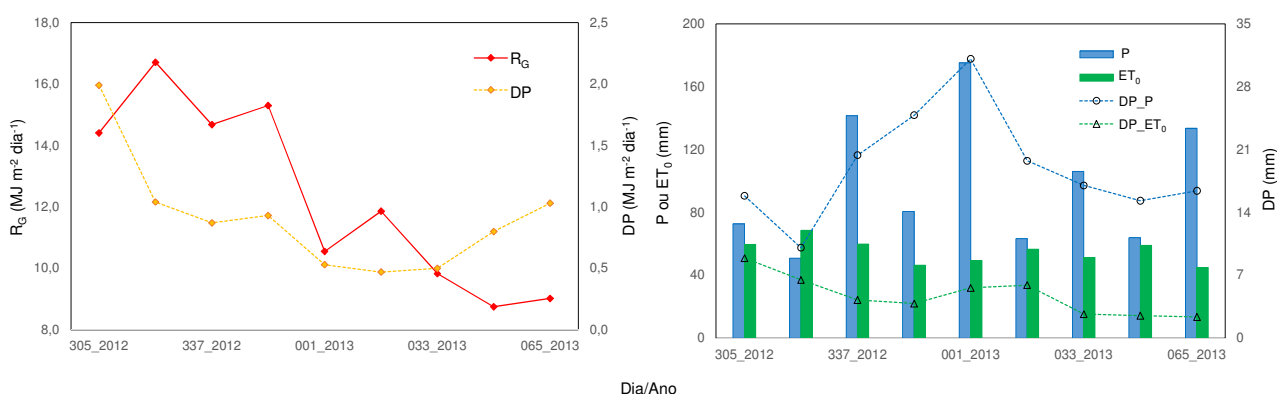


Figura 2 – Valores médios quinzenais dos pixels (Dia_Ano), e desvios padrões dos parâmetros climáticos que atuam nos processos evapotranspiratórios e da produção durante o ciclo da cultura da soja, cultivar de ciclo médio, no Estado de São Paulo. (a) Radiação solar global – R_G; (b) Precipitação – P e evapotranspiração de referência – ET₀.

Maiores valores de R_G, acima de 15 MJ m⁻² dia⁻¹, ocorreram no início do ciclo da cultura de novembro a dezembro de 2012 (Dia_Ano: 305_2012 a 353_2012), enquanto que os mais baixos valores, com médias menores que 10,0 MJ m⁻² dia⁻¹ aconteceram após fevereiro de 2014 (Dia_Ano: 033_2014), estágio final da soja de ciclo médio. Os maiores níveis de R_G no início do ciclo aceleraram os fluxos hídricos e o desenvolvimento vegetativo. Pelos valores de desvio padrão (DP), percebem-se maiores variações espaciais destes níveis na primeira quinzena de novembro de 2012 (Dia/Ano: 305_2012).

Com relação à demanda atmosférica, representada pelos valores quinzenais de ET₀, não ocorre muita variação quando se analisa os valores de DP, entretanto percebem-se elevadas médias quinzenais dos pixels no início do ciclo, quando esta fica acima de 65 mm (entre Dia_Ano: 305_2012 a 337_2012), o que está associado aos altos níveis de R_G neste período. Considerando-se

as chuvas, percebe-se que P , com total de 900 mm para o ciclo produtivo, geralmente foi maior que ET_0 , com exceção da segunda quinzena de novembro (Dia_Ano: 305_2012 a 337_2012). Porém para todo o período do ciclo da soja, a demanda atmosférica representou apenas 56% de P , evidenciando a viabilidade do cultivo comercial na dependência de chuvas em São Paulo.

A Fig. 3 mostra a distribuição espacial dos valores diários de ET/ET_0 nos pivôs de irrigação para diferentes períodos da soja de ciclo médio, na fazenda comercial do noroeste de São Paulo no período de novembro de 2012 a abril de 2013.

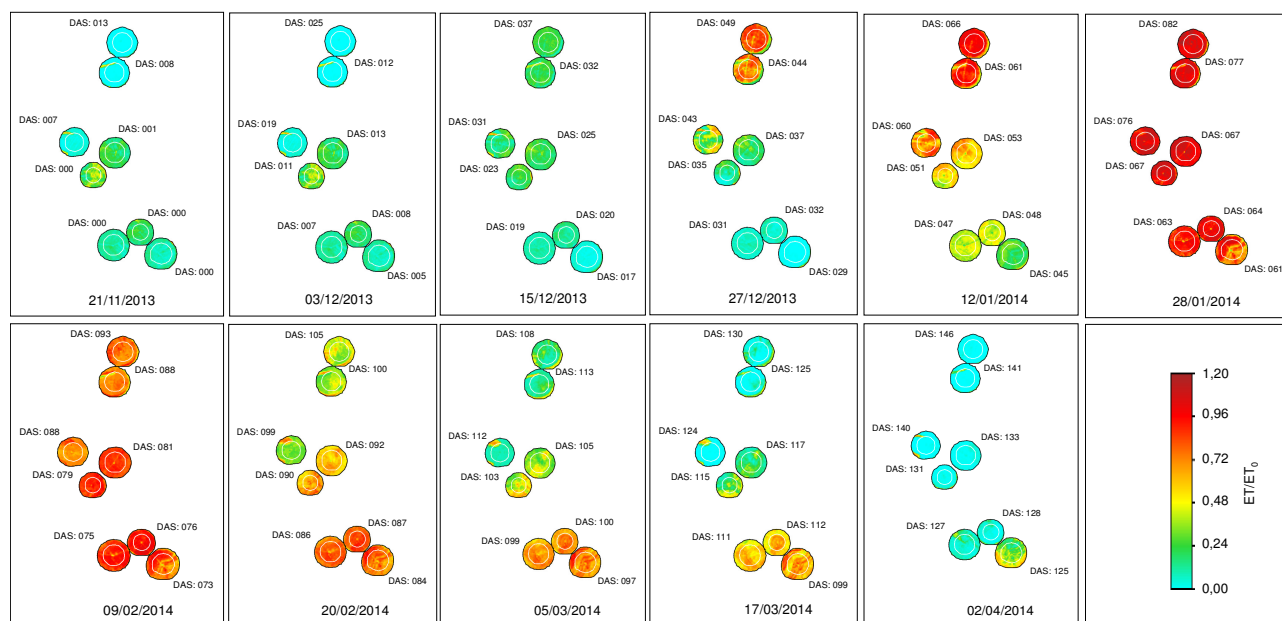


Figura 3 – Distribuição espacial dos valores diários da razão ET/ET_0 nos pivôs de irrigação para diferentes períodos da cultura soja de ciclo médio, em fazenda comercial do noroeste de São Paulo, para o período de novembro de 2012 a abril de 2013.

A normalização da ET pela ET_0 considera os efeitos temporais da variabilidade das condições atmosféricas (Suyker e Verma, 2009). Com as médias de ET/ET_0 na parte central dos pivôs (ver círculos brancos na Fig. 3) obtiveram-se os valores de K_c ($K_c = ET/ET_0$ em ótimas condições de umidade), os quais estiveram entre 0,3 e 1,15, similares aos tabelados por Allen *et al.* (1998), Suyker e Verma (2009) e por Payero e Irmak (2013), o que fornece confiança na precisão do algoritmo SAFER e sem a banda terma do satélite Landsat 8. Os coeficientes c , d e f da Eq. 2 foram então obtidos como $-7 \cdot 10^{-6}$, $1,4 \cdot 10^{-3}$ e 11,6, com R^2 de 0,80.

Com os coeficientes da Eq. 2 obtidos, esta foi aplicada para estimativa dos valores de RH e dos indicadores de balanço hídrico em larga escala, os quais, em conjunto com dados de produção, são considerados parâmetros chaves para análises da PA. A vantagem desta metodologia está na extrapolação dos valores de K_c para diferentes condições térmicas, eliminando-se a subjetividade de caracterização das fases fenológicas da cultura (Teixeira *et al.*, 2014b). Payero e Irmak (2013) encontraram diferenças consideráveis na fase de maturação em diferentes anos, atribuindo a aceleração desta fase ao estresse hídrico, especialmente durante o período reprodutivo.

Fig. 4 apresenta a variação espacial dos valores médios quinzenais dos parâmetros hídricos para a soja de ciclo médio no período de novembro de 2012 a abril de 2013 no Estado de São Paulo.

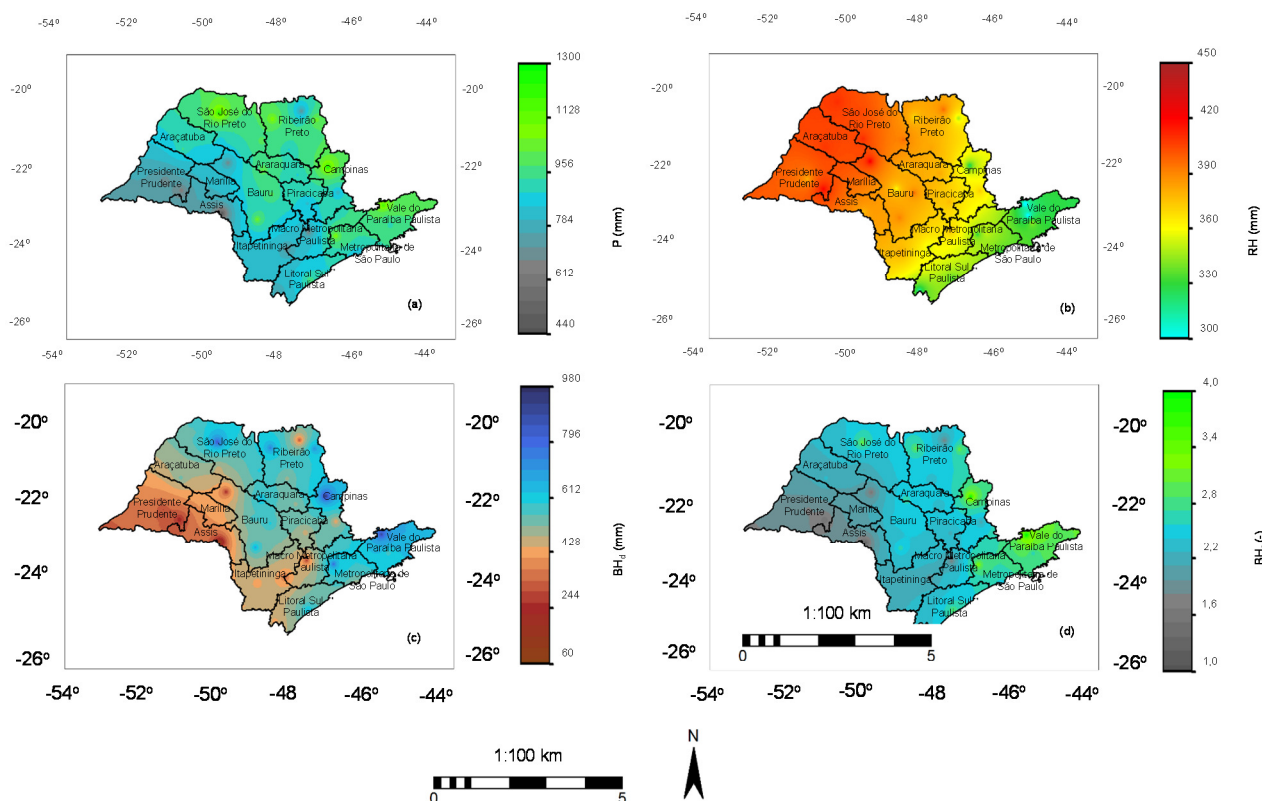


Figura 4 – Distribuição espacial dos valores médios quinzenais dos parâmetros hídricos para a cultura da soja de ciclo médio, no período de novembro de 2012 a abril de 2013, no Estado de São Paulo. (a) Precipitação – P (mm); (b) Requerimento Hídrico – RH (mm), (c) Indicador Diferença do Balanço Hídrico – BH_d (mm), e (d) Indicador Razão do Balanço Hídrico – BH_r (-).

O conhecimento destes parâmetros é de grande importância para a agricultura irrigada, enquanto que na dependência de chuvas, são muito úteis na tomada de decisão sobre a adoção de práticas culturais que permitam melhor aproveitamento das disponibilidades hídricas naturais de cada região. De acordo com a Fig. 4a, ocorreu um gradiente negativo nos valores de P da parte nordeste para a parte sudoeste do Estado no período de novembro de 2012 a abril de 2013 que envolve a soja de ciclo médio, com os valores médios caindo em até um terço. Já com relação às médias quinzenais de RH (Fig. 4b) observa-se um incremento de até 50% na demanda de água pela cultura da soja na direção sudeste-noroeste do Estado. Os elevados valores de RH na porção noroeste do Estado foram similares aos encontrados por Suyker e Verma (2009) em Nebraska, USA, que reportaram valores médios de 452 e 431 mm em soja irrigada e dependente de chuvas, respectivamente. Entretanto, no estudo corrente, o efeito de P na contabilidade hídrica foi preponderante, com os indicadores BH_d e BH_r aumentando no mesmo sentido das maiores quantidades das chuvas (Fig. 4c e 4d). Esta variação espacial é importante, pois irá afetar a PA dependendo do manejo da cultura que interfere nos níveis de produção de grãos. A demanda de água pela cultura da soja varia de acordo com as condições climáticas, do manejo, e da duração do ciclo. Portanto, ambos o consumo de água e produtividade vão ser também funções das épocas de semeadura.

Dados de produção da soja (Y_a) e área colhida para a safra 2012-2013 no Estado de São Paulo, foram obtidos do IBGE na escala municipal. Interpolando estes dados e cruzando com as grades de RH para o período de cultivo da soja de ciclo médio, análises da PA foram realizadas nas áreas produtoras do Estado aplicando-se a Eq. 6 (Fig. 5).

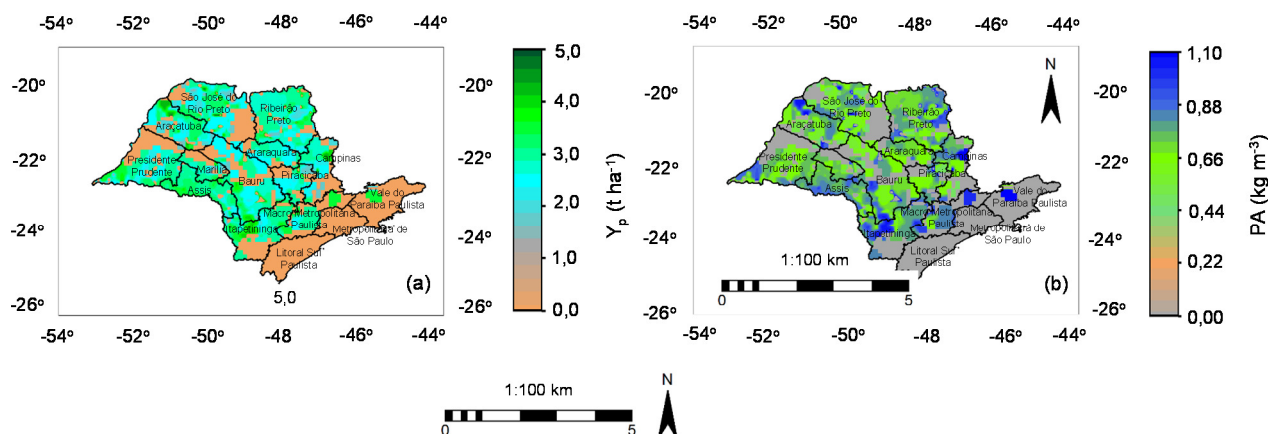


Figura 5 – Distribuição espacial dos componentes da produtividade da água da cultura da soja de ciclo médio em 2013, no Estado de São Paulo. (a) Produtividade – Y_p ($t\ ha^{-1}$); (b) Produtividade da água – PA ($kg\ m^{-3}$).

De acordo com a Fig. 5a, diferenças nos valores de produtividade (Y_p) entre as mesorregiões produtoras de soja no Estado de São Paulo são claras, com destaques para aquelas mais ao sudoeste do Estado, onde ultrapassam $3\ t\ ha^{-1}$. Entretanto, principalmente em condições de escassez hídrica, além da produtividade, torna-se importante o conhecimento sobre quanto de água é consumida para uma certa produção dos grãos. Os pixels em azul da Fig. 8b representam aquelas de maior eficiência de uso da água da chuva, com PA acima de $0,80\ kg\ m^{-3}$ nas áreas produtoras de soja. Percebe-se então que nem sempre as regiões com elevado Y_p correspondem àquelas de maior PA . Comparando-se a distribuição espacial tanto de Y_p como de PA da Fig. 5 com aquela para os componentes do balanço hídrico (Fig. 4), constata-se uma concentração dos maiores valores de PA nas áreas com elevado RH , porém com baixas disponibilidades hídricas, verificada pelos valores inferiores de P , BH_d e BH_r . Estes resultados apontam que o excesso hídrico em algumas áreas pode prejudicar a produção de grãos por água consumida.

Extraindo-se Ribeirão Preto e Assis, localizadas em polos opostos do Estado, que se destacaram como as mesorregiões de maiores produções na safra de 2012-2013, a Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros de produtividade da água para a soja de ciclo médio.

Tabela 1 – Parâmetros de produtividade da água da soja de ciclo médio para a safra de 2012-2013 nas principais mesorregiões produtoras de Ribeirão Preto e Assis. P – Precipitação; RH – Requerimento hídrico; BH_d – Indicador da diferença no balanço hídrico; BH_r – Indicador da razão no balanço hídrico; Y_p – produtividade; e PA – produtividade da água.

Mesorregião	P (mm)	RH (mm)	BH_d (mm)	BH_r (-)	Y_p ($t\ ha^{-1}$)	PA ($kg\ m^{-3}$)
Ribeirão Preto	952 ± 40	378 ± 7	575 ± 44	$2,52 \pm 0,13$	$2,8 \pm 0,4$	$0,75 \pm 0,11$
Assis	769 ± 58	392 ± 8	378 ± 60	$1,97 \pm 0,16$	$3,1 \pm 0,3$	$0,78 \pm 0,08$

Da Tabela 1 percebe-se a variação da quantidade de chuvas no sentido Norte (Ribeirão Preto) – Sul (Assis), com o valor total de P em Ribeirão Preto sendo 24% superior daquele para Assis. Além das menores quantidades de chuvas, esta última mesorregião apresenta uma demanda de água superior, como pode ser notado pelo maior RH (4% superior). RH representou 40 e 51% de P respectivamente em Ribeirão Preto e Assis, valores inferiores aos reportados por Suyker e Verma (2009) para as condições de Nebraska-USA, onde estiveram a ET sem restrição hídrica esteve entre 57 a 64% de P . Elevada P e baixo RH geraram maiores valores dos indicadores do balanço hídrico BH_d e BH_r em Ribeirão Preto. Estas últimas condições devem ter contribuído para valores de Y_p e



PA inferiores quando comparados aos de Assis, despertando maior atenção para práticas de drenagem para se evitar o excesso hídrico na zona das raízes das plantas, ou na alteração de época de plantio da soja nas mesorregiões mais ao norte do Estado para uma melhor eficiência do uso da água das chuvas. O excesso de chuvas e dias nublados podem prejudicar a fotossíntese, o arejamento do solo, o desenvolvimento das raízes e a fixação de nitrogênio, causando anomalias no desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, reduzindo o rendimento de grãos.

Entretanto, os valores de PA nas áreas produtoras do Estado de São Paulo encontram-se, em geral, na faixa daqueles de $0,71 \pm 0,03$ e $0,68 \pm 0,07 \text{ kg m}^{-3}$, para a soja cultivada respectivamente sob condições de irrigação e na dependência de chuvas nas condições climáticas de Nebraska-USA (Suyker e Verma, 2009).

CONCLUSÕES

Modelos resultantes do uso conjunto de imagens do satélite Landsat 8 e dados agrometeorológicos, baseados na razão das evapotranspirações atual para a de referência e nos graus-dias acumulados na cultura da soja de ciclo médio, permitiram a determinação de indicadores hídricos no Estado de São Paulo. Extraíndo-se duas das principais mesorregiões produtoras no lado norte e lado sul do Estado, verificou-se maior disponibilidade de água da chuva em Ribeirão Preto e menor em Assis. Entretanto requerimento hídrico mais elevado foi verificado nesta última região, que apresentou produtividade da água superior, contribuindo para um menor uso dos recursos hídricos no processo produtivo, sendo um aspecto importante em cenários de escassez de água. Os resultados da modelagem são úteis como suporte às melhorias da eficiência de uso da água da soja tanto em condições de dependência de chuva como sob irrigação.

REFERÊNCIAS

- ADAK, T.; KUMAR, G.; CHAKRAVARTY, N.V.K.; KATIYAR, R.K.; Deshmukh, P.S. (2013). Biomass and biomass water use efficiency in oilseed crop (*Brassica Inceae* L.) under semi-arid microenvironments. *Biomass and Bioenergy* 51, pp. 154-162.
- 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.
- MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; GUO, R. (2009). Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 134, pp. 67-78.
- PAYERO, J.O.; IRMAK, S. (2013). Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agricultural Water Management*, 129, pp. 31-43.
- ROCKSTROM, J.; BARRON, J. (2007). Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs. *Irrigation Science* 25, pp. 299-311.
- SUYKER, A.E.; VERMA, S.B. (2009) Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, pp. 443-452.
- TEIXEIRA, A.H. de C.; HERNANDEZ, F.B.T., ANDRADE, R.G., LEIVAS, J.F., BOLFE, E.L. (2014a). Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. *Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering* 9239, pp. 923900-1-923900-10.
- TEIXEIRA, A.H. de C.; TONIETTO, J.; PEREIRA, G.E.,; HERNANDEZ, F.B.T.; ANGELOTTI, F., LOPES, H.L. (2014b). Agro-Climatic Suitability Delimitation for Table and Wine Grape Crops under Irrigation Conditions in Northeastern Brazil. *Acta Horticulturae* 1038, pp. 277-286.
- ZWART, S.J.; BASTIAANSEN, W.G.M. (2004). "Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69, pp. 115-153.