

## EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DO COQUEIRO - ANÃO DETERMINADA PELO MODELO METRIC PARAMETRIZADO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO

MAILSON ARAÚJO CORDÃO<sup>2</sup>; RENATA RICHELLE SANTOS DINIZ<sup>3</sup>; HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA<sup>4</sup> E CRIS LAINY MACIEL SANTOS<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Trabalho oriundo da Tese de Doutorado do primeiro autor.

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, Doutorado 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](mailto:mailson.cordao@gmail.com).

<sup>3</sup> Engenheira de Biossistemas, Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Rua: Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Bodocongó, CEP: 58429-900. Campina Grande, Paraíba, Brasil. [renatarichelle1993@gmail.com](mailto:renatarichelle1993@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, [hugoguerra1946@gmail.com](mailto:hugoguerra1946@gmail.com).

<sup>5</sup> Engenheira Agrícola, Doutorado em Engenharia Agrícola Universidade Federal de Campina Grande, Rua: Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Bodocongó, CEP: 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil, [crislainymacielsantos@gmail.com](mailto:crislainymacielsantos@gmail.com).

### 1 RESUMO

A região do nordeste é a maior produtora de coco verde, motivada pelo uso da irrigação, a qual tem como critério de ser cada vez mais eficiente a longo dos anos. O objetivo desse trabalho foi estimar a evapotranspiração real diária pelo modelo METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration*) parametrizado utilizando dados espectrais de imagens de satélite do Landsat-8 e dados meteorológicos, e comparar as estimativas da Evapotranspiração real diária (ETa) com o método de Penman-Monteith, em uma área implantada com coqueiro-anão irrigado no município de Sousa, PB. A ETa foi estimada a partir da densidade do fluxo de calor latente, obtida como resíduo do balanço de energia pelo modelo METRIC parametrizado, que inclui em sua implementação, calibração radiométrica, cômputo da reflectância e de variáveis biofísicas, balanço de radiação, fluxo do calor no solo e processos iterativos parametrizados para obtenção do calor sensível. O saldo de radiação, fluxo do calor no solo e evapotranspiração real estimados pelo METRIC parametrizado permitiram a obtenção da influência da sazonalidade nas épocas do ano e da condição hídrica na cultura do coqueiro-anão irrigado. O METRIC parametrizado apresentou eficácia na estimativa da evapotranspiração real diária na cultura do coqueiro irrigado no período de estiagem.

**Palavras-chave:** *cocos nucifera*, demanda hídrica, sensoriamento remoto, semiárido brasileiro.

**CORDÃO, M. A.; DINIZ, R. R. S.; GUERRA, H. O.C.; SANTOS, C. L. M.  
REAL EVAPOTRANSPIRATION OF DWARF COCONUT TREE DETERMINED BY  
THE PARAMETERIZED METRIC MODEL IN THE PARAIBAN SEMIARID**

## **2 ABSTRACT**

The northeast region is the largest producer of green coconut, motivated by the use of irrigation, which has the criterion of being increasingly efficient over the years. The objective of this work was to estimate the actual daily evapotranspiration by the parameterized METRIC model (Mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration) using spectral data from Landsat-8 satellite images and meteorological data, and to compare the ET estimates with the Penman method -Monteith, in an area planted with irrigated dwarf coconut trees in the municipality of Sousa, PB. The ETa was estimated from the density of the latent heat flux, obtained as a residue of the energy balance by the parameterized METRIC model, which includes in its implementation radiometric calibration, computation of reflectance and biophysical variables, radiation balance, heat flux in the soil and parameterized iterative processes to obtain sensible heat. The balance of radiation, soil heat flux and real evapotranspiration estimated by the parameterized METRIC allowed obtaining the influence of seasonality in the seasons of the year and the water condition in the irrigated dwarf coconut crop. The parameterized METRIC was effective in estimating actual daily evapotranspiration in irrigated coconut palm crops during the dry season.

**keywords:** *cocos nucifera*, water demand, remote sensing, Brazilian semiarid.

## **3 INTRODUÇÃO**

A principal região produtora de coco do Brasil é o Nordeste, com produção de 1.204,428 toneladas de frutos no ano de 2020, o que representou cerca de 73,47% da produção nacional (IBGE, 2020). Nos últimos anos houve redução da disponibilidade de água para a irrigação em várias regiões onde o cultivo do coqueiro é uma atividade econômica importante, a exemplo da região litorânea do Ceará (Vale do Curu e Vale do Acaraú), do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, em Sousa-PB e do Vale do São Francisco (MIRANDA *et al.*, 2019).

Nesse aspecto, é preciso melhorar a eficiência no uso da água no cultivo irrigado, portanto, a evapotranspiração real diária utilizada como base no manejo da irrigação determinada por meio de técnica de sensoriamento remoto pode ser

alternativa rápida e de baixo custo, em busca do uso eficiente da água nos cultivos do coqueiro no semiárido brasileiro.

Para isto, para aplicação do modelo por meio de técnica de sensoriamento remoto na estimativa da ETa, é necessário um usuário treinado que deve calibrar (a identificação de pixels quente e frio) no modelo METRIC para cada imagem Landsat, onde as calibrações entre os usuários são independentes e, portanto, não idênticas (MORTON *et al.*, 2013). Desse modo, a seleção adequada dos pixels quentes e frios requer a habilidade de um especialista, pode ser demorado e errôneo (SABOORI *et al.*, 2021). Geralmente, a intervenção e a seleção do usuário são necessárias para selecionar os locais na imagem que representam essas condições e para atribuir estimativas de ET (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007). No entanto, o método de calibração parametrizada pode

permitir testes mais completos da incerteza e sensibilidade do modelo MÉTRICO (MORTON *et al.*, 2013).

Portanto, esse trabalho propôs estimar a evapotranspiração real da cultura do coqueiro-anão pelo algoritmo METRIC parametrizado, através do balanço de energia no semiárido nordestino, e comparar com o método padrão penman-monteith.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área que fica localizada no Município de Sousa, Paraíba, cultivada com coqueiro-anão com as seguintes coordenadas  $6^{\circ}49'57.77''S$   $38^{\circ}18'16.67''O$ , a uma altitude de 234 m sobre o nível do mar (Figura 1). O município encontra-se com toda sua área territorial inserida na sub-bacia do Rio do Peixe, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu.

**Figura 1.** Localização da área experimental no município de Sousa-PB, destacando a parcela amostral com o cultivo de coqueiro-anão (em amarelo).



Fonte: Google Earth Pro, 2022.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima do município de Sousa é tropical semiárido (do tipo Bsh), com temperatura média  $26,7^{\circ}C$ , e precipitação média de 872 mm anual, concentrados entre janeiro e abril, sendo março o mês de maior precipitação. Os solos predominantes na área são o Argissolo Vermelho e o Vertissolo Háptico, e a vegetação natural é classificada como Caatinga hiperxerófila, sem folhas na estação seca, com abundância de cactáceas e plantas de pequeno porte (IBGE, 2023).

De início, realizaram-se as escolhas das imagens no United States Geological Survey-USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos), levando em consideração

os critérios de dias com baixa cobertura de nuvens para obter uma melhor qualidade de processamento, e atendendo os requisitos da pesquisa e as datas com a representação das condições de cobertura do solo em período chuvoso, transição e seco, respectivamente, desse modo, as três datas escolhidas foram 15 de maio, 16 junho e 06 de outubro do ano de 2016.

As imagens foram geradas pelo *Operational Land Imager - OLI* e *Thermal Infrared Sensor - TIRS* do satélite Landsat 8 aproximadamente às 09 hrs 45 min (hora local), da órbita 216 e ponto 65 para o município de Sousa- PB. As imagens apresentam resolução espacial de 30 m e resolução espectral disponíveis em 16 bits,

o que significa uma intensidade em cada pixel entre 0 e 65.535 níveis de cinza, garantindo maior detalhamento das informações geradas.

Com as datas selecionadas, o próximo passo foi aquisição dos dados

climáticos referentes às mesmas, junto ao Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, na estação meteorológica automática localizada em São Gonçalo (INMET, 2016) (Tabela 1).

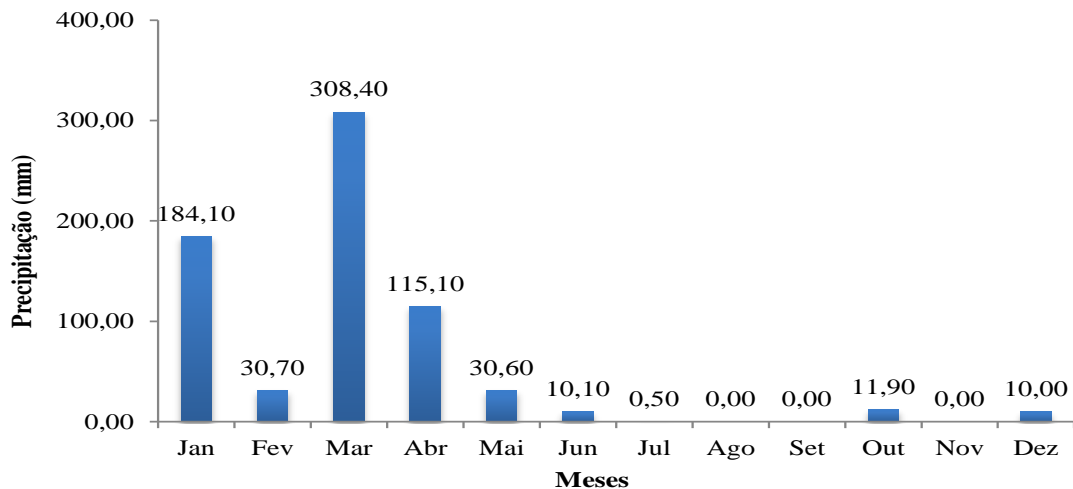
**Tabela 1.** Dados meteorológicos utilizados para a obtenção da evapotranspiração de referência ( $ET_{\theta}$ ) segundo o método de Penman-Monteith, para a região de Sousa, PB.

Datas	Temp Max °C	Temp Min °C	Umidade relativa (%)	Vento (m/s)	Insolação (horas)	Rad MJ/m <sup>2</sup> /dia	ET <sub>θ</sub> (mm dia <sup>-1</sup> )
15/05/2016	34,8	21,2	88	1,1	10,6	22,7	5,30
16/06/2016	34,0	20,0	81	2,5	10,5	21,5	5,36
06/10/2016	37,2	24,0	63	2,4	11,0	26,9	6,02

Fonte: INMET (2016)

Dados de precipitação mensal no percurso do ano de 2016 para a região de Sousa, PB (Figura 2).

**Figura 2.** Precipitação acumulada mensal na estação meteorológica de São Gonçalo-PB em 2016.



Fonte: INMET (2016).

Com base nos dados obtidos das estações meteorológicas, foi determinada a Evapotranspiração de Referência ( $ET_{\theta}$ ) para ambos os dias por meio da Equação 1,

$$ET_{\theta} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T_{ar} + 273}\right) \cdot U_2}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \cdot (e_s - e_a) \quad (1)$$

que remete a uma etapa fundamental para determinar a evapotranspiração utilizando algoritmo METRIC.

Em que  $ET_{\theta}$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $R_n$  é o saldo de radiação ( $\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $G$  o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), considerado de valor insignificante quando se utiliza de cálculos diários;  $T$  a temperatura média diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $e_s$  a pressão de vapor na saturação (kPa);  $e_a$  é a pressão atual de vapor média diária (kPa);  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma$  o coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ) é considerado constante,  $\gamma = 0,0622 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ , pois ele é uma função da pressão atmosférica, a qual varia muito pouco ao longo do ano (95,03 kPa), e também do calor latente de evaporação da água, que é pouco afetado pela temperatura, sendo recomendado um valor médio igual a  $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

O método FAO-PM 56 permite ainda calcular a evapotranspiração real da cultura ( $ET_c$ ) multiplicando a ( $ET_{\theta}$ ), determinada pelo método de Penman-Monteith, pelo Coeficiente de Cultura ( $K_c$ ), segundo recomendações de Allen et al. (1998) Equação 2.

$$ET_c = ET_{\theta} \cdot K_c \quad (2)$$

Para o coqueiro-anão em estágio intermediário de crescimento, após o quinto

$$R_n = R_{s,inc} \cdot (1 - \alpha_s) - R_{ol,emi} + R_{ol,atm} - (1 - \varepsilon_0) \cdot R_{ol,atm} \quad (4)$$

Onde,  $R_{s,inc}$  é a radiação de onda curta incidente;  $R_{ol,emi}$  a radiação de onda longa emitida por cada pixel;  $R_{ol,atm}$  a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel (ALLEN et al., 2002);  $\alpha_s$  o albedo superficial de cada pixel e  $\varepsilon_0$  a emissividade de cada pixel ALLEN et al. (2007).

Na determinação do saldo de radiação diária à superfície ( $R_{n24h}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ), mediante modelo calibrado para condições

ano no semiárido brasileiro foi utilizado um coeficiente de cultura médio  $K_c$  de 1,00, valor recomendado por Allen et al. (1998) e utilizado por Miranda et al. (2007).

A ETa foi estimada a partir da densidade do fluxo de calor latente, obtida como resíduo do balanço de energia (Equação 3), pelo modelo METRIC parametrizado, que inclui em sua implementação calibração radiométrica, cômputo da reflectância e de variáveis biofísicas, balanço de radiação, fluxo do calor no solo e processos iterativos parametrizados para obtenção do calor sensível.

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

Sendo  $LE$  = Fluxo de calor latente ( $\text{W / m}^2$ );  $R_n$  = radiação líquida na superfície ( $\text{W / m}^2$ );  $G$  = Fluxo de calor do solo ( $\text{W / m}^2$ ) e  $H$  = Fluxo de calor sensível ( $\text{W / m}^2$ ).

O saldo de radiação 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. Calculado a partir da equação 4 (SABOORI et al., 2021).

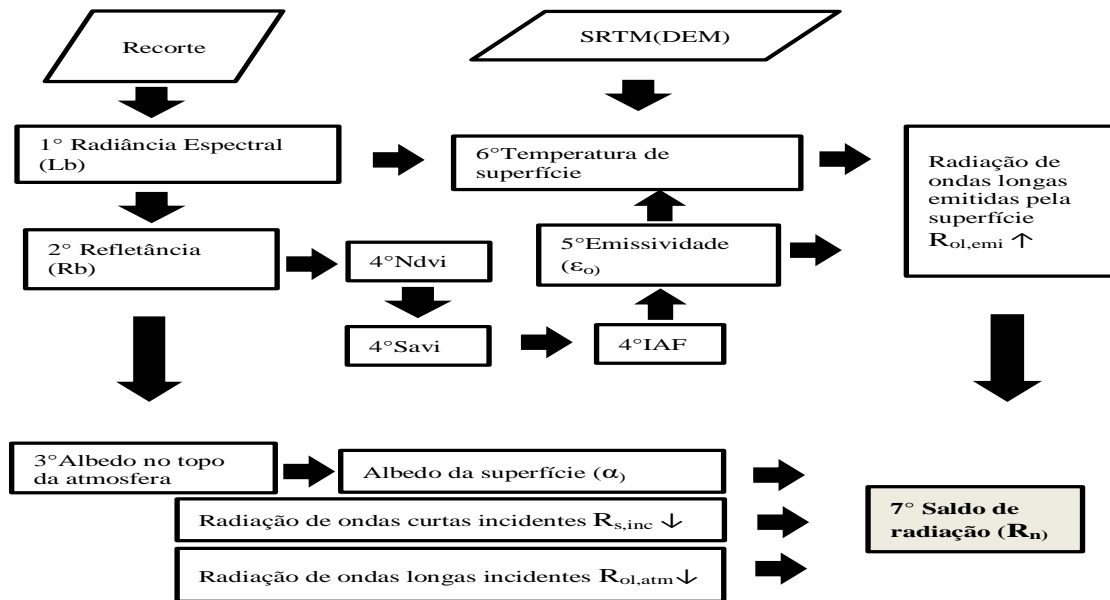
verificadas no semiárido brasileiro utilizou-se a Equação 5.

$$R_{n24h} = R_{s24h}(1 - \alpha_s) - 123 \cdot \tau_{sw24} \quad (5)$$

Em que  $R_{s24h}$  é a radiação solar global diária ( $\text{W m}^{-2}$ );  $\alpha_s$  é o albedo superficial;  $\tau_{sw24}$  é a transmissividade média diária utilizada para converter o saldo diário em  $\text{MJ m}^{-2}$ . O fator 0,0864 é multiplicado

por  $R_{n24h}$ , conforme já usado em várias aplicações por diversos pesquisadores.

**Figura 3.** 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 (2023)

O fluxo de calor no solo é a taxa de calor armazenada pelo solo e pela vegetação, foi obtido através da Equação 6,

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha_s} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_s + 0,0074 \cdot \alpha_s^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n \quad (6)$$

Onde  $T_s$  é a temperatura da superfície e  $\alpha_s$  é o albedo superficial (ALLEN *et al.*, 2002). Para efeito de correção dos valores de fluxo de calor no solo para corpos de água, onde o  $NDVI < 0$  poderá utilizar a seguinte expressão:  $G = 0,5 \cdot R_n$ , segundo Allen *et al.* (2002).

O fluxo de calor sensível  $H$  em cada pixel foi estimado com base na velocidade do vento e na temperatura do solo usando uma calibração interna da diferença da temperatura próxima à superfície  $dT$  entre dois níveis da superfície (ALLEN *et al.*, 2013):

$$H = \rho c_p \frac{(a+bT_s)}{r_{ah}} \quad (7)$$

desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa os valores próximos à passagem do satélite.

Onde:  $\rho$  é a massa específica do ar,  $c_p$  é o calor específico do ar,  $a$  e  $b$  são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis  $Z_1$  e  $Z_2$ ,  $T_s$  a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ ) e  $r_{ah}$  a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $s \cdot m^{-1}$ ). A temperatura da superfície do solo é fornecida pelo satélite.

A diferença de temperatura do ar próxima à superfície do solo,  $dT$ , foi calculada admitindo-se que essa diferença pode ser obtida em função da temperatura radiométrica de cada pixel, de acordo com a Equação 8:

$$dT = a + b \cdot T_{ar} \quad (8)$$

Onde:  $a$  e  $b$  são coeficientes obtidos com base nas condições verificadas nos pixels âncoras (quente e frio) e  $T_{ar}$  é a temperatura de cada pixel ( $^{\circ}\text{C}$ ). Os coeficientes  $a$  e  $b$  são determinados utilizando dois pares de valores para  $dT$  e  $T_s$ , pelas Equações 9 e 10:

$$a = \frac{dT_q - dT_f}{T_{S_q} - T_{S_f}} \quad (9)$$

$$b = \frac{dT_q - a}{T_{S_q}} \quad (10)$$

Onde:  $T_{S_q}$  e  $T_{S_f}$  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.

As diferenças de temperatura nos pixels quentes  $dT_q$  são obtidas pela equação 11.

$$dT_q = \frac{H_q \cdot r_{ah_q}}{\rho_q \cdot C_p} \quad (11)$$

No pixel quente, o  $H$  é calculado pela equação 12.

$$H_q = R_{nq} - G_q - 0,10 \cdot \lambda \cdot ET_0 \quad (12)$$

Onde:  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) é a massa específica do ar,  $c_p$  o calor específico do ar a pressão constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) e  $T_{sup}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $R_n$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) e  $G$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) foram obtidos exatamente na coordenada do pixel quente da imagem.

As diferenças de temperatura nos pixels frios  $dT_f$  são obtidas pela equação 13.

$$dT_f = \frac{H_f \cdot r_{ah_f}}{\rho_f \cdot C_p} \quad (13)$$

Onde:  $r_{ah_f}$  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,  $C_p$  o calor específico do ar, a pressão constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

O valor de  $H$  no pixel frio é calculado pela equação 54.

$$H_f = R_{nf} - G_f - 1,05 \cdot \lambda \cdot ET_0 \quad (14)$$

Nessa etapa, o algoritmo seleciona os candidatos a pixel quente e a pixel frio, que são combinados em pares e aplicados na função que obtém os coeficientes  $a$  e  $b$  para aplicação na Equação 8, que determina o gradiente de temperatura  $dT$  e utilizado no cálculo de  $H$  (Equação 7).

Na etapa da seleção dos pixels âncoras (frio e quente) foram conforme a metodologia de Allen *et al.* (2013), o pixel frio foi selecionado dos 20% pontos mais frios e mais vegetado das imagens, selecionando os 5% das áreas mais frias e mais vegetadas das imagens, que o compreende um 1% dos pixels mais frios da área irrigada. Tem um valor de  $ET_{RF}$  de 1,05 quando totalmente vegetado. O pixel quente foi selecionado dos 2% da área mais quente e menos vegetados da imagem, identificando os 20% mais quentes dos 10% dos menores valores de vegetados e ainda ter uma Fração da Evapotranspiração de Referência  $ET_{RF_{quente}}$  (coeficiente cultura) associado com o  $ET_{RF}$  de um solo nu  $ET_{RF_{nu}}$ .

A evapotranspiração-  $ET$  no instante da imagem de satélite é calculado para cada pixel dividindo  $LE$  pelo calor latente de vaporização, originando a Equação 15:

$$ET_{ins} = 3,600 \cdot \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad (15)$$

Onde:  $ET_{inst}$  = evapotranspiração diária ( $\text{mm h}^{-1}$ ); 3,600 conversão de segundos a horas,  $\rho_w$  é a densidade da água ( $1000 \text{Kgm}^{-3}$ ) e  $\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $\text{J kg}^{-1}$ ) que é calculado através da Equação 16:

$$\lambda = [2,501 - 0,00236(T_s - 273,15)]. 10^6 \quad (16)$$

A fração de evapotranspiração de referência ( $ET_rF$ ) é calculada como a razão do ET instantâneo calculado ( $ET_{inst}$ ) de cada pixel para a evapotranspiração de referência ( $ET_r$ ) calculado a partir de dados meteorológicos aplicados a Equação 17, segundo Allen *et al.* (2007) supõem que a  $ET_rF$  permanece constante durante todo o dia.

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (17)$$

Onde:  $ET_{inst}$  é da Equação 15 (mm  $h^{-1}$ ) e  $ET_r$  é a evapotranspiração de referência horária segundo FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998). No cálculo de  $ET_rF$  na acima, cada pixel refere-se a um único valor para  $ET_{inst}$ , que é derivado de um valor comum para  $ET_r$ , derivado do representante dados da estação meteorológica.

Finalmente, o  $ET_{r24h}$  (mm  $dia^{-1}$ ) é calculado pela Equação 61, para cada pixel da imagem:

$$ET_{r24h} = C_{rad} (ET_rF)(ET_{r,24}) \quad (18)$$

Sendo  $ET_rF$  é assumido igual ao  $ET_rF$  determinado no momento de passagem do satélite;  $ET_{r,24}$  = a evapotranspiração de referência diária; e  $C_{rad}$  = termo de correção usado em terreno inclinado para correto para variação em 24 hrs versus disponibilidade instantânea de energia (ALLEN *et al.*, 2007).

#### 4.1 Validação dos resultados: análise de erros entre $ET_{r24h}$ - METRIC Parametrizado e Método de Penman-Monteith

Já na análise da precisão das estimativas das evapotranspirações obtidas pelo METRIC e pelo de Penman- Monteith foram utilizados o erro absoluto médio (EAM) e o erro relativo médio (ERM) obtido através das Equações 19 e 20 descritas abaixo:

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_{Metric} - ET_{Penman}| \quad (19)$$

$$RM = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{ET_{Metric} - ET_{Penman}}{ET_{Penman}} \right| \quad (20)$$

Onde:  $ET_{Metric}$  e  $ET_{Penman}$  correspondem, respectivamente, aos valores da evapotranspiração através do METRIC parametrizado e do método de Penman-Monteith.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith

Na Tabela 2 estão apresentados os valores da evapotranspiração real ( $ET_{rFAO}$ , mm  $dia^{-1}$ ), inferida através do método de Penman-Monteith, estimada multiplicando  $ET_{\theta}$  pelo coeficiente de cultura ( $K_c$ ) do coqueiro para os dias 15 de maio, 16 de junho e 06 de outubro do ano de 2016.



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

Datas das imagens	ET $\theta$ Referência (mm dia <sup>-1</sup> )	ET $r$ (Kc=1,00) (mm dia <sup>-1</sup> )
15/05/2016	5,30	5,30
16/06/2016	5,36	5,36
06/10/2016	7,41	7,41

\*ET $r$  FAO = ET $\theta$  (Penman) \* Coeficiente de Cultivo Kc

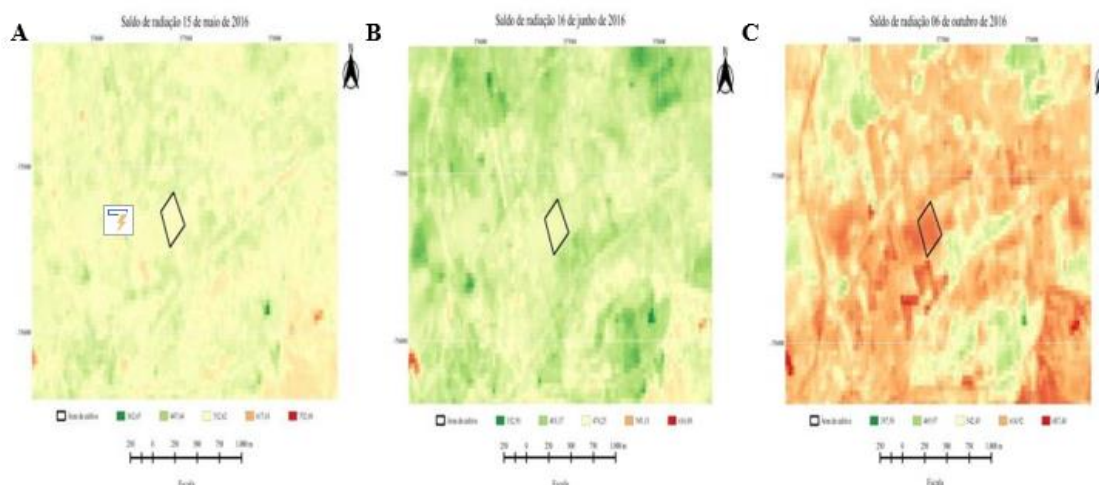
Fonte: Organização dos autores (2023)

## 5.2 Saldo de radiação (Rn)

Na Figura 4 estão apresentadas as cartas temáticas do saldo de radiação instantâneo à superfície referente às datas

15 de maio (A), 16 de junho (B) e 06 de outubro (C) do ano de 2016. Na área irrigada no pomar do coqueiro-anão, os valores situaram-se entre 490,13 e 687,40 W m<sup>-2</sup>.

**Figura 4.** Carta temática do saldo de radiação da superfície (Rn)- METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*) para o município de Sousa, PB em: 15 de maio (A), 16 de junho (B) e 06 de outubro (C) do ano de 2016.



Fonte: Organização dos autores (2023)

Na data de 15 de maio (período chuvoso) o saldo de radiação apresentou valor próximo de 532,62 W m<sup>-2</sup>, enquanto 16 de junho situou-se entre 403,37 e 474,25 W m<sup>-2</sup>, ou seja, menor existência de energia disponível a ser repartido no processo do aquecimento do solo, aquecimento do ar e da evapotranspiração.

No período de maior estiagem 06 de outubro registrou intervalo em 614,92 a 687,4 W m<sup>-2</sup>, o maior saldo de radiação encontrado dentro da área, da mesma forma

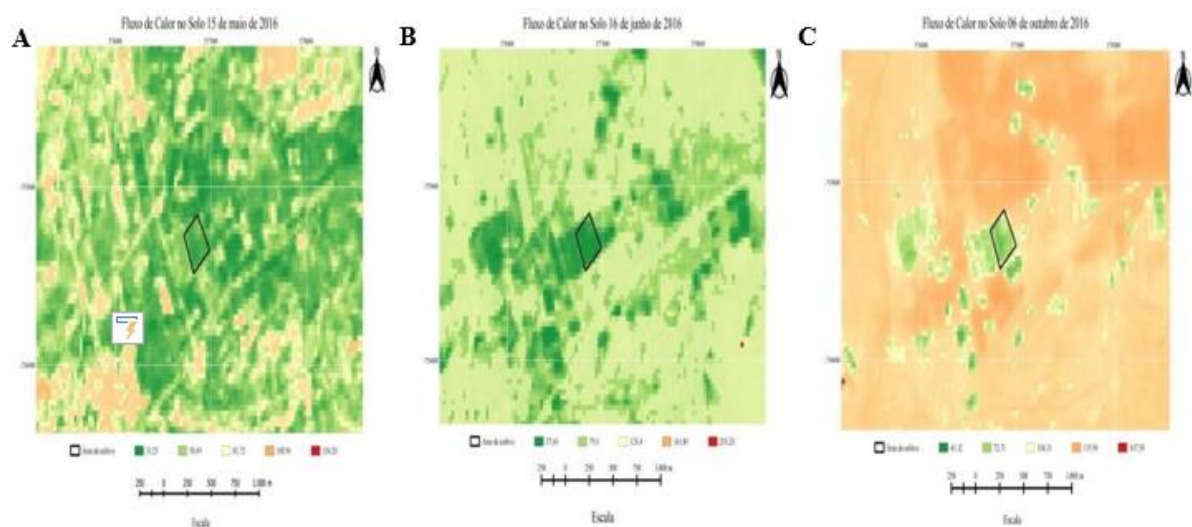
foi observado na cultura da banana nanica no período seco na região sul do Ceará no estudo de Diniz et al. (2021) com o modelo Metric. Essa diferença no balanço de radiação pode ser influenciada pela sazonalidade em função da época do ano, regime hídrico e a cobertura da vegetação (SANTOS *et al.*, 2021; CARVALHO; MOURA; SILVA, 2018).

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

As magnitudes do fluxo de calor no solo, para o município de Sousa podem ser observadas nas cartas temáticas na Figura 5. Para as datas analisadas, os valores de fluxo de calor no solo dentro da área ficaram

entre 33,25 e 72,71  $W m^{-2}$ , observando menor valor no período chuvoso e maior no período seco. Resultados semelhantes aos encontrados por Diniz *et al.* (2021) na cultura da banana nanica e Carvalho, Moura e Silva (2018) na cultura da cana-de açúcar.

**Figura 5.** Carta temática do fluxo de calor no solo de superfície (G)- METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) para o município de Sousa, PB em: 15 de maio (A), 16 de junho (B) e 06 de outubro (C) do ano de 2016.



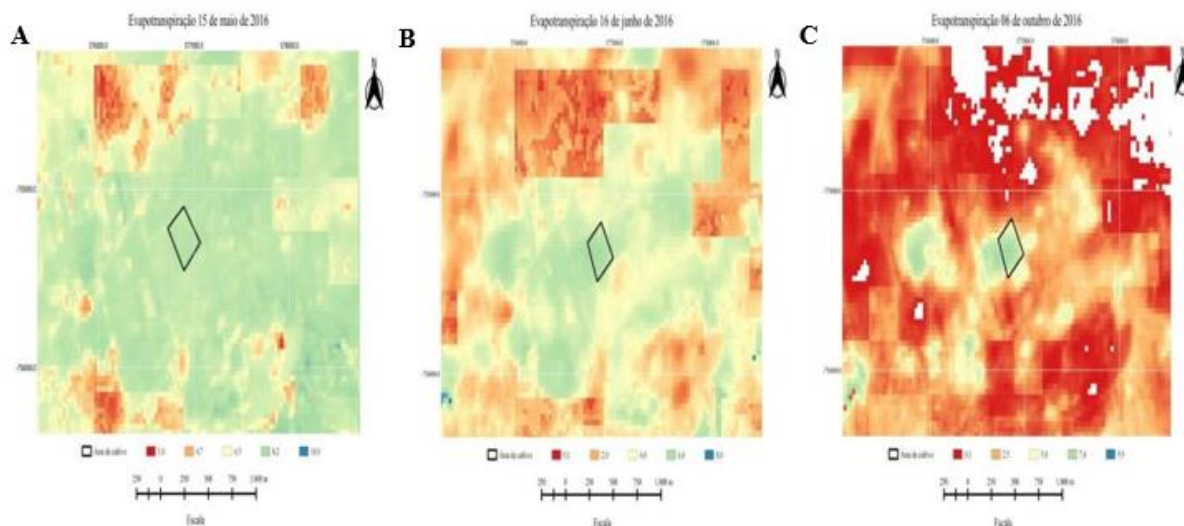
Fonte: Organização dos autores (2023)

### 5.4 Evapotranspiração Real diária (E<sub>Tr</sub> 24h)

A evapotranspiração real diária no coqueiral para o município de Sousa nas

datas estudadas foi de 8,2  $mm dia^{-1}$  para o dia 15 do mês de maio (A), no dia 16 do mês de junho de 6,0  $mm dia^{-1}$  (B) e para o dia 06 de outubro 7,4  $mm dia^{-1}$  (C) (Figura 6).

**Figura 6.** Carta temática da evapotranspiração real diária (ETr 24h) - METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) para o município de Sousa, PB em: 15 de maio (A), 16 de junho (B) e 06 de outubro (C) do ano de 2016.



**Fonte:** Organização dos autores (2023)

A evapotranspiração atual diária estimada pelo Algoritmo METRIC parametrizada na imagem do dia 15 de maio ( $8,2 \text{ mm dia}^{-1}$ ), pode ter sido subestimada, motivada pelo fato que no dia 14 de maio (dia anterior à coleta da imagem), ocorreu uma precipitação significativa na área de  $21,6 \text{ mm}$ , imediatamente antes da passagem do satélite (entre 6 e 7 horas da manhã). Sendo uma limitação para a aplicação do METRIC parametrizado, uma vez que valores altos de evaporação para o pixel quente

diminuem o contraste hidrológico entre os pixels âncora, e pode ter conduzido a erros nas estimativas da ETa.

Nas datas do mês de junho e outubro observaram o efeito sazonal da  $R_n$ , da condição hídrica e da vegetação, ocorrendo respectivamente, as evapotranspirações em  $6,0 \text{ mm d}^{-1}$  e  $7,4 \text{ mm d}^{-1}$ .

### 5.5 Validação entre a evapotranspiração obtida com o algoritmo METRIC Parametrizado e pelo método de Penman- Monteith

**Tabela 5.** Comparação entre a evapotranspiração real diária (ETc) obtida pelo modelo físico padrão da FAO-56 (Penman- Monteith) e a evapotranspiração real diária média (ETa) obtida pelo algoritmo Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC) parametrizado para uma área de coqueiro localizada em Sousa-PB.

Datas	ETa (Metric)	ETc (Penman)	Erro Relativo (%)	Erro absoluto ( $\text{mm dia}^{-1}$ )
15/05/2016	8,2	5,30	54,71	2,90
16/06/2016	6,0	5,36	11,94	0,64
06/10/2016	7,4	7,41	0,13	0,01

**Fonte:** Organização dos autores (2023)

Por meio da tabela 5, observou-se que a maior divergência encontrada na evapotranspiração real diária, obtida pelo METRIC parametrizado e pelo Método de Penman-Monteith foi ao dia 15 de maio, como já explicado anteriormente, provavelmente devido ao fato que no dia 14 de maio ocorreu uma precipitação (21,6 mm). Dessa forma, o modelo foi desenvolvido para ser aplicado em regiões de semiáridas em áreas irrigadas no período de seca.

No mês de junho foi observado um erro relativo no limite do aceitável, reportado na literatura para estimativas da ETa a partir de dados de sensoriamento remoto (GLENN *et al.*, 2007). Os erros encontrados, iguais ou inferiores a 12,0% são considerados nível de precisão satisfatório e aceitável.

A maior precisão foi encontrada no mês de outubro, dentro do período mais seco da região, apresentando os menores resultados dos ERM (0,13%) e EAM (0,01), por essa razão, pode se dizer que aplicação do modelo parametrizado em períodos mais distantes das influências do período chuvoso, tem melhor estimativa da evapotranspiração real em áreas irrigadas. Resultado semelhante encontrado por Medeiros *et al.* (2021) no modelo SEBAL apresentando os menores valores no período de estiagem de ERM e EAM de 3 %, e 0,08 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

## 6 CONCLUSÃO

O saldo de radiação, fluxo do calor no solo e evapotranspiração real estimados pelo METRIC parametrizado permitiram a obtenção da influência da sazonalidade nas épocas do ano e da condição hídrica na cultura do coqueiro-anão irrigado.

O METRIC parametrizado apresentou eficácia na estimativa da evapotranspiração real diária na cultura do coqueiro irrigado no período de estiagem.

A parametrização da seleção de pixels âncora permite uma drástica redução no tempo de processamento do modelo, com a possibilidade de testar muitos pares de pixels âncoras no processo de calibração. Esse é um resultado importante dessa pesquisa, uma vez que o tempo de processamento e a disponibilização dos mapas de ETa são questões essenciais no monitoramento operacional para agricultura irrigada.

## 7 AGRADECIMENTO

A Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## 8 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; BURNETT, B.; KRAMBER, W.; HUNTINGTON, J.; KJAERGAARD, J.; KILIC, A.; KELLY, C.; TREZZA, R. Automated calibration of the metric-landsat evapotranspiration process. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 49, n. 3, p. 563-576, 2013.
- 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 n. 56).
- 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**, New York, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. **SEBAL** - Surface Energy Balance Algorithm for Land. Advanced training and Users Manual. Version 1.0. Kimberly: University of Idaho, 2002.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hidrologia**, Amsterdã, v. 229, n. 1, p. 87-100, 2000.
- CARVALHO, H. F. D. S.; MOURA, M. S. B. D.; SILVA, T. G. F. D. Fluxos de radiação e energia em caatinga preservada e cana-de-açúcar no Semiárido. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 33, n. 3, p. 452-458, 2018.
- DINIZ, R. R. S.; CORDÃO, M. A.; GUERRA, H. O. C.; OLIVEIRA, C. W. Evapotranspiração real da banana-nanica determinada pelo algoritmo METRIC no semiárido do Ceará. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 701-716, 2021.
- 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.
- IBGE. Banco de Dados de Informações Ambientais - BDIA. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acessado em: 15. jan. 2023.
- IBGE. SIDRA. **Produção Agrícola Municipal**. Tabela 5457 – Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 08 abr. 2022.
- INMET. **Dados históricos anuais**. Brasília, DF: INMET, 2016. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 set. 2020.
- MEDEIROS, J. L. S.; JESUS, I. S.; SILVA, T. J. R. D.; NASCIMENTO, M. B.; CEZÁRIO, J. A.; DE PAIVA, W.; SANTOS, L. L.; CAMPOS, G. M.; MOITINHO, E. B.; FONSECA, L. L. S. Estimativa da evapotranspiração real utilizando geotecnologias na região do semiárido, Bahia, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 12, n. 6, p. 360-376, 2021.
- MIRANDA, F. R.; ROCHA, A. B. S.; GUIMARÃES, V. B.; SILVA, E. S.; LIMA, G. C. M.; SANTOS, M. M. S. Eficiência do uso da água na irrigação do coqueiro anão. **Irriga**, Botucatu, v. 24, n. 1, p. 109-124, 2019.
- MIRANDA, F. R.; GOMES, A. R. M.; OLIVEIRA, C. H. C.; MONTENEGRO, A. A. T.; BEZERRA, F. M. L. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do coqueiro anão-verde na região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 129-135, 2007.
- MORTON, C. G.; HUNTINGTON, J. L.; POHLL, G. M.; ALLEN, R. G.; MCGWIRE, K. C.; BASSETT, S. D. Assessing calibration uncertainty and automation for estimating evapotranspiration from agricultural areas using METRIC. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 49, n. 3, p. 549-562, 2013.

SANTOS, J. M.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. D.; SILVA, A. S.; SILVA, L. B. J.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. G. Análise de canaviais irrigados com parâmetros biofísicos por sensoriamento remoto no nordeste brasileiro. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 638-663, 2021.

SABOORI, M.; MOKHTARI, A.; AFRASIABIAN, Y.; DACCACHE, A.; ALAGHMAND, S.; MOUSIVAND, Y. Automatically selecting hot and cold pixels for satellite actual evapotranspiration estimation under different topographic and climatic conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 248, n. 1, p. 106763, 2021.