

Evapotranspiration of sugarcane in different phenological phases by remote sensing in the São Francisco Sub-medium Valley

Caick M. R. Martins^{*}, Fabrício M. O. Lopes^{**}, Geber B. de A. Moura^{***}, Ênio F. de F. e Silva^{****}, Ranyére S. Nóbrega^{*****}, Jhon L. B. da Silva^{*****}

^{*}Doutorando em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista (Unesp). E-mail: caick.marcelo@gmail.com. (corresponding author).

^{**}Doutor em Sensoriamento Remoto, Professor da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). E-mail: pabriciope@gmail.com

^{***}Doutor em Oceanografia, Professor associado da UFRPE. E-mail: geber@depa.ufrpe.br

^{****}Pós-doutor em Conservação de Água e Solo, Professor associado da UFRPE. E-mail: enio.fsilva@ufrpe.br

^{*****}Doutor em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: ranyere.nobrega@yahoo.com.br

^{*****}Mestre em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, UFRPE. E-mail: jhonlennoigt@hotmail.com

Received 5 August 2019; accepted 10 December 2019

Abstract

The study aimed to estimate the reference evapotranspiration of sugarcane using the Priestley-Taylor method, comparing with the standard Penman-Monteith-FAO 56 method in the region of the São Francisco Submiddle Valley in the period from 2013 to 2016. Images of the Landsat-8 satellite of the OLI and TIRS sensors acquired from the North American space Agency (NASA) and meteorological data from the Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) were used, along with the Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) and the Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INMET). The instantaneous radiation balance, soil heat flow, latent heat flow, crop coefficient (Kc) and Priestley-Taylor coefficient were estimated to obtain the reference evapotranspiration, which ranged from 0.00 to 3.65 mm d⁻¹. The validation proceeded through the correlation between method of crop coefficient applied for Priestley-Taylor and Penman-Monteith. The value of R² 0.75, Pearson coefficient (R) 0.88 (strong correlation) and the mean error found in 1.81 mm d⁻¹ were considered satisfactory. The Priestley-Taylor method was able to estimate the reference evapotranspiration in sugarcane production areas in the region of the São Francisco Submiddle Valley in a satisfactory way.

Keywords: sugarcane, phenological stages, semi-arid.

Evapotranspiração de canaviais em diferentes fases fenológicas por sensoriamento remoto no vale do submédio do São Francisco

Resumo

O estudo objetivou estimar a evapotranspiração de referência da cana-de-açúcar utilizando o método de Priestley-Taylor, comparando com o método padrão Penman-Monteith-FAO 56 na região do Vale do Submédio do São Francisco no período de 2013 a 2016. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat-8 dos sensores OLI e TIRS adquiridas da Agência Espacial Norte-Americana (NASA) e dados meteorológicos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), junto ao Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram estimados o balanço de radiação instantâneo, fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente, coeficiente de cultivo (Kc) e coeficiente de Priestley-Taylor para a obtenção final da evapotranspiração de referência que variou de 0,00 a 3,65 mm dia⁻¹. A validação procedeu por meio da correlação entre o método do coeficiente de cultura aplicando para Priestley-Taylor e também Penman-Monteith. O valor do coeficiente de Pearson foi de 0,88, indicando correlação forte. O erro médio encontrado foi de 1,81 mm dia⁻¹. O método Priestley-Taylor foi capaz de estimar a evapotranspiração real em áreas de produção da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco de modo satisfatório.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, estágios fenológicos, semiárido.

1. Introdução

A cana-de-açúcar no Brasil se destaca pelo grande potencial para produção de massa seca e

energia, pois apresenta alta adaptabilidade em diversas condições climáticas e potencializa sua produtividade a partir da gestão e manejo adequados,

verificando o consumo hídrico vegetal e repondo água no solo em quantidades corretas (Dantas, 2013).

Considerando o atual cenário de escassez dos recursos hídricos, principalmente no semiárido brasileiro, se faz necessário estimar a real necessidade de irrigação da cana-de-açúcar, diminuindo custos e atenuando o desperdício de água (Santos, 2016).

Em pesquisas recentes, diversos autores utilizaram o método de Priestley-Taylor para estimar a evapotranspiração (Khaldi et al., 2014; Fernandes et al., 2018; Sales et al., 2018; Primo et al., 2019). A vantagem deste método é a necessidade da utilização de poucos dados de superfície (saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura do ar) para se estimar o fluxo de calor latente. Porém, a base teórica do coeficiente de Priestley-Taylor (α_{PT}) não é bem esclarecida, tendo em vista que pode apresentar variação substancialmente em função da rugosidade do dossel e da umidade da superfície do solo (Xu e Singh, 2000).

Khaldi et al. (2014) desenvolveram uma metodologia baseada no método do triângulo que permite estimar a evapotranspiração, em que α_{PT} é calculado usando uma interpolação linear entre a temperatura da superfície e índice de vegetação por diferença normalizada. Neste sentido, se faz necessário gerar conhecimentos sobre a distribuição espacial e temporal da evapotranspiração de canaviais, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, sobretudo no semiárido brasileiro.

Mediante ao exposto, objetivou-se monitorar e estimar a evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor em canaviais do Vale do Submédio do São Francisco, utilizando imagens do satélite Landsat-8 e dados meteorológicos de superfície no período de 2013 a 2016. Além disso, buscou-se relacionar a evapotranspiração obtida por Priestley-Taylor com a equação padrão de Penman-Monteith-FAO 56.

2. Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na região do Vale do Submédio do São Francisco no município de Juazeiro, no estado da Bahia (Figura 1), nas áreas de cultivo pertencentes à empresa Agroindústria do Vale do São Francisco-AGROVALE S.A., que ocupa área aproximadamente de 20.000 ha de cana-de-açúcar em vertissolos de relevo plano, irrigados por superfície (gotejamento) e a principal variedade cultivada é a RB 92579 (Sá, 2016).

O clima da região é do tipo BSh, predominando regime climático do semiárido. A precipitação média anual aproximada é de 430 mm, distribuídos irregularmente durante o ano. A umidade relativa do ar média anual é de 66% e a temperatura média anual do ar de 26,5 °C. A evapotranspiração potencial média anual é de 1550 mm (Pinheiro et al., 2015; Lopes et al., 2017; CODEVASF, 2019).

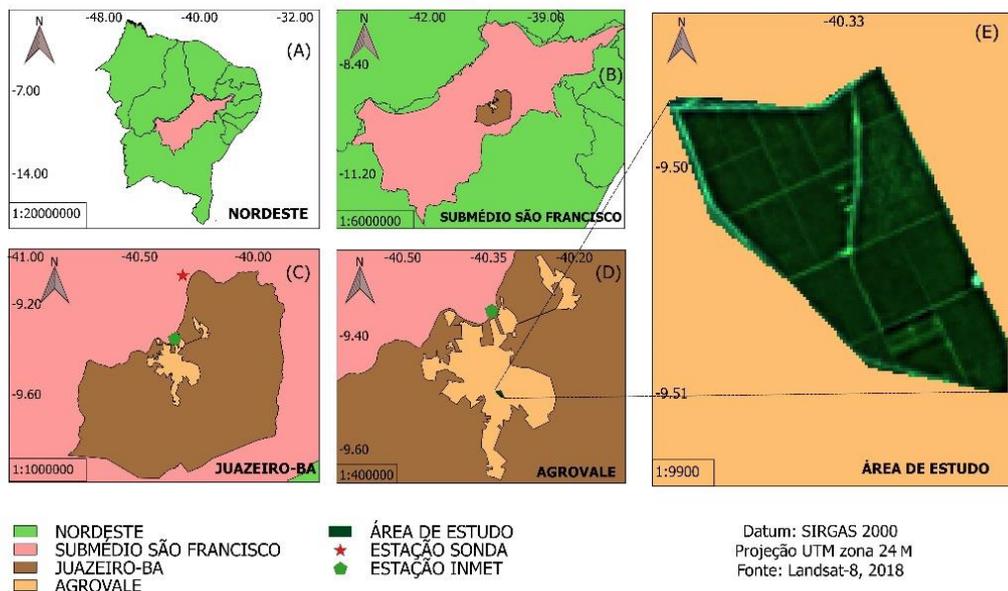


Figura 1- Mapa espacial de localização da área de estudo. (A) Nordeste; (B) Vale do Submédio do São Francisco; (C) Juazeiro-BA; (D) AGROVALE; (E) Área de estudo cana-de-açúcar. Composição R-G-B, resolução espacial de 30 m.

Dados orbitais

As imagens do satélite Landsat-8 dos sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal

Infrared Sensor (TIRS) dos anos de 2013 a 2016 foram obtidas no site <https://earthexplorer.usgs.gov/>, com baixa cobertura de nuvens, conforme a Tabela 1.

As cenas de órbita/ponto 217/67 foram processadas no programa QGIS no formato Geotiff, corrigidas dos efeitos atmosféricos com a ferramenta DOS-1, e georreferenciadas no sistema de projeção cartográfica UTM, Datum SIRGAS 2000 - Zona 24 M.

Os dados do produto MOD13Q1 do satélite

Terra sensor MODIS, referentes ao Índice de Vegetação Melhorado (EVI - *Enhanced vegetation index*) foram obtidos do banco de dados do Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVEG), disponível no endereço eletrônico <http://www.satveg.cnptia.embrapa.br>.

Tabela 1 - Dados orbitais referentes às imagens do satélite Landsat-8.

Data	DJ- Dia Juliano	Hora local (hora:min)	Nebulosidade (%)	Ângulo Azimutal (°)	Ângulo Elevação (°)	Distância Terra-Sol
03/09/2013	246	9h50min	0,01	58,665	57,341	1,008
22/09/2014	265	9h48min	0,00	70,157	61,669	1,003
24/08/2015	236	9h48min	0,31	54,448	54,174	1,011
10/08/2016	223	9h48min	4,00	49,500	51,116	1,013

Fonte: (USGS, 2018).

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos de superfície (Tabela 2) foram obtidos do repositório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), junto ao Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e do Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET) referentes aos anos de 2013 a 2016. As estações meteorológicas automáticas utilizadas neste estudo estão localizadas no município de Petrolina-PE (09° 04' 08" S; 40° 19' 11" W; 387 m - SONDA) e (09° 23' 18" S; 40° 31' 23,74" W; 373 m - INMET).

Tabela 2 - Dados meteorológicos da estação automática da SONDA referentes às imagens do satélite Landsat-8.

Data	DJ	Hora Local	Ta (°C)	UR (%)	P (hPa)	RG (W m ⁻²)	Ws (m s ⁻¹)	Wd (Graus)	Precipitação (mm)
03/09/2013	246	9h50min	26,05	49,19	973,35	803,0	5,144	114,4	0
22/09/2014	265	9h48min	31,79	32,71	970,27	849,0	4,790	121,6	0
24/08/2015	236	9h47min	26,58	47,62	972,85	809,0	4,160	123,0	0
10/08/2016	223	9h48min	26,85	47,89	974,92	787,0	4,159	130,7	0

Temperatura do ar (Ta, °C); Umidade Relativa do ar (UR, %); Pressão atmosférica (P, hPa); Radiação Global (RG, W m⁻²); Velocidade do vento (ws, m s⁻¹); Direção do vento (wd, Graus) e Precipitação (mm). Fonte: (SONDA, 2018).

Evapotranspiração de referência de Priestley e Taylor (ET_{0(PT)} 24h)

O método Priestley e Taylor (1972) (Equação 1) é uma simplificação do método Penman-Monteith para estimar ET₀.

$$ET_{0(PT)24h} = 0,035 \times \frac{\lambda E}{R_n - G} \times ((1 - \alpha) \times R_{24h} - 123 t_{24h}) \quad (1)$$

Em que, λE - Fluxo de calor Latente; R_n - Balanço de Radiação à superfície; G - Fluxo de calor no solo; R_{24h} - radiação solar global diária medida na estação meteorológica experimental (W m⁻²); t_{24h} - transmissividade atmosférica média diária e 0,035 fator de conversão de W m⁻² para mm dia⁻¹.

O balanço de radiação instantâneo (R_n) foi estimado conforme a Equação 2 (Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$R_n = (1 - \alpha) RS_{\downarrow} + RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1 - \epsilon_o) RL_{\downarrow} \quad (2)$$

Em que, α - albedo da superfície; RS_{\downarrow} - Radiação de Onda Curta Incidente; RL_{\downarrow} - Radiação de Onda Longa Incidente; RL_{\uparrow} - Radiação de Onda Longa Emitida pela superfície; ϵ_o - emissividade da superfície.

O fluxo de calor no solo (G) representa a entrada e saída de energia interferindo entre outros processos na evapotranspiração e foi estimado empiricamente conforme a Equação 3 (Bastiaanssen, 2000).

$$G = R_n \left(\left(\frac{T_s}{\alpha} \right) (0,0038 \times \alpha + 0,0074 \times \alpha^2) (1 - 0,98 \times NDVI^4) \right)$$

Em que, T_s - Temperatura da superfície; $NDVI$ - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

O fluxo de calor latente (λE , W m⁻²) é um parâmetro que estima quantidade de calor utilizada nos processos de evapotranspiração e foi calculado conforme Equação 4 (Priestley e Taylor, 1972).

$$\lambda E = \alpha_{PT} \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \times (R_n - G) \quad (4)$$

Em que, α_{PT} - Coeficiente de Priestley-Taylor; Δ = Declividade da curva de pressão de vapor; γ^* - Constante psicométrica modificada.

O coeficiente Priestley-Taylor (α_{PT}) representa energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico e depende da cobertura vegetal, da sua rugosidade e do teor de água de superfície (Sentelhas et al., 2000).

Para calcular o coeficiente de Priestley-Taylor propõe-se a Equação 5, que combina o TVDI e FCV (Sandholt et al., 2002).

$$\alpha_{PT} = 1,26 \times (1 - TVDI) \times FCV \quad (5)$$

O Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura (TVDI) proposto por Sandholt et al. (2002) estima a escassez de água da vegetação, monitora a umidade do solo e da vegetação (Huang et al., 2013). O TVDI foi obtido conforme Sandholt et al. (2002), Equação 6.

$$TVDI = \frac{T_s - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (6)$$

Em que, T_{min} – Temperatura mínima; T_{max} , Temperatura máxima

A fração de cobertura vegetal (FCV) é um indicador da fração da área horizontal de um pixel da imagem de satélite coberta por vegetação verde, estimada conforme a Equação 7 (Choudhury et al., 1994).

$$FCV = \left(1 - \left(\frac{(NDVI_{max} - NDVI)}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \right)^{0,9} \right) \quad (7)$$

Em que, $NDVI_{max}$ - valor máximo da imagem de $NDVI$; $NDVI_{min}$ - valor mínimo da imagem de $NDVI$. Os valores de FCV variam de 0 (solo exposto) a 1 (solo completamente vegetado).

Tabela 3 - Coeficiente de cultivo médio da cana-de-açúcar.

Estágios Fenológicos	Dias após o plantio (DAP)	Kc
Brotação e Emergência	30	0,55
Perfilhamento e estabelecimento da cultura	66	0,95
Crescimento e desenvolvimento dos colmos	186	1,01
Maturação	104	0,91

Fonte: Ferreira (2014).

O valor da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água (Δ) kPa.°C⁻¹ foi calculado pela equação:

$$\Delta = \frac{4098}{((t + 237,3))^2} \times \left[0,6108 \times \left(\frac{\exp(17,27 \times t)}{(t + 237,3)} \right) \right] \quad (8)$$

Em que, t - temperatura do ar no momento da passagem do satélite.

A constante psicométrica modificada (γ^*) foi obtida a partir da Equação 9.

$$\gamma^* = (0,665 \times 10^{-3} \times P) \times (1 + 0,33 \times U_2) \quad (9)$$

Em que, U_2 - velocidade do vento à 2 m de altura (m s⁻¹); P - Pressão atmosférica, calculada conforme a Equação 10 (Burman e Pochop, 1994).

$$P = 101,3 + 0,01055 \times Z \quad (10)$$

Em que, Z - altitude local.

Evapotranspiração de referência padrão da FAO 56 (ET0 24h)

A determinação da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith foi feita utilizando o programa ET0 calc. versão 3.2, disponibilizado pela FAO e acessível através do endereço eletrônico <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>, a partir da entrada de dados meteorológicos diários. As variáveis de entrada para o cálculo de ET0 foram: temperatura mínima, máxima e média do ar, umidade relativa média do ar, velocidade do vento e insolação.

Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar (Kc)

O coeficiente de cultivo para cada data estudada foi estimado conforme o DAP (dias após o plantio), considerando a classificação de Ferreira (2014) (Tabela 3) e tomando como referência o início do ciclo os menores valores de EVI da série temporal de dados do produto MOD13Q1 entre anos de 2013 a 2016, oriundos do banco de dados do Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVEG), conforme Figura 2.

Em 01/01/2013 (Figura 2) inicia-se um ciclo de cana ano e meio com baixo acúmulo de biomassa. Na passagem do Landsat-8, 03/09/2013, 245 dias após o plantio (DAP), a cana encontra-se com EVI de 0,68, correspondendo a um Kc de 1,01. Em 26/06/2014 inicia-se o primeiro ciclo de cana-ano. Em 22/09/2014 (88 DAP), data da passagem do

Landsat-8, o EVI apresenta valor de 0,42 e Kc de 0,95. O segundo ciclo de cana-ano inicia-se em 12/07/2015. Na data 24/08/2015 (43 DAP) o valor do EVI foi de 0,3 com Kc inferido de 0,55. O terceiro ciclo vegetativo começa em 25/05/2016. Em 10/08/2016, 77 DAP, o valor de EVI foi de 0,6 com Kc de 0,95.

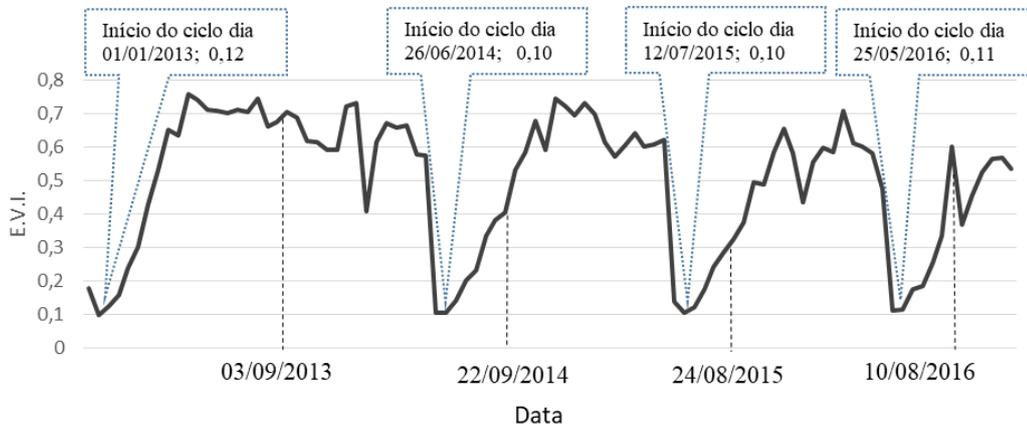


Figura 2 - Série temporal do EVI/MODIS da cana-de-açúcar, datas do início do ciclo vegetativo e das passagens do Landsat-8 na região do Vale do Submédio do São Francisco. Fonte: SATVEG, 2018.

Evapotranspiração real do canavial (ETr)

Os valores da evapotranspiração da cana-de-açúcar pelo método do coeficiente de cultivo foram obtidos pelo produto entre a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultivo (Kc) obtidos conforme a Equação 11 (Ferreira, 2014).

$$ETr = Kc \times ET_{0(P_T)} \quad (11)$$

A validação do método procedeu por meio da correlação de 10 valores da ETr de Priestley-Taylor com 10 valores da ETr Penman-Monteith. O desempenho do método foi avaliado utilizando indicadores estatísticos como coeficiente de determinação (R^2) (Equação 12), Erro Médio (EM) (Equação 13) e o coeficiente de correlação simples de Pearson (r) (Equação 14).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_i)^2} \quad (12)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (13)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

Em que, Y_i - evapotranspiração de referência estimada pelo método-padrão (Penman-Monteith-FAO 56) (mm dia^{-1}); X_i - evapotranspiração de referência obtida pelo método testado (Priestley e

Taylor, 1972) (mm dia^{-1}); \bar{x} - média dos valores de evapotranspiração de referência obtidos pelo método testado (mm dia^{-1}); n - número de observações; E_i - valores da estimativa; O_i - valores observados.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para relacionar os dois métodos de ET, avaliando o comportamento de uma variável em relação a outra, classificando o grau da correlação de acordo com Devore (2006) em: Correlação bem fraca (0,0-0,19); Correlação fraca (0,20-0,39); Correlação moderada (0,40-0,69); Correlação forte (0,70-0,89) e Correlação muito forte (0,9-1,0).

3. Resultados e discussão

A Tabela 4 mostra que o albedo da superfície variou de 0,14 em 10/08/2016 a 0,26 em 03/09/2013, mesma data em que foi encontrada a maior média do período 0,20. O albedo no geral apresentou valores baixos, pois em condições de irrigação nas áreas de cana-de-açúcar o solo apresenta menor refletividade e maior umidade.

Dessa maneira, o solo absorve mais radiação eletromagnética por estar mais úmido, causando redução da refletância reduzindo o albedo, concordando com os estudos de Wang e Davidson (2007) e Esteves et al. (2012) mencionando que as condições hídricas do solo e da planta influenciam diretamente nos padrões sazonais do albedo.

De acordo com Esteves et al. (2012), em períodos de menor disponibilidade hídrica os valores de albedo tendem a ser maiores que em períodos com elevada precipitação, assim como foi observado por

Oliveira et al. (2014) ao compararem os valores de albedo da cana-de-açúcar em períodos distintos do ano, nas estações seca e chuvosa dos anos de 2006 e 2007.

O índice de vegetação NDVI apresentou variação geral de 0,18, nas datas 03/09/2013, 24/08/2015 e 10/08/2016, a 0,80 encontrado em 03/09/2013 e 22/09/2014 (Tabela 4). Valores semelhantes foram encontrados em estudo de Lira (2008) avaliando parâmetros biofísicos da cana-de-açúcar no Submédio São Francisco com NDVI variando de 0,17 a 0,65. Santos (2016) encontrou valores de NDVI com uma maior amplitude de variação de 0,15 a 0,90.

O NDVI apresentou comportamento em função do estágio fenológico da cana-de-açúcar, se mostrando elevado quando a cultura estava em estágios fisiológicos avançados, com elevada atividade fotossintética, alta taxa de biomassa e sem alteração por algum tipo de estresse. Os menores valores ocorreram quando a cultura estava em seu estágio inicial, onde a presença de biomassa é pequena, interferindo pouco na estimativa do índice.

Santos et al. (2015) encontraram valores de 0,31 a 0,95 determinados de acordo com o estágio fenológico, com os menores valores de NDVI sendo encontrados nos estágios iniciais e maiores nos estágios próximos da maturação. Em função dessa característica o índice é utilizado como base para estimar o estágio fenológico das culturas, pois responde de forma sensível às alterações de biomassa, captando as possíveis mudanças nos padrões espectrais ditos como normais para a cultura.

A temperatura da superfície (Ts) variou de 33,08 °C em 03/09/2013 a 45,58 °C na data 22/09/2014 (Tabela 4). A maior média da Ts de 38,93

°C foi encontrada em 24/08/2015, sendo que as mais elevadas foram encontradas em campos com menor percentual de cobertura vegetal. Santos (2016) também observou que os maiores valores da Ts ocorrem em função da redução da biomassa da cana-de-açúcar, quando o solo se encontra em grande parte exposto, sem vegetação para interceptar a radiação solar.

Gomes et al. (2013) e Tartari et al. (2015) encontraram Ts menores em áreas com alta densidade vegetal e valores elevados da Ts em áreas com baixos índices de vegetação em cultivos de cana-de-açúcar. A ocorrência de uma maior Ts interfere em uma maior taxa de evapotranspiração, aumentando a perda de água da superfície para o solo. Em temperaturas menores a evapotranspiração tende a ser menor por conta desse fator, além da interação com outros fatores como velocidade do vento e regime de chuvas.

O fluxo de calor no solo (G) apresentou variação de 56,54 W m⁻² em 03/09/2013 a 124,82 W m⁻² em 22/09/2014. As médias variaram de 68,31 a 93,76 W m⁻², referentes, respectivamente, aos dias 03/09/2013 e 22/09/2014. Santos (2016) e Gomes et al. (2013) analisaram e identificaram menores valores do G em áreas de canaviais com maior cobertura vegetal.

Dessa forma, a fase inicial apresenta maior concentração de calor na superfície, influenciando diretamente no processo de brotação dos propágulos. Lira (2008), analisando a cana-de-açúcar produzida no Vale do Submédio do São Francisco, constatou também que áreas de cultivos mais densos de cana apresentam menores valores do G, assim como áreas menos densas apresentam maiores valores do G.

Tabela 4 - Parâmetros biofísicos da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. Albedo. NDVI. Temperatura da superfície (Ts) e fluxo de calor no solo (G).

Parâmetros biofísicos	03/09/2013			22/09/2014			24/08/2015			10/08/2016		
	Mínimo	Média	Máxima									
Albedo	0,16	0,20	0,26	0,16	0,18	0,25	0,15	0,17	0,25	0,14	0,17	0,25
NDVI	0,18	0,72	0,80	0,22	0,67	0,80	0,18	0,36	0,54	0,18	0,34	0,62
Ts (°C)	33,08	34,39	40,66	39,64	41,30	45,58	37,01	38,93	40,99	36,87	38,79	40,62
G (W m ²)	56,64	68,31	105,21	70,73	93,76	124,82	87,30	95,99	99,48	76,44	90,68	93,72

O saldo de radiação à superfície (Rn) apresentado na Tabela 5 variou de 411,54 W m⁻² em 10/08/2016 a 596,43 W m⁻² em 22/09/2014. A menor e a maior média de Rn foi de 470,09 e 568,81 W m⁻², respectivamente, em 10/08/2016 e 22/09/2014. Os valores de Rn encontrados variaram dentro da amplitude de Giongo et al. (2010), que estimaram variações de 234,8 a 859,2 W m⁻² para a cana-de-açúcar em diferentes estágios fenológicos.

Machado et al. (2014), estudando as características da cana-de-açúcar na zona da mata sul do estado de Pernambuco, encontraram valores de Rn que variaram de 600 a 680 W m⁻² e que os maiores valores de Rn foram encontrados em áreas com menor densidade de cobertura vegetal.

Os valores baixos de Rn foram influenciados pela cobertura vegetal, pois as folhas da cana-de-açúcar interceptam radiação, diminuindo a incidência

direta na superfície absorvendo grande parte da energia que é utilizada nos processos de fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração. Quando o solo está descoberto na ausência da biomassa da cana-de-açúcar não existem folhas para interceptarem a energia e com isso o R_n apresenta valores elevados, que são encontrados nas fases iniciais de cultivo e logo após a colheita (Santos, 2016).

O Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura (TVDI) apresentou valores médios que variaram de 23% em 03/09/2013 a 73% em 10/08/2016 (Tabela 5). As datas com os maiores valores de TVDI foram encontradas em áreas com menores densidades de cobertura vegetal, corroborando com Schirmbeck (2016), citando que o estresse hídrico tem relação direta com a T_s e a quantidade de biomassa, pois a redução da umidade acarreta o aumento da T_s e a redução do índice de vegetação.

O TVDI exibiu maiores valores nas fases iniciais do ciclo e após a colheita da cana-de-açúcar, períodos em que o solo está mais exposto à radiação global, causando o aumento no nível de ressecamento. Assim, como os menores valores de TVDI foram encontrados nas fases de desenvolvimento avançando, o período no qual a cultura apresenta grande densidade, cobrindo o solo e diminuindo o nível de ressecamento.

Os valores de TVDI indicam um elevado nível de ressecamento da cobertura do solo, que afeta o desenvolvimento do sistema radicular, dificultando a penetração das raízes no solo, fato este que é amenizado pela utilização da irrigação que aumenta a umidade do solo, facilitando o desenvolvimento das raízes (Schirmbeck, 2016).

O coeficiente Priestley-Taylor (α_{PT}) apresentou variação de 0,00 a 1,26, encontrados em 22/09/2014 e 03/09/2013. Os maiores valores do coeficiente foram encontrados em áreas com maior densidade de vegetação, assim como, os menores

foram encontrados em áreas com menor cobertura vegetal.

De acordo com Xu e Singh (2000), α_{PT} pode apresentar variação substancialmente em função da rugosidade do dossel e da umidade da superfície do solo. Além disso, os níveis de vegetação se mostraram proporcionais à variação do coeficiente, fato este confirmado por Sanches et al. (2010) encontrando altos valores de α_{PT} quando evidenciados os maiores índices de vegetação, assim como, a ocorrência de valores baixos de α_{PT} estão relacionados com menores valores de índices de vegetação.

Quanto maior a biomassa da cana-de-açúcar, indicando um estágio fenológico avançado, maior será o valor de α_{PT} , da mesma forma os estágios iniciais apresentam os menores valores de α_{PT} em função da diferença de rugosidade por apresentarem menos cobertura vegetal (Sanches et al., 2010).

O fluxo de calor latente (λE) mostrado na Tabela 5 apresentou variação de 0,08 a 345,29 $W m^{-2}$. Em valores médios de cada imagem λE apresentou variação de 50,46 $W m^{-2}$ em 10/08/2016 a 240,95 $W m^{-2}$ em 30/09/2013. Tais valores do λE assemelham-se aos encontrados por Santos (2016), que apresentaram variação de 30 a 243 $W m^{-2}$, avaliando a cana-de-açúcar em diversos estágios de cultivo.

Lira (2008) encontrou valores do λE em cana-de-açúcar semelhantes aos encontrados no presente estudo, variando de 50 a 300 $W m^{-2}$. Os maiores valores do λE indicam a ocorrência de áreas com elevada densidade de vegetação, geralmente apresentando maior intensidade de fluxo de energia próxima à fase de maturação e colheita da cultura.

Os menores valores do λE indicam áreas com baixa densidade de vegetação, da mesma forma como encontrado por Dantas (2013), que estimou valores do λE mais elevados em áreas de cana-de-açúcar adensada e os mais baixos em áreas de solo exposto ou em regiões onde a vegetação é esparsa.

Tabela 5 - Parâmetros biofísicos da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco. Saldo de radiação (R_n), TVDI, coeficiente Priestley-Taylor (α_{PT}), fluxo de calor latente (λE).

Parâmetros biofísicos	03/09/2013			22/09/2014			24/08/2015			10/08/2016		
	Mínimo	Média	Máxima	Mínimo	Média	Máxima	Mínimo	Média	Máxima	Mínimo	Média	Máxima
R_n ($W m^{-2}$)	464,61	527,97	556,41	488,30	568,81	596,43	437,23	494,	520,26	411,51	470,09	499,45
TVDI	0,00	0,23	0,90	0,00	0,64	1,00	0,52	0,67	0,90	0,00	0,73	1,00
α_{PT}	0,07	0,90	1,26	0,00	0,36	1,23	0,09	0,26	0,41	0,00	0,20	0,87
λE ($W m^{-2}$)	15,86	240,95	345,29	1,42	111,20	185,56	20,90	60,11	98,16	0,08	50,46	215,49

A Figura 3 mostra a evapotranspiração de referência pelo método de Priestley-Taylor (ET_{0PT}), apresentando variação de 0 a 3,65 $mm dia^{-1}$ encontrado em 03/09/2013, data na qual foi

encontrada a maior média de ET_{0PT} na área analisada, 2,62 $mm dia^{-1}$, a menor média foi encontrada em 10/08/2016.

Tais valores de ET_0 se mostraram semelhantes aos de Santos (2016) que encontrou variação de valores de ET_0 de cana-de-açúcar entre $0,54$ a $2,83 \text{ mm dia}^{-1}$, assim como Machado et al. (2014), na região do litoral sul de Pernambuco, encontraram ET_0 variando de 2 a $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$.

Silva et al. (2015), no município de Capim-PB, testando diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração, encontraram valores médios ao longo de um ciclo da cultura de $3,74$ a $4,86 \text{ mm dia}^{-1}$. Além de Teodoro et al. (2015), que encontraram valores de evapotranspiração de $1,58$ a $5,9 \text{ mm dia}^{-1}$ e observaram valores com maior amplitude.

A coloração vermelha dos talhões (Figura 3) indica áreas com baixa ET_{PT} , geralmente áreas com baixa presença de vegetação, indicando baixos valores do NDVI e EVI. Tais talhões encontram-se em fases fenológicas iniciais e após a colheita, momento em que o solo fica mais exposto à radiação solar direta, e o processo de ET_{PT} decresce por conta da supressão da massa vegetal da área.

A coloração verde indica ET_{PT} elevada, sendo áreas com maior presença vegetal no qual a cana-de-açúcar se encontra em fase de desenvolvimento e elevada atividade fotossintética.

Em 03/09/2013 é notória a presença majoritariamente da coloração verde, evidenciando que nesta data a cana-de-açúcar está em estágio fenológico avançado, permitindo a ocorrência de uma alta taxa de ET_{PT} . As bordas do campo apresentam baixa evapotranspiração pelo fato de serem áreas de circulação onde não existe a presença da cana-de-açúcar, assim como, as entrelinhas dos talhões apresentam ET_{PT} média, exibindo coloração verde.

A evapotranspiração em valores elevados indicou uma grande quantidade de água transferida do sistema solo-planta para a atmosfera, motivada pelos fatores climáticos locais como a alta temperatura da superfície, elevando o fluxo de calor no solo e, também, a época de análise das imagens, que foi em um período seco da região (maio a outubro).

Observou-se, ainda, que quanto maior a evapotranspiração, maior foi a quantidade a ser reposta no sistema solo-planta, por meio da irrigação para a cultura apresentar um bom desenvolvimento, melhorando a produção e não sendo afetada pelo estresse hídrico. Dessa forma, a determinação da evapotranspiração é parte importante no manejo da irrigação, utilizando a água de maneira racional.

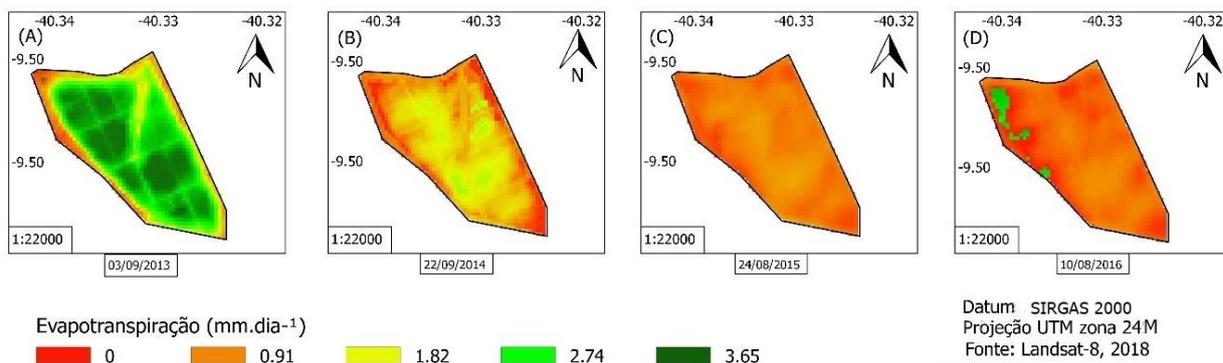


Figura 3 - Evapotranspiração método Priestley-Taylor da cana-de-açúcar do campo dominicana na região do Vale do Submédio do São Francisco. Sendo: (A) 03/09/2013, B. 22/09/2014, C. 24/08/2015, D. 10/08/2016.

Validação da evapotranspiração real

A Figura 4 ilustra a comparação entre a evapotranspiração real obtida pelo método de Priestley-Taylor e a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith. O coeficiente de determinação (R^2) apresentou valor de $0,75$, significativo ao nível de confiança de 95% ($p < 0,00176$), indicando que o modelo proposto por Priestley-Taylor é capaz de explicar em $75,63\%$ a evapotranspiração obtida via método de Penman-Monteith.

O valor de R^2 se mostrou satisfatório confirmando a validação como uma ferramenta capaz

de ser utilizada como alternativa ao método padrão apresentando resultados eficazes. O coeficiente de Pearson (r) foi de $0,88$, conferindo, assim, condição satisfatória de correlação entre os dois modelos avaliados, sendo que a correlação se estabeleceu positiva definida como forte. O Erro Médio encontrado foi de $1,81 \text{ mm dia}^{-1}$. O valor positivo do EM mostra que o método de Priestley-Taylor superestima tais valores. Silva et al. (2015) também encontram valor positivo de EM mostrando que o método do Priestley-Taylor superestimou os valores da E_{Tr} pelo método do balanço hídrico.

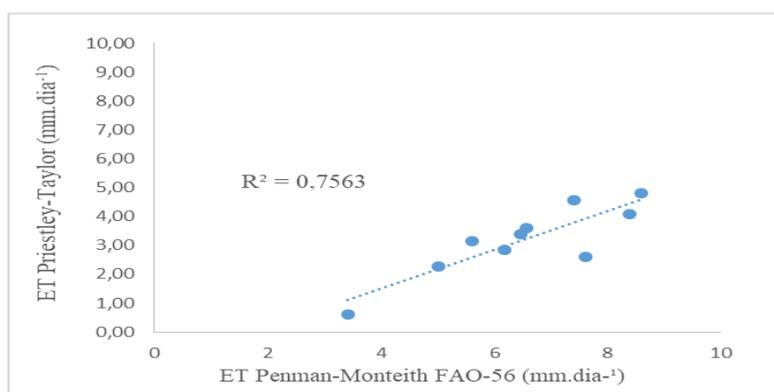


Figura 4 - Evapotranspiração real da cana-de-açúcar do campo Dominicana na região do Vale do Submédio do São Francisco.

4. Conclusões

O método Priestley-Taylor foi capaz de estimar a evapotranspiração de referência em áreas de produção da cana-de-açúcar na região do Vale do Submédio do São Francisco, utilizando imagens do satélite Landsat-8 e dados meteorológicos de superfície de modo satisfatório.

A comparação da evapotranspiração real de Priestley-Taylor com a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith FAO-56 mostrou-se eficiente, definindo o método de Priestley-Taylor como uma alternativa de substituição eficaz na estimativa da evapotranspiração em regiões semiáridas, na ausência de dados suficientes da equação padrão.

Referências

- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2002. SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land. Advanced training and Users Manual. Idaho implementation, version 1.0.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000. SEBAL - Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229, 87-100.
- Burman, R.D., Pochop, L.O., 1994. *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Elsevier, Amsterdam.
- Choudhury, B.J., Ahmed N.U., Idso S.B., Reginato R.J., Daughtry C.S.T., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment* 50, 1-17.
- CODEVASF. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, 2019. Submédio São Francisco. Disponível: <http://www2.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/recus/submedio-sao-francisco>. Acesso: 18 fev. 2019.
- Dantas, M.J.F., 2013. Evapotranspiração na sub-bacia do Riacho Jardim - CE, por Sensoriamento Remoto. Tese. (Doutorado). Botucatu, UNESP.
- Devore, J.L., 2006. Probabilidade e Estatística: para engenharia e ciências. Thomson Pioneira, São Paulo.
- Esteves, B.S., Sousa, E.F., Mendonça, J.C., Lousada, L.L., Muniz, R.A., Silva, R.M., 2012. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 4, 663-670.
- Fernandes, A.L.T., Mengual, R.E.C.G., Melo, G.L., Assis, L.C., 2018. Estimation of reference evapotranspiration for coffee irrigation management in a productive region of Minas Merais Cerrado. *Coffee Science* 4, 426-438.
- Ferreira, R.C., 2014. Evapotranspiração e produtividade de água no primeiro ciclo da cana-de-açúcar submetida à irrigação subsuperficial no semiárido do Brasil. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.
- Giongo, P.R., Moura, G.B.A., Silva, B.B., Rocha, H.R., Medeiros, S.R.R., Nazareno, A.C., 2010. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 3, 279-287.
- Gomes, L.C.F., Santos, C.A.C., Almeida, H.A., 2013. Balanço de energia à superfície para a cidade de Patos-PB usando técnicas de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física* 1, 15-28.
- Huang, Y., Tian, Q., Du, L., Sun, S., 2013. Analysis of spatial-temporal variation of agricultural drought and its response to ENSO over the past 30 years in the Huang Huai-Hai region, China. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* 4, 745-759.
- Khaldi, A., Khaldi, A., Hamimed, A., 2014. Using the Priestley-Taylor expression for estimating actual evapotranspiration from satellite Landsat ETM + data. *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water-*

- Society Interactions Proceedings of ICWRS 364-398.
- Lira, V.M., 2008. Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de-açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.
- Lopes, I., Cerqueira Júnior, E.P., Melo, J.M.M., Leal, B.G., 2017. Potencial de geração de energia eólica no submédio São Francisco. *Journal of Environmenta Analysis and Progress* 4, 330-340.
- Machado, C., Silva, B.B., Albuquerque, M.B., Galvncio, J.D., 2014. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM – Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29, 55-67.
- Oliveira, N.F., Silva, M.T., Gonçalves, A.A.S., Araújo, R.M.S., 2014. Variabilidade espaço temporal da Evaporação Potencial no submédio do rio São Francisco utilizando a análise fatorial em componentes principais. *Ciência e Natura* 36, Ed. Especial II, 462-473.
- Pinheiro, M.P.M.A, Cruz, R.L., Simões, W.L., 2015. Comportamento do teor de água num solo cultivado com cana-de-açúcar irrigada com diferentes lâminas. *Revista Brasileira de Energias Renováveis* 4, 30-42.
- Priestley, C.H.B, Taylor, R.J., 1972. On the assessment of sur-face heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100, 81-92.
- Primo, D.F., Trevisan, D.P., Duarte, R.T., 2019. Análise comparativa de métodos de estimativa de evapotranspiração para fins agrícolas na região de São Carlos-SP. *Revista Brasileira de Iniciação Científica* 6, 13-32.
- Sá, P.C.C., 2016. Estimativa do saldo de radiação em cultivo irrigado de cana-de-açúcar utilizando dados de sensoriamento remoto orbital. Dissertação (Mestrado). Mossoró, UFRSA.
- Sales, R.A., Oliveira, E.C., Lima, M.J.A., Gelcer, E.M., Santos, R.A., Lima, C.F., 2018. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. *Irriga* 23, 154-167.
- Sanches, L., Alves, M.C., Campelo Junior, J.H., Nogueira, J.S., Dalmagro, H.J., 2010. Estimativa do coeficiente Priestley-Taylor em floresta monodominante Cambarazal no Pantanal. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 448-454.
- Sandholt, I., Rasmusen, K., Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Enviromenmt* 79, 213-224.
- Santos, J.E.O., 2016. Evapotranspiração da cana-de-açúcar obtida por sensoriamento remoto no município de Botucatu-SP. Dissertação (Mestrado) Botucatu, UNESP.
- Santos, J.É.O., Nicolete, D.A.P., Filgueiras, R., Leda, V.C., Zimback, C.R.L, 2015. Imagens do Landsat-8 no mapeamento de superfícies em área irrigada. *Irriga, Edição Especial*, 1, 30-36.
- SATVEG. Sistema de Análise Temporal da Vegetação. Disponível: <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/pages/home.html>. Acesso: 20 nov. 2018.
- Schirenbeck, W.S., 2016. Padrão espaço temporal do TVDI em área de cultivo de soja. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.
- Sentelhas, P.C., Pereira, A.R., Folegatti, M.V., Pereira, F.A.C., Villa Nova, N.A., Maggiotto, S.R., 2000. Variação sazonal do parâmetro de Priestley-Taylor para estimativa diária de evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 8, 49-53.
- Silva, B.B., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 13, 201-211.
- Silva, S., Dantas Neto, J., Souza, J.L., Lyra, G.B., Santos, M. A.L., 2015. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19, 849-856.
- SONDA. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Dados Ambientais Petrolina-PE. Disponível: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>. Acesso: 04 jan. 2018.
- Tartari, R., Machado, N.G., Anjos, M.R., Cunha J.M., Musis, C.R., Nogueira, J.S., Biudes, M.S., 2015. Análise de índices biofísicos a partir de imagens TM Landsat 5 em paisagem heterogênea no Sudoeste da Amazônia. *Revista Ambiente Água* 10, 943-953.
- Teodoro, I., Dantas Neto, J., Holanda, L.A., Sampaio Neto, G.D., Souza, J.L., Barbosa, G.V.S., Lyra, G.B., 2015. Weather variables, water balance, growth, and agro industrial yield of sugarcane. *Engenharia Agrícola* 35, 76-88.
- USGS. United States Geological Survey. EarthExplorer. Disponível: https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php. Acesso: 20 Jan. 2018.
- Wang, S., Davidson, A., 2007. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 133-142.
- Xu, C.Y., Singh, V.P., 2000. Evolution and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrology Processes* 14, 339-349.