

## EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DA BANANA- NANICA DETERMINADA PELO ALGORITMO METRIC NO SEMIÁRIDO DO CEARÁ<sup>1</sup>

RENATA RICHELLE SANTOS DINIZ<sup>2</sup>; MAILSON ARAÚJO CORDÃO<sup>3</sup>; HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA<sup>4</sup> E CARLOS WAGNER OLIVEIRA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Trabalho oriundo da Dissertação de Mestrado do primeiro autor.

<sup>2</sup> Engenheira de Biosistemas, Mestranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Rua: Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Bodocongó, CEP: 58429-900. Campina Grande, Paraíba, Brasil. renata\_richelle@hotmail.com.

<sup>3</sup> Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Rua: Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Bodocongó, CEP: 58429-900. Campina Grande, Paraíba, Brasil. mailson.cordao@gmail.com.

<sup>4</sup> Engenheiro Agrônomo Ph.D. Professor Titular, Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Rua: Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Bodocongó, CEP: 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil, hugo\_carvalho@hotmail.com.

<sup>5</sup> Professor PhD, Universidade Federal do Cariri - Av. Ten. Raimundo Rocha, 1639, Cidade Universitária, CEP: 63048-080, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, carlos.oliveira@ufca.edu.br.

### 1 RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estimar a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) diária através da aplicação do algoritmo METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration*) a partir de técnicas de sensoriamento remoto, numa área irrigada com banana-nanica no município de Barbalha, CE e comparar as estimativas da ET com o método de Penman-Monteith. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat-8 OLI/TIRS e dados meteorológicos obtidos numa estação meteorológica automática. Feito o processamento das imagens, determinou-se as  $ET_r$ 's diárias estimadas a partir da densidade de fluxo de calor latente (LE), obtida como resultado da equação do balanço de energia. As evapotranspirações diárias na área estudada apresentaram valores determinados pelo METRIC entre 5,0 e 6,8 mm dia<sup>-1</sup>, os quais corroboram com resultados encontrados na bibliografia. Comparando os valores de  $ET_r$  estimados pelo METRIC e pelo método de Penman- Monteith, observou-se diferenças relativamente baixas, inferiores a 6,0%, o que enquadra como um nível de precisão satisfatório e aceitável, logo, essa é uma boa ferramenta para a determinação das necessidades de água das plantas e na tomada de decisões quanto ao uso dos recursos hídricos.

**Palavras-Chave:** sensoriamento remoto, uso consuntivo, *Musa spp.*

**DINIZ, R. R. S.; CORDÃO, M. A. C.; GUERRA, H. O.C.; OLIVEIRA, C.W.  
REAL EVAPOTRANSPIRATION OF THE DWARF CAVENDISH BANANA  
DETERMINED BY THE METRIC ALGORITHM IN THE SEMIARID REGION OF  
CEARA**

## 2 ABSTRACT

The present work aimed to estimate the daily real evapotranspiration ( $ET_r$ ) through the application of the METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration*) algorithm by means of remote sensing techniques, in an irrigated area cultivated with dwarf cavendish banana in the municipality of Barbalha, CE and to compare the  $ET_r$  with the one calculated by the Penman-Monteith method. Landsat-8 OLI / TIRS satellite images and meteorological data obtained in an automatic meteorological station were used. After processing the images, the daily estimated  $ET_r$ 's were determined from the latent heat flux density (LE), obtained as a result of the energy balance equation. The daily evapotranspiration's in the studied area presented values estimated by the METRIC algorithmic between 5.0 and 6.8 mm day<sup>-1</sup>, which of them corroborate with the results found in the bibliography. Comparing the values of  $ET_r$  estimated by the METRIC in relation to the Penman-Monteith method, low differences were observed, less than 6.0%, which fits as satisfactory and acceptable level of precision, so this is a good tool for the determination of the crop water requirements and in the decisions-making regarding to the use of water resources.

**Keywords:** remote sensing, water consumption, *Musa spp.*

## 3 INTRODUÇÃO

A água, um bem finito e cada vez mais escasso que está enfrentando problemas de quantidade e de qualidade, não é somente um elemento imprescindível à vida, mas também fator condicionante do desenvolvimento econômico e do bem estar social (DINIZ, 2018).

Fatores ambientais provocam falta ou escassez de chuva o que contribui para a estiagem no semiárido, levando, assim, a incidência das secas. Isto torna essencial o emprego da irrigação e drenagem, praticas que tendem a suprir as necessidades parciais ou totais de água das culturas e promovem a conservação dos recursos ambientais. Visando racionalizar a irrigação, o conhecimento das necessidades de água das culturas, ou evapotranspiração, é imprescindível (BRASIL, 2013).

Existem diversos métodos diretos e indiretos para estimar a evapotranspiração. Os diretos consistem de medições *in situ* do balanço hídrico no solo e controle da umidade do solo e são considerados os métodos mais exatos para determinar a

evapotranspiração (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Os métodos indiretos ou empíricos se baseiam em dados meteorológicos, sendo o método de Penman-Monteith, a forma mais exata de cálculo da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>). De acordo com Allen *et al.* (2002), os métodos diretos e indiretos de estimativa da evapotranspiração apresentam alta confiabilidade e precisão, porém, esses apresentam limitações quanto a estimativa da evapotranspiração para grandes áreas. Essas limitações incentivam a utilização de técnicas como o sensoriamento remoto, a qual permite através de imagens de satélites, a cobertura de grandes áreas e a obtenção da evapotranspiração em escala regional (BOEGH; SOEGAARD; THOMSEM, 2002; HAFEEZ *et al.*, 2002).

O balanço de energia, realizado por técnicas de sensoriamento remoto, prevê que do total de energia disponível na superfície do solo, parte é destinada ao aquecimento do solo, e parte ao aquecimento do ar, e o restante é utilizado para a evapotranspiração das culturas (SILVA, 2019). O balanço de energia

possibilita a obtenção do fluxo vertical de calor latente e, conseqüentemente, a evapotranspiração por meio—da diferença dos fluxos, também verticais, de calor no solo, calor sensível e o saldo de radiação.

Nas duas últimas décadas, foram desenvolvidas diferentes técnicas de sensoriamento remoto com vistas à determinação da ETr. Entre essas técnicas, destacam-se o “*Surface Energy Balance Algorithm for Land*” (SEBAL) (BASTIAANSEN *et al.*, 1998) e o “*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*” (METRIC) (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007).

O algoritmo METRIC foi desenvolvido por Allen *et al.* (2005) e Tasumi *et al.* (2005), o qual foi destinado à estimativa do balanço de energia e ao cálculo da evapotranspiração com procedimentos muito similares ao SEBAL, com algumas particularidades relacionadas à escolha do pixel úmido e ao cálculo da diferença de temperatura nesse pixel. Além disso, outra diferença entre esses dois métodos diz respeito à estimativa da evapotranspiração diária (GIONGO; VETTORAZZI, 2011).

O METRIC segue todos os passos do SEBAL e tem como ponto positivo não necessitar de muitas variáveis meteorológicas em nível de superfície onde o pixel frio é selecionado dentro de uma área irrigada (ALLEN *et al.*, 2005; LIRA, 2008; TASUMI *et al.*, 2005).

Os objetivos do presente trabalho foram estimar e comparar a evapotranspiração de uma cultura de banana numa área irrigada do município de Barbalha, CE, através do algoritmo METRIC e compará-las com o método padrão de Penman-Monteith.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

A área na qual foi realizada o estudo é cultivada a banana-nanica (*Musa spp*) e está localizada na divisa dos municípios de Barbalha e Missão Nova (Figura 1), região sul do estado do Ceará, cujas coordenadas geográficas são 07° 17' 07,91" Sul e 39° 12' 58" Oeste, apresentando altitude de 398 metros em relação ao nível do mar (GOOGLE EARTH PRO, 2020).

**Figura 1.** Localização da área experimental em Barbalha, CE, destacando-se a parcela amostral com o cultivo irrigado da banana nanica (em vermelho).



Fonte: Google Earth Pro (2020)

O solo local é uma associação de Latossolos vermelho- distróficos (ARAÚJO *et al.*, 2013). Com base na classificação de Koppen- Geiger, o clima na localidade em estudo é do tipo quente e úmido- Aw (MEDEIROS *et al.*, 2013). As informações climáticas coletadas, foram obtidas na estação meteorológica automática de Barbalha, Ceará (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2016). Foram utilizadas três imagens geradas pelo *Operational Land Imager - OLI* e *Thermal Infrared Sensor - TIRS* do satélite Landsat 8, órbita 217 e ponto 65, adquiridas junto ao *United States*

*Geological Survey* (USGS), correspondentes aos dias: 22 de maio (dias após a semeadura (DAS) 143), 10 de agosto (DAS 223), e 29 de outubro (DAS 303) do ano de 2016.

A escolha das imagens ocorreu de acordo com a baixa cobertura de nuvens, visando uma melhor qualidade de processamento, atendendo os requisitos da pesquisa e as datas com a representação das condições de cobertura do solo em períodos chuvoso e seco. Utilizando os dados obtidos da estação meteorológica que estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Dados meteorológicos utilizados para a obtenção da evapotranspiração de referência (ET ) segundo o método de Penman-Monteith, para a região de Barbalha, CE.

Data das imagens	Temperatura (°C)		U. relativa (%)		Velocidade do Vento (m/s)	Radiação Global MJ/m <sup>2</sup> /d
	Máx.	Mín.	Máx.	Min.		
22/05/2016	28,4	26,7	75,0	71,0	2,1	22,9
10/08/2016	23,3	19,6	69,0	63,3	2,2	23,5
29/10/2016	24,8	21,0	57,6	51,3	2,1	27,9

U: Umidade; Máx: Máxima; Mín: Mínima.

Fonte: Organização dos autores (2021).

Por meio dos dados descritos acima, foi possível determinar a evapotranspiração

$$E_{\theta} = \frac{0,4 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{9}{T_a + 2}\right) \cdot U_2}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,3 \cdot U_2)} \cdot (e_s - e_a) \quad (1)$$

Em que:  $E_{\theta}$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $R_n$  é o saldo de radiação ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), considerado como valor insignificante quando se utiliza cálculos diários;  $T$  é a temperatura média diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $e_s$  é a pressão de vapor na saturação (kPa);  $e_a$  é a pressão atual de vapor média diária (kPa);  $\gamma$  é a declividade da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ); e  $\Delta$  é o coeficiente psicrométrico, considerado constante,  $\Delta = 0,0622 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ . O coeficiente psicrométrico se mantém constante, pois ele é uma função da pressão atmosférica, a qual varia pouco ao longo do ano (95,03 kPa), e também do calor latente de evaporação da água, que é pouco afetado pela temperatura.

O método de Penman -Monteith permite calcular a evapotranspiração real da cultura ( $E_{\theta c}$ ) por meio da multiplicação da  $E_{\theta}$  pelo Coeficiente de Cultura ( $K_c$ ), segundo recomendações de Allen *et al.* (1998) de acordo com a Equação 2.

$$E_{\theta c} = E_{\theta} \cdot K_c \quad (2)$$

Os valores de  $K_c$  variam em função dos estágios da cultura analisada. A bananeira irrigada no semiárido brasileiro apresenta um coeficiente de cultura médio  $K_c$  de 1,21, valor recomendado por Oliveira

de referência ( $E_{\theta}$ ) pelo método de Penman-Monteith por meio da Equação 1.

*et al.* (2012) para bananeiras em estado intermediário de crescimento.

A  $E_{\theta a}$  foi determinada através da equação do balanço de energia, calculada como o resíduo de diferença entre a radiação líquida para a superfície e as perdas devido ao fluxo de calor sensível (energia usada para aquecer o ar) e fluxo de calor do solo (energia armazenada no solo e na vegetação), de acordo com a Equação 3.

$$LE = R_n - G - H \quad (3)$$

Em que:  $LE$  é o fluxo de calor latente ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $R_n$  é a radiação líquida na superfície ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $G$  é o fluxo de calor do solo ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

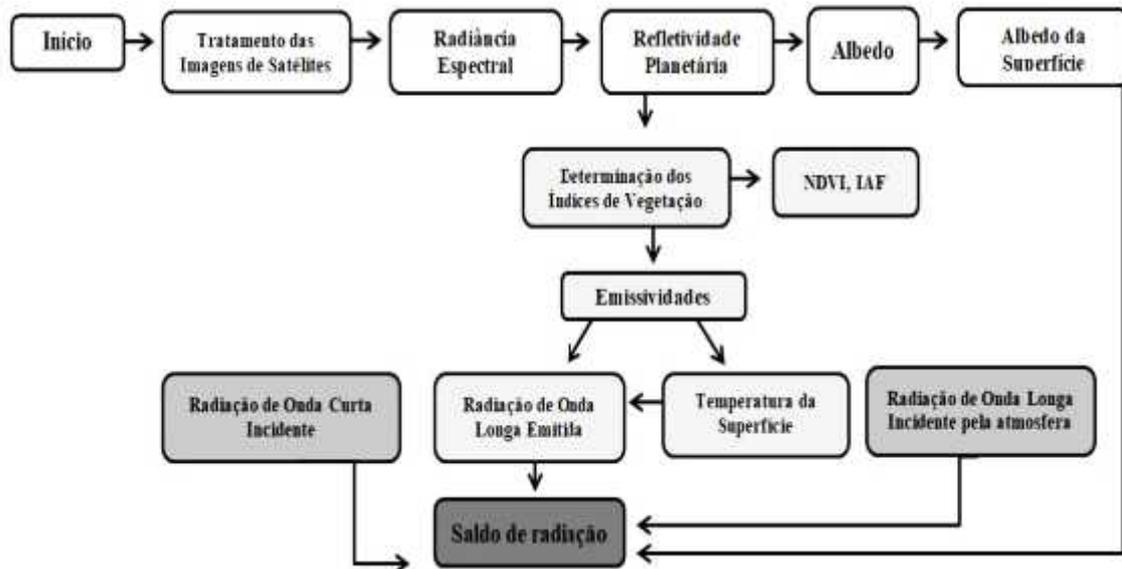
Para estimar os diferentes componentes do balanço de energia, utilizou-se o algoritmo METRIC, em que a radiação líquida na superfície ou mais comumente conhecida por saldo de radiação-  $R_n$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) de uma superfície, representa a quantidade de energia na forma de ondas eletromagnéticas disponíveis para repartir entre os fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração, aquecimento do ar, aquecimento do solo e fotossíntese, (MACHADO *et al.*, 2014). O saldo de radiação  $R_n$  foi obtido a partir da Equação 4 com etapas sequenciais conforme esquema ilustrado na Figura 2.

$$R_n = R_{s, \text{inc}} \cdot (1 - \alpha_s) - R_{\text{ol,emi}} + R_{\text{ol,at}} - (1 - \epsilon_c) \cdot R_{\text{ol,at}} \quad (4)$$

Em que:  $R_{s, \text{inc}}$  é a radiação de onda curta incidente;  $\alpha_s$  é o albedo superficial de cada pixel;  $R_{\text{ol,emi}}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel;  $R_{\text{ol,atm}}$  é a

radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel e  $\epsilon_c$  é a emissividade de cada pixel.

**Figura 2.** Diagrama de etapas computacionais do processamento para a obtenção do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) por meio do algoritmo *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC).



Fonte: Organização dos autores (2021)

O fluxo de calor no solo ( $G$ ) é a taxa de calor armazenado pelo solo e pela vegetação, e foi calculado através da

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha_s} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_s e + 0,0074 \cdot \alpha_s^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot N^{-4}) \right] \cdot R_n \quad (5)$$

Em que:  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $\alpha_s$  é o albedo superficial para efeito de correção dos valores de fluxo de calor no solo para corpos de água, em que o *Normalized Difference Vegetation Index* ( $NDVI < 0$ ) poderá utilizar a seguinte expressão:  $G = 0,5 \cdot R_n$  segundo Allen *et al.* (2002).

A determinação do fluxo de calor sensível-  $H$  ( $W / m^2$ ), parte da concepção de existir uma diferença de temperatura  $dT$  próxima da superfície do solo entre dois pontos com condições extremas de temperatura e umidade (pixel frio e quente) dentro da área de estudo, determinada pela Equação 6.

$$dT = a + b \cdot T_s \quad (6)$$

Equação 5, desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio dia.

Em que:  $a$  e  $b$  são coeficientes da relação linear e são obtidos nesse processo através das componentes do balanço de energia nos pixels frio e quente e  $T_s$  a temperatura de superfície em cada pixel. A escolha dos pixels, denominados também de âncoras, foi realizados visualmente. O pixel quente foi escolhido numa área de solo exposto e o pixel frio foi selecionado na área agrícola com cultivo da banana em pleno desenvolvimento.

Os coeficientes  $a$  e  $b$  são determinados utilizando dois pares de valores para  $dT$  e  $T_s$ , pelas Equações 7 e 8:

$$a = \frac{dT_q - dT_f}{T_{sq} - T_{sf}} \quad (7)$$

$$b = \frac{dT_q - u}{T_{sq}} \quad (8)$$

Em que:  $T_{sq}$  e  $T_{sf}$  são as temperaturas da superfície nos pixels quente e frio, ajustados ao dado de elevação para cada pixel na imagem usando o modelo digital de elevação.

O pixel frio é selecionado em uma área agrícola com cultivo em pleno desenvolvimento, com características similares à cultura de referência em que se considera  $LE = 1,05 \times ET$  (em que  $ET$  é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; GIONGO e VETTORAZZI, 2011),  $H_f = (R_n - G)_f - LE_f$ , e  $dT$  no pixel frio é calculada pela Equação 9.

$$dT_f = \frac{H_f \cdot r_{ahf}}{\rho_f \cdot C_p} \quad (9)$$

Em que:  $r_{ahf}$  é estimado para as condições de estabilidade e para a rugosidade da superfície do pixel frio;  $\rho_f$  é a densidade do ar calculado para o pixel frio, e  $C_p$  é o calor específico do ar, a pressão constante ( $J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

Com o conhecimento do  $dT$  e do mapa da resistência  $r_{ah}$ , pode-se obter um mapa inicial de  $H$ . Os valores obtidos não representam adequadamente o  $H$  de cada pixel e servem, apenas como valores iniciais de um processo de etapas repetitivas, em que nas etapas subsequentes são consideradas, efetivamente, as condições de estabilidade de cada pixel. Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\Psi_m$ ) e de calor ( $\Psi_h$ ) devem ser considerados. Para isto, foi utilizada a formulações de Paulson (1970) e Webb (1970), dada a condição de neutralidade (se for  $L_m = 0$ ):  $\Psi_m = 0$  e  $\Psi_h = 0$ . Em que o valor corrigido para a

velocidade de fricção ( $u_*$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) é dado pela Equação 10.

$$u_* = \frac{k u_2}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \Psi_m(z_2)} \quad (10)$$

Em que:  $k$  é a constante de Von Karman (0,41),  $u_{200}$  é a velocidade do vento a 200 m ( $\text{m s}^{-1}$ );  $Z_0$  é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m); e  $\Psi_m(z)$  é a correção da estabilidade para o transporte de *momentum* a 200 m.

Obtido o  $u_*$  corrigido é possível ter o valor corrigido para a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ,  $\text{s m}^{-1}$ ) a partir da Equação 11.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_h(z_2) + \Psi_h(z_1)}{u_* \cdot k} \quad (11)$$

Em que:  $Z_2 = 2,0$  m,  $Z_1 = 0,1$  m e  $\Psi_h(z_2) = 2,0$  m e  $\Psi_h(z_1) = 0,1$  m todos esses valores equivalem às correções de estabilidade para o transporte de calor.

Corrigidos os valores de  $u_*$  e  $r_{ah}$  retorna-se à determinação da função da diferença de temperatura, repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente, em que foi ganho, conseqüentemente, a estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura ( $dT$ ) e da resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ) em cada pixel da imagem.

Na determinação da evapotranspiração diária ( $ET_{inst}$ ) no instante da imagem de satélite, é realizado o cálculo para cada pixel, dividindo-se o fluxo de calor latente  $LE$  ( $\text{JKg}^{-1}$ ) pelo calor latente de vaporização ( $\text{JKg}^{-1}$ ), originando a Equação 12:

$$E_{li} = 3600 \cdot \frac{L}{\lambda \rho_w} \quad (12)$$

Em que:  $ET_{inst}$  é a evapotranspiração diária ( $\text{mm h}^{-1}$ ); 3,600 é a conversão de

segundos a horas,  $w$  é a densidade da água ( $1000\text{Kg m}^{-3}$ ); e  $L$  é o calor latente de

$$\lambda = [2,501 - 0,00236(T_s - 273,15)] \cdot 10^6 \quad (13)$$

A fração de evapotranspiração de referência ( $ET_{rF}$ ) é calculada como a razão da ET diária instantânea calculada ( $ET_{inst}$ ) de cada pixel e a evapotranspiração de referência ( $ET_r$ ) calculada pelo modelo de Penmann-Monteith, Equação 14, segundo Allen *et al.* (2007), que supõem que a  $ET_{rF}$  permanece constante durante todo o dia.

$$ET_{rF} = \frac{E_{inst}}{E_r} \quad (14)$$

Em que:  $ET_{inst}$  é a evapotranspiração diária instantânea, Equação 12 ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e  $ET_r$  é a evapotranspiração de referência horária segundo o método de Penmann-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998). No cálculo de  $ET_{rF}$  na Equação 14, cada pixel refere-se a um único valor para  $ET_{inst}$ , que é derivado de um valor comum para  $ET_r$ , que por sua vez é derivado do representante dos dados da estação meteorológica. Finalmente, a  $ET_{r24h}$  ( $\text{mm} / \text{dia}$ ) é calculada pela Equação 15 para cada pixel da imagem:

$$ET_{r2} = C_{rad} (ET_{rF})(ET_{r2}) \quad (15)$$

Sendo  $ET_{rF}$  é assumido igual ao  $ET_{rF}$  determinado no momento de passagem do satélite;  $ET_{r24}$  é a evapotranspiração de referência diária; e  $C_{rad}$  é o termo de correção usado em terreno inclinado para variação em 24h versus disponibilidade instantânea de energia (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007). Para áreas horizontais, como neste caso  $C_{rad} = 1,0$ .

vaporização ( $\text{JKg}^{-1}$ ), calculado através da Equação 13:

#### 4.1 Análises comparativas

A comparação entre as evapotranspirações obtidas pelo METRIC e pelo método de Penman-Monteith foi feita mediante os cálculos dos erros absoluto médio (EAM) e relativo médio (EMR), obtidos através das Equações 16 e 17, respectivamente, descritas abaixo:

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_M - ET_P| \quad (16)$$

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_M - E_P}{E_P} \right| \quad (17)$$

Em que,  $ET_{Metric}$  e  $ET_{Penman}$  correspondem, respectivamente, aos valores da evapotranspiração através do modelo METRIC e por meio do método de Penman-Monteith.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Evapotranspiração real pelo método de Penmann-Monteith

A Tabela 2 apresenta os valores de evapotranspiração real ( $ET_{rFAO}$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) calculados pelo produto da Evapotranspiração de referência ( $ET_r$ ,  $\text{mm. dia}^{-1}$ ) determinada pelo modelo físico padrão da FAO-56 (Penmann-Monteith) e o Coeficiente de cultura ( $K_c$ ), para a área de Barbalha, CE, nas datas de 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.

**Tabela 2.** Dados da evapotranspiração real pelo modelo físico padrão da FAO-56 (PENMAN- MONTEITH) para Barbalha, CE.

Data das imagens	ET Referência (mm)	ET <sub>rFAO</sub> Atual* (Kc=1,21) (mm)
22/05/2016	4,1	5,0
10/08/2016	4,5	5,4
29/10/2016	5,9	7,1

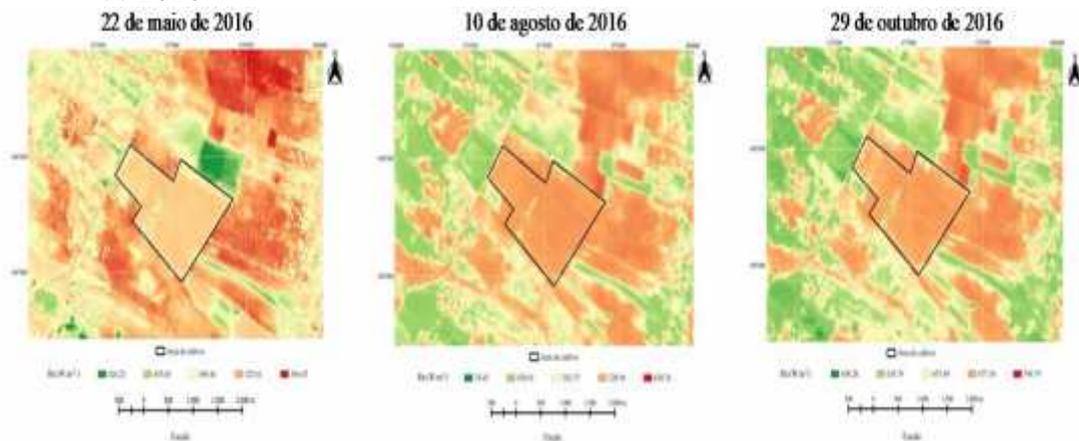
\*ET<sub>rFAO</sub> = ET (Penman) \* Coeficiente de Cultivo Kc

Fonte: Organização dos autores (2021)

## 5.2. Saldo de radiação instantânea (Rn)

Na Figura 3 são apresentadas as cartas temáticas do saldo de radiação instantâneo à superfície referente às datas 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016. Os valores de Rn se situaram entre 420 e 797,8 W.m<sup>-2</sup>, com maiores valores dentro da área cultivada, de 525,0 W.m<sup>-2</sup> (22 de maio), 528,9 W.m<sup>-2</sup> (10 de agosto) e 677,2 W.m<sup>-2</sup> (29 de outubro).

**Figura 3.** Carta temática do saldo de radiação da superfície (Rn)- METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*) para o município de Barbalha, CE em: 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.



Fonte: Organização dos autores (2021)

Silva, Silva e Silva (2015) também encontrou os maiores valores para o Rn em área cultivada, com os valores médios do saldo encontrados em áreas com presença de vegetação de maior porte, com valor

equivalente a 618,94 W.m<sup>-2</sup>, resultado mínimo de 532,21 W.m<sup>-2</sup> e valor máximo de 732,65 W.m<sup>-2</sup>. Santos e Silva (2010), em estudo realizado em áreas irrigadas, também com a cultura da banana,

encontraram  $R_n$  variando entre 600 e 780  $W\ m^{-2}$ .

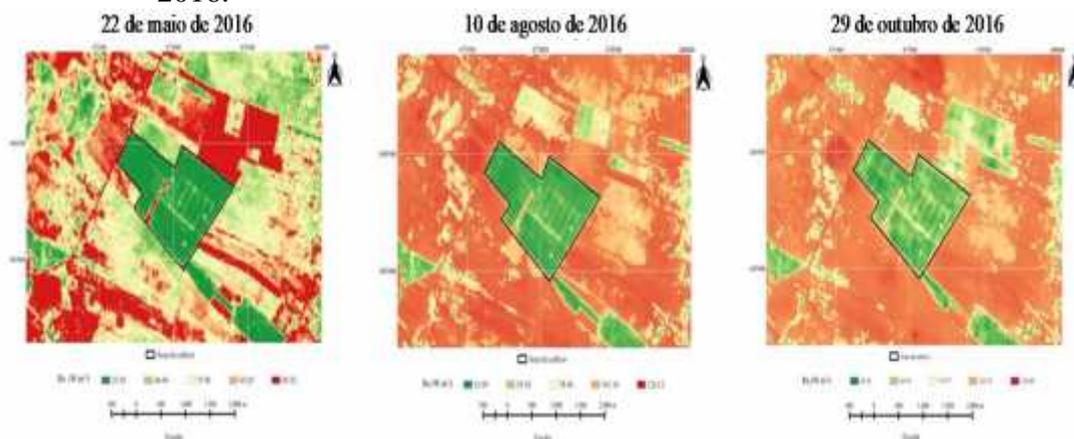
### 5.3. Fluxo de calor no solo (G)

A Figura 4 apresenta as cartas temáticas de fluxo de calor no solo para as datas de 22 de maio (A), 10 de agosto (B) e 29 de outubro (C) do ano de 2016, Barbalha, CE. Percebe-se claramente em ambas as cartas, a ampla predominância da tonalidade verde, correspondente a baixos valores de G na área de cultivo para as três datas avaliadas, cujos valores de G

encontrados foram: 35,30  $W\ m^{-2}$  (22 de maio), 31,99  $W\ m^{-2}$  (10 de agosto) e entre 42,3 e 69,93  $W\ m^{-2}$  (29 de outubro).

As tonalidades laranja e avermelhada correspondem aos maiores valores (entre 80,5 e 152,85  $W\ m^{-2}$ ) de G encontrados, que ressaltaram na cena com maior extensão para os dias 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016, caracterizando pontos que apresentam pouca cobertura vegetal e com solo exposto.

**Figura 4.** Carta temática do fluxo de calor no solo (G)- METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) no município de Barbalha, CE: 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.

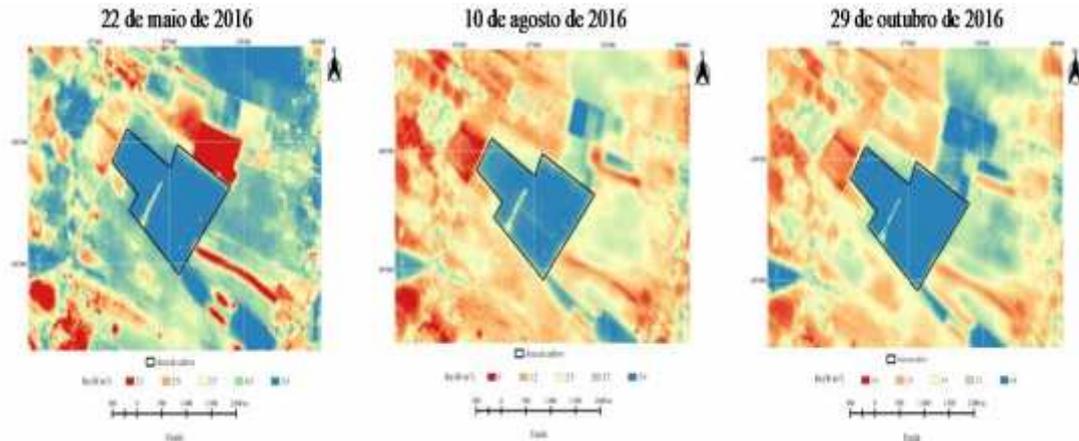


### 5.4. Evapotranspiração ( $E_{Tr_{24h}}$ )

Na Figura 5 estão representados os mapas temáticos da evapotranspiração real diária  $E_{Tr_{24h}}$  ( $mm\ dia^{-1}$ ) no município de

Barbalha, CE para as datas 22 de maio (D), 10 de agosto (E) e 29 de outubro (F) do ano de 2016, obtida utilizando o algoritmo METRIC.

**Figura 5.** Carta temática da evapotranspiração real diária ( $ET_{r24h}$ )- METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*) no município de Barbalha, CE: 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.



Fonte: Organização dos autores (2021)

A evapotranspiração real diária da área de bananal foi de  $5,3 \text{ mm dia}^{-1}$  para o dia 22 de maio, de  $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$  para 10 de agosto e de  $6,8 \text{ mm dia}^{-1}$  para o dia 29 de outubro de 2016. No mês de agosto deveriam ser encontradas as maiores taxas de evapotranspiração, por essas estarem diretamente correlacionadas com o período chuvoso que ocorre no mês anterior. E no mês de outubro, que é um período caracterizado por ser seco devido ao déficit pluviométrico, deveria ocorrer uma redução da umidade do solo, o que acarreta em uma maior extensão de solo descoberto e por consequência em uma redução na taxa evaporativa das plantas.

A  $ET_{r24h}$  na área cultivada, representada pela cor azul, variou entre  $5,0$  e  $6,8 \text{ mm dia}^{-1}$ . Santos, Fontana e Alves (2010), estudando a evapotranspiração da bananeira em região semiárida, encontraram valores diários da ordem de  $5,81$  a  $7,81 \text{ mm dia}^{-1}$ , resultados que corroboram os encontrados no presente estudo. Valores semelhantes foram obtidos por Silva, Silva e Gomes (2010) na Bacia Jaguaribe, estado do Ceará, utilizando imagens TM – Landsat 5, com uma variação na ET de  $5,5$  a  $6,9 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Os valores de  $ET_{r24h}$  menores que  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , representados pela cor azul, são típicos de áreas de solo exposto ou com pouca cobertura vegetativa.

Em todas as imagens há uma grande presença de pixels com valores inferiores a  $3,6 \text{ mm dia}^{-1}$  na cor bege/ alaranjado, que sofre um aumento perceptível nos meses de agosto e outubro, resultante da grande redução na disponibilidade hídrica nas áreas de sequeiro. Ao analisar as imagens entre as datas de estudo (maio, agosto e outubro), verifica-se que o valor estimado da  $ET_{r24h}$  para o dia 22 de maio apresentou um valor visivelmente superior ao das outras duas datas.

### 5.5 Validação da evapotranspiração atual obtida pelo METRIC e com o método de Penman- Monteith

A Tabela 3 apresenta a comparação da evapotranspiração de referência diária ( $ET_r$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ) determinada pelo modelo físico padrão da FAO-56 (Método de Penman-Monteith) e por meio da evapotranspiração real diária ( $ET_{r24h}$ ,  $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida pelo algoritmo METRIC numa área localizada em Barbalha, CE, nas

datas de 22 de maio, 10 de agosto e 29 de outubro do ano de 2016.

**Tabela 3.** Comparação entre a evapotranspiração real diária ( $ET_o$ ) obtida pelo modelo físico padrão da FAO-56 (Penman- Monteith) e a evapotranspiração real diária média ( $ET_r$ ) obtida pelo algoritmo *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) para uma área de bananeira localizada em Barbalha, CE.

Data	$ET_r$ (METRIC)	$ET_o$ (Penman)	Erro absoluto (mm dia <sup>-1</sup> )	Erro relativo (%)
22/05/2016	5,3	5,0	0,3	6,0
10/08/2016	5,0	5,4	0,4	7,4
29/10/2016	6,8	7,1	0,3	4,4

Fonte: Organização dos autores (2021)

Ao comparar as estimativas de  $ET_r$  diária obtida pelo algoritmo METRIC com a  $ET_r$  diária inferida por Penman-Monteith, observou-se respectivamente os valores de 5,3 e 5,0 mm dia<sup>-1</sup> para o dia 22 de maio de 2016, com uma diferença de 0,3 mm dia<sup>-1</sup> ou uma diferença percentual de 7,4%. Já para 10 de agosto de 2016, observou-se nessa devida ordem, valores de evapotranspiração iguais a 5,0 e 5,4 mm dia<sup>-1</sup>, com uma diferença de 0,4 mm dia<sup>-1</sup> ou um percentual de 7,4. Em 29 de outubro de 2016, obteve-se os valores de 6,8 e 7,1 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente, com uma diferença de 0,3 mm dia<sup>-1</sup> ou 4,4% (diferença percentual).

Valores semelhantes para a evapotranspiração atual da bananeira foram obtidos por Silva (2019), que encontrou valores entre 5,0 e 7,1 mm dia<sup>-1</sup>. Também corroboram com os resultados obtidos por Silva, Silva e Gomes (2010) cujos registros de evapotranspiração variaram entre 3,7 e 6,0 mm dia<sup>-1</sup>, e com Santos, Fontana e Alves (2010), que encontraram valores de evapotranspiração diária para a bananeira variando entre 5,81 e 7,81 mm dia<sup>-1</sup>.

Quando comparados os métodos de determinação da evapotranspiração, observou-se que, com exceção do dia 22 de maio de 2016, a evapotranspiração real diária média obtida pelo algoritmo METRIC foi inferior a evapotranspiração

diária calculada pelo modelo de Penman-Monteith. No entanto, as diferenças encontradas entre ambos os métodos foram inferiores a 0,4 mm dia<sup>-1</sup>, equivalente a uma diferença percentual média de 5,9%, considerado como um nível de precisão satisfatório e aceitável dentro do limiar aceitável reportado na literatura a partir de dados de sensoriamento remoto (GLENN *et al.*, 2007).

Assim, para as datas avaliadas, o desempenho do algoritmo METRIC foi similar ao obtido pelo método de Penman-Monteith, que é um método que foi elaborado este por meio do trabalho de diversos especialistas e pesquisadores em colaboração com a Comissão Internacional para a Irrigação e Drenagem e com a Organização Mundial de Meteorologia. Esse método é considerado como padrão na estimativa da Evapotranspiração de referência via dados meteorológicos.

Trezza (2002), após comparar medidas lisimétricas com as estimativas obtidas com técnicas de sensoriamento remoto, encontrou erros absolutos inferiores a 1 mm dia<sup>-1</sup> em áreas agriculturáveis, já Wang, Kimura e Bastiaanssen (2005) estimaram erros absolutos em torno de 0,5 mm dia<sup>-1</sup>. Erros relativos entre 4 e 10% foram encontrados por Bezerra, Silva e Ferreira (2008), quando esses compararam os resultados obtidos com a razão de

Bowen e com o SEBAL. Apontando assim, que os resultados obtidos nesta pesquisa foram muito satisfatórios.

Nesse sentido com os resultados obtidos utilizando o algoritmo METRIC, pode ser considerada uma ferramenta de sensoriamento remoto útil, pois fornece dados especializados, para o monitoramento da dinâmica da ET em áreas agrícolas e vegetação natural, colaborando na compreensão da complexa dinâmica dos processos biofísicos, bem como previsões de tempo e clima.

## 6 CONCLUSÃO

O sensoriamento remoto permite estimar além dos componentes do balanço hídrico, a evapotranspiração real diária por meio do algoritmo METRIC, obtendo-se resultados em consonância aos encontrados na bibliografia para a área irrigada de bananeira, que também foram e

semelhantes aos valores empiricamente determinados pelo método de Penman-Monteith, considerado como método padrão pela FAO. As diferenças entre os métodos encontradas foram relativamente baixas, inferiores a 7,5%, enquadrando-a em um nível de precisão satisfatório e aceitável, podendo considerar-se assim, o uso do algoritmo METRIC como uma ferramenta prática, econômica e eficiente na determinação das necessidades de água das plantas e na tomada de decisões quanto à alocação e o gerenciamento dos recursos hídricos.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas aos autores, permitindo trabalhos e pesquisas como essa.

## 8 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M., MORSE, A.; TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage systems**, Moscow, v.19, n.3, p.251-268, 2005.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASIAANSSEN, W. G. M. **SEBAL - Surface Energy Balance Algorithms for Land: Advance Training and User's Manual**. version 1. Kimberly: The Idaho Department of Water Resources, 2002.
- ARAÚJO, A. O.; MENDONÇA, L. A. R.; LIMA, M. G. S. L.; FEITOSA, J. V.; SILVA, F. J. A.; NESS, R. L. L.; FRISCHKORN, H.; SIMPLÍCIO, A. A. F.; KERNTOPF, M. R.

Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 754-762, 2013.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 229, n. 1, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, n. 1-4, p. 213-229, 1998.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEM, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environmental**, New York, v. 79, n. (2-3), p. 329-343, 2002.

BRASIL. **Lei nº 12.787, de 11 de janeiro de 2013**. Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação. Brasília, DF: Presidência da República, 2013. Disponível em: [goo.gl/fDtOjB](http://goo.gl/fDtOjB). Acesso em: 15 set. 2018.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

DINIZ, R. R. S. **Avaliação dos efeitos do El Niño na pluviometria e nos sistemas hídricos do Cariri Ocidental Paraibano com a utilização de geotecnologia**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Biossistemas) – Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 2018.

GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento do saldo de radiação e evapotranspiração diária, por meio de imagens TM/LANDSAT-5. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: INPE, 2011. p. 4663- 4670.

GLENN, E. P.; HUETE, A. R.; NAGLER, P. L.; HIRSCHBOECK, K. K.; BROWN, P. Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Las Vegas, v. 26, n. 3, p. 139-168, 2007.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**. versão 9.152.0.1. [S. l.]: Google, 2020. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 20 set. 2020.

HAFEEZ, M. M.; CHEMIM, Y.; VAN DE GIESEN, N.; BOUMAN, B. A. M. Field Evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. *In*: SYMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING AND APPLICATIONS, 2002, Ottawa. **Anais [...]**. Ottawa: Canadian, 2002. p. 1-7.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados históricos anuais. Brasília: INMET, 2016. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 set. 2020.

LIRA, V. M. **Obtenção de parâmetros biofísicos e evapotranspiração da cana-de açúcar mediante imagens orbitais na região do sub médio São Francisco**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campo Grande, Campo Grande, 2008.

MACHADO, C. C.; SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, M. B.; GALVÍNIO, J. D.; Estimativa do Balanço de Energia utilizando imagens Tm – Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no Litoral Sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Recife, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.

MEDEIROS, R. M.; SILVA, J. A. S.; SILVA, A. O.; MATOS, R.M.; BALBINO, D. P. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para a área produtora da banana do município de Barbalha, CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 4, p. 258-268, 2013. DOI: 10.7127/rbai.v7n400018. Disponível em: [http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/viewFile/178/pdf\\_143](http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/viewFile/178/pdf_143). Acesso em: 16 fev. 2021.

OLIVEIRA, C. W.; SÁ, J. A.; SILVA, V. P. R.; COSTA, S. C. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da banana com uso de modelo de balanço de energia – METRIC. In: INOVAGRI International Meeting & IV Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 2012. Anais... Fortaleza: **INOVAGRI**, 2012 p. 385-389.

PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind Speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 9, n. 6, p. 857-861, 1970.

SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B. Estimativa da evapotranspiração da bananeira numa região semiárida através do algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete lagoas, v. 16, n. 1, p. 9-20, 2010.

SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, DF, Brasília, v. 45, n. 5, p. 488-496, 2010.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 6, p. 1203-1216, 2015.

SILVA, B. B.; SILVA, S. T. A.; GOMES, H. B. Alterações climáticas decorrentes de mudanças no uso da terra mediante sensoriamento remoto. **Mercator**, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 91-106, 2010.

SILVA, T. T. S. Estimativa de evapotranspiração em regiões do semiárido brasileiro utilizando o algoritmo SEBAL. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de

Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. **Journal of irrigation and drainage engineering**, Reston, v. 1, n. 131, p. 94-109, 2005.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control**. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering) – Utah State University, Logan, 2002.

WANG, J.; KIMURA, R.; BASTIAANSSEN, W. Monitoring ET with Remote Sensing and the Management of Water Resources on a Basin Scale. *In: CERES INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING*, 11., 2005, Chiba. **Anais** [...].Chiba, Japan. 2005. p. 545-556.

WEBB, E. K. Profile Relationships: The Log-linear Range and Extension to Strong Stability. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Londres, v. 96, n. 407, p. 67-90, 1970.