

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA HORÁRIA E DIÁRIA ESTIMADA PARA OS TIPOS CLIMÁTICOS BRASILEIROS*

Fernando da Silva Almeida¹, Márcio José de Santana², Isaias Antonio de Paiva³, Ana Clara Silva da Costa⁴

RESUMO: O manejo e gestão da irrigação com a utilização de estimativas precisas de evapotranspiração de referência – ET_o , torna-se uma opção viável economicamente. O objetivo do trabalho foi estimar e comparar os valores de evapotranspiração de referência (ET_o), na periodicidade diária, calculados com o modelo Penman-Monteith ASCE, baseando-se no roteiro diário ($ET_{o,d}$) e horário ($ET_{o,h}$), para localidades e tipos climáticos brasileiros. A série de dados climáticos de cada localidade foi obtida da Base de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP/INMET), medidos em estações meteorológicas automáticas, no período entre novembro de 2017 e 2018. Foram considerados os oito tipos climáticos brasileiros: *Am* (27,5%), *Aw* (25,8%), *Af* (22,6%), *BSh* (4,9%); *Cfa* (6,5%), *Cfb* (2,6%), *Cwa* (2,5%) e *Cwb* (2,1%). As comparações estatísticas de $ET_{o,d}$ e $ET_{o,h}$ foram realizadas por meio de análise de regressão linear, coeficiente de correlação (r) e determinação (r^2), raiz quadrada média dos desvios (RMSD), percentagem de desvios (PBIAS) e coeficiente de variação. A $ET_{o,d}$ subestima os valores de ET_o em relação a $ET_{o,h}$ e a relação entre $ET_{o,h}$ e $ET_{o,d}$ é mais exata respectivamente para os tipos climáticos tropical, semiárido e subtropical. Para o uso de estimativas em grandes escalas a utilização da $ET_{o,d}$ ou $ET_{o,h}$ são equivalentes.

PALAVRAS-CHAVE: tropical, semiárido, subtropical, precisão, gestão da irrigação

ESTIMATED HOURLY AND DAILY REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR BRAZILIAN CLIMATE TYPES

ABSTRACT: The irrigation management of with the use of accurate estimates of reference evapotranspiration – ET_o , becomes an economically viable option. The objective of this study

* Trabalho conduzido com apoio da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais)

¹ Eng. Agrônomo, Técnico em Agropecuária, IFTM–campus Uberaba, MG, (34)33196012, fernandosilva@iftm.edu.br

² Prof. Doutor, Setor de Irrigação e Drenagem, IFTM-campus Uberaba, MG, (34)33196051 marciosantana@iftm.edu.br

³ Eng. Agrônomo, Prof. FAZU, Uberaba, MG, (34) 3318-4188, paiva.isaiasantonio@gmail.com

⁴ Eng. agrônoma, Estudante, IFTM-Campus Uberaba, MG (34) 33196012, anaclara.costa@estudante.iftm.edu.br

was to estimate and compare the reference evapotranspiration (ET_o) values, on a daily basis, calculated with the Penman-Monteith ASCE model, based on the daily (ET_{o,d}) and hourly (ET_{o,h}) schedule, for locations and types Brazilian climate. The series of climate data for each location was obtained from the Meteorological Database of the National Institute of Meteorology (BDMEP/INMET), measured in automatic weather stations, in the period between November 2017 and 2018. The eight Brazilian climate types were considered: Am (27.5%) Aw (25.8%), Af (22.6%), BSh (4.9%); Cfa (6.5%), Cfb (2.6%), Cwa (2.5%) and Cwb (2.1%). Statistical comparisons of ET_{o,d} and ET_{o,h} were performed using linear regression analysis, correlation coefficient (r) and determination (r²), root mean square of deviations (RMSD), percentage of deviations (PBIAS) and coefficient of variation. ET_{o,d} underestimates the values of ET_o in relation to ET_{o,h} and the relationship between ET_{o,h} and ET_{o,d} is more exact for the tropical, semi-arid and subtropical climate types respectively. For the use of estimates for irrigation projects and sizing, the use of ET_{o,d} or ET_{o,h} are equivalent.

KEYWORDS: tropical, semi-arid, subtropical, precision, irrigation management.

INTRODUÇÃO

A quantidade de alimentos para suprir a demanda mundial aumenta com os anos, devido ao crescimento populacional acelerado. Dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), indicam que até 2050 a população mundial vai atingir 9,8 bilhões de habitantes, exigindo das autoridades mundiais aumento sustentável da produção agrícola (BOJANIC, 2017). A área irrigada está presente em 8,2 milhões de ha (3,2 %). E, segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) até 2040 a expectativa é que o valor seja de 12,4 milhões de ha (ANA, 2017). O uso de ferramentas que maximizem a produção e produtividades agrícolas no Brasil de maneira sustentável é fundamental para garantir a segurança alimentar mundial nas próximas décadas.

Dentre as ferramentas destaca-se o método de Penman-Monteith apresentado pela *American Society of Civil Engineers* onde as estimativas da ET_o podem ser realizadas para a periodicidade diária (ET_{o,d}) ou horária (ET_{o,h}) (ALLEN et al., 1998).

O método Penman-Monteith apresentam uma boa precisão e acurácia nas estimativas de valores de ET_o diárias em diferentes localidades do planeta, justamente por ser um dos modelos mais complexos e completos, embora necessitem de mais variáveis e mais cálculos, esses modelos combinados são os ideias para obter estimativas confiáveis (NOIA et al., 2014;

TAWEGOUM, et al., 2015) (LOPES; LEAL, 2016; TREDER; KLAMKOWSKI, 2017; ALTHOFF et al., 2019; DHUNGEL et al. 2019; NOLZ; RODNÝ, 2019; SANTOS, 2021).

No entanto, são escassos estudos envolvendo o método Penman-Monteith ASCE diário vs horário (ALTHOFF et al., 2019). Contudo, em alguns estudos, tem-se argumentado que o somatório das estimativas da ET_{Oh} descreve melhor a ETo real, quando comparados com a ET_{Od} (NOIA et al., 2014). Além disso, a estimativa da evapotranspiração horária fornece resultados mais satisfatórios quanto à necessidade de água às plantas ao longo do dia (TREDER; KLAMKOWSKI, 2017), possibilitando alternativas mais interessantes de estudo e manejo das culturas agrícolas, irrigadas (SANTOS, 2021). Assim a verificação de boa associação entre a ET_{OPM} horária e diária para os tipos climáticos brasileiros é interessante. Pois permitiria maior compreensão do desempenho e relação entre as duas formas de estimativas em diferentes localidades e tipos climáticos (ALTHOFF et al., 2019). Propiciaria também melhores informações para a gestão da irrigação.

Diante o exposto, o objetivo do presente trabalho foi estimar e comparar os valores de evapotranspiração de referência, na periodicidade diária, calculados com o modelo Penman-Monteith ASCE, baseando-se no roteiro diário (ET_{Od}) e horário (ET_{Oh}), para localidades e tipos climáticos brasileiros.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho foram considerados oito tipos climáticos brasileiros: *Am* (27,5%) *Aw* (25,8%), *Af* (22,6%), *BSh* (4,9%); *Cfa* (6,5%), *Cfb* (2,6%), *Cwa* (2,5%) e *Cwb* (2,1%). A escolha dos tipos climáticos bem como localidades levou em consideração três fatores principais: a presença de estação automática sob o tipo climático, a qualidade dos dados meteorológicos das estações e a representatividade da cidade em produção agrícola. A série de dados climáticos de cada localidade foi obtida da Base de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP/INMET), medidos em estações meteorológicas automáticas, no período entre novembro de 2017 e 2018, totalizando oito estações climatológicas distribuídas no território brasileiro. A estimativa da ETo horária e diária foi realizada com a equação padronizada de Penman-Monteith (equação 1), apresentada por *American Society of Civil Engineers*.

$$ET_{OPM} = \frac{(0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{C_n}{(T+273)} \cdot u_2 \cdot (es - ea))}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot u_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_{OPM} - evapotranspiração de referência horária ou diária (ET_{Oh} em mm h^{-1} ; ou, ET_{Od} em mm dia^{-1}); Δ - declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar do período considerado ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn - saldo de radiação líquida na superfície do período considerado ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G - balanço do fluxo de calor no solo do período considerado ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); γ - constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T - temperatura média do ar do período considerado ($^\circ\text{C}$); u_2 - velocidade do vento a dois metros de altura do período considerado (m s^{-1}); es - pressão de saturação de vapor do período considerado (kPa); ea - pressão atual do vapor do período considerado (kPa); C_n - constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo ($\text{K mm s}^3 \text{Mg}^{-1} \text{h}^{-1}$; $C_{ndiária} = 900 \text{ K mm s}^3 \text{Mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ para grama curta; e, $C_{nhorária} = 37 \text{ K mm s}^3 \text{Mg}^{-1} \text{h}^{-1}$ para cobertura do solo com grama curta); C_d - constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo (s m^{-1} ; $C_{ddiária} = 0,34 \text{ s m}^{-1}$ para grama curta, ou $C_{ddiurno} = 0,24 \text{ s m}^{-1}$ para período diurno grama curta, ou $C_{dnoturno} = 0,96 \text{ s m}^{-1}$ para período noturno e grama curta).

Para avaliar as comparações de ET_{Od} e ET_{Oh} foi determinado a percentagem de desvio (PBIAS) (equação 3) e também a raiz quadrada do desvio médio (RMSD) (equação 4). O RMSD mede a exatidão dos dados, quanto menor o valor de RMSD, mais precisa é a estimativa frente ao modelo padrão.

$$PBIAS = \frac{MBD}{\mu ET_{Oh}} \quad (3)$$

Em que: PBIAS - percentagem de desvio (%); MBD - erro médio (mm dia^{-1}); μET_{Oh} - média dos valores da evapotranspiração de referência (horária) (mm dia^{-1});

$$RMSD = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (ET_{Od} - ET_{Oh})^2}{N} \right]} \quad (4)$$

Em que: RMSD - raiz quadrada do desvio médio (mm dia^{-1}); ET_{Od} - evapotranspiração de referência na periodicidade diária (mm dia^{-1}); ET_{Oh} - evapotranspiração de referência resultante do somatório do h-ésimo valor de evapotranspiração de referência horária de um mesmo dia (mm dia^{-1}); N - número de observações.

Para auxiliar nas análises gráficas também foram realizadas análise de regressão linear, bem como o cálculo de parâmetros de estatística descritiva coeficiente de correlação Pearson

(r) (equação 5), o qual fornece duas informações importantes, se a correlação é negativa ($r < 0$) ou se é positiva ($r > 0$), além de mostrar o nível da correlação, quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte é a correlação.

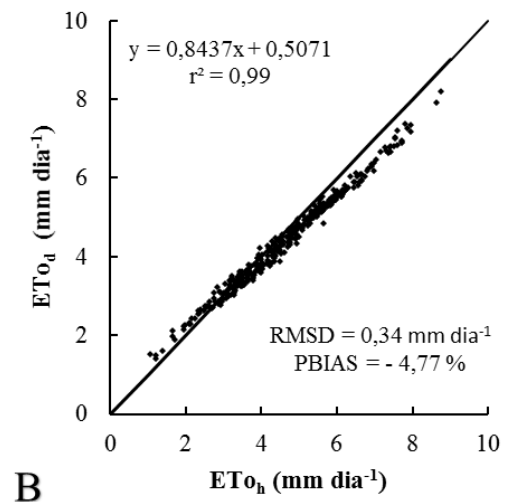
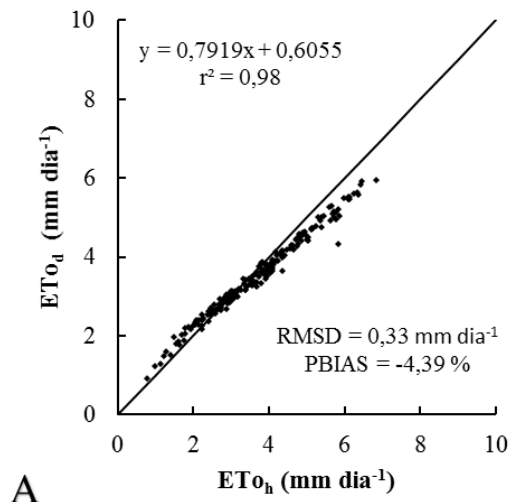
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(\sum_{j=1}^{24} ETo_{h,i,j} - 24 \cdot \overline{ETo_h}) \cdot (ETo_{d,i} - \overline{ETo_d})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^{24} ETo_{h,i} - 24 \cdot \overline{ETo_h})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (ETo_{d,i} - \overline{ETo_d})^2}} \quad (5)$$

Em que: r – coeficiente de correlação de Pearson (adimensional); $Eto_{n,i,j}$ – evapotranspiração de referência horária do i -ésimo dia e j -ésima hora (mm hora^{-1}); $\overline{ETo_h}$ – evapotranspiração de referência horária média do período analisado (mm hora^{-1}); $ETo_{d,i}$ – evapotranspiração de referência do i -ésimo dia (mm hora^{-1}); $\overline{ETo_d}$ – evapotranspiração de referência diária média do período analisado (mm dia^{-1}); n – número de dias analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

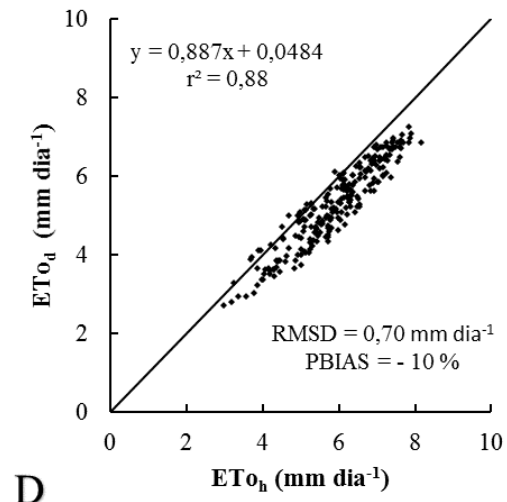
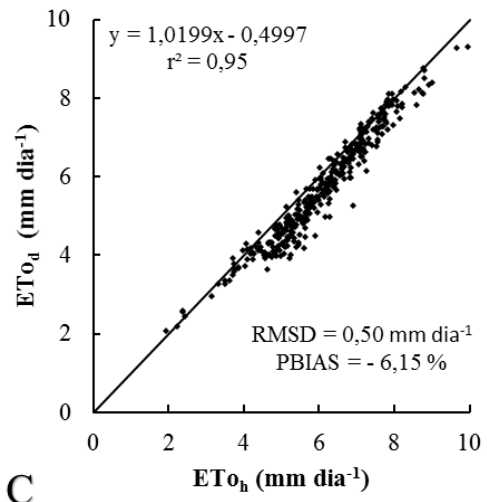
Os valores dos coeficientes de determinação (r^2) ficaram em maior parte acima de 90 %, com exceção dos tipos climáticos BSh e Cwa, mas estes ainda obtiveram r^2 de 88 % (Figura 1 D e G). O que configura boa correlação entre as estimativas de ETo (DJAMAN, et al., 2018). Os valores de PBIAS que medem a variação entre as medidas da ETo_d e ETo_h (Figura 2), revelam que a ETo_d subestimou os valores em comparação com a ETo_h em todas as localidades e tipos climáticos analisados. Esse resultado está em concordância com os resultados de Santos et al. (2021) e com os de Althoff et al. (2019) onde ambos trabalhos, mostraram que a ETo_d subestimou os valores em relação a ETo_h em diferentes tipos climáticos no Brasil.

Os erros (RMSD) entre as associações verificados nesse estudo (Figura 2), foram semelhantes aos encontrados na literatura. Djaman et al. (2018) avaliaram também a correlação entre ETo_d e ETo_h , os autores realizaram o estudo para o clima para condições de semiárido (B) no continente africano, e, obtiveram valor do RMSD médio de $0,57 \text{ mm dia}^{-1}$. Ambos resultados são semelhantes aos encontrados nesse estudo (Figura 2D), onde para o tipo climático Bsh, foi encontrado um RMSD de $0,7 \text{ mm dia}^{-1}$. Irmak et al. (2005) para regiões semi-áridas verificou RMSD de $0,57$, também próximo ao encontrado nesse estudo.



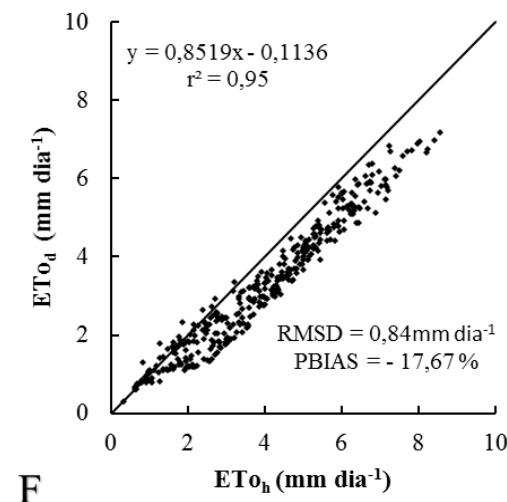
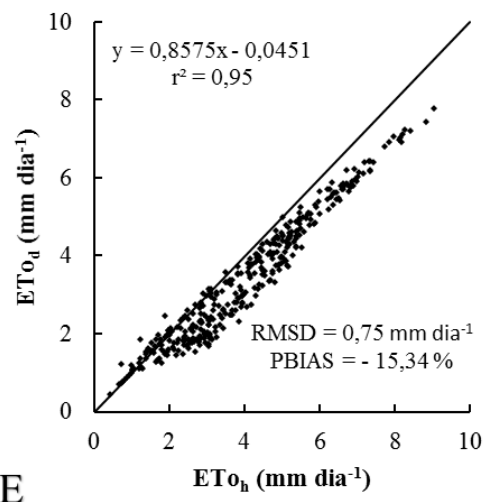
A

B



C

D



E

F

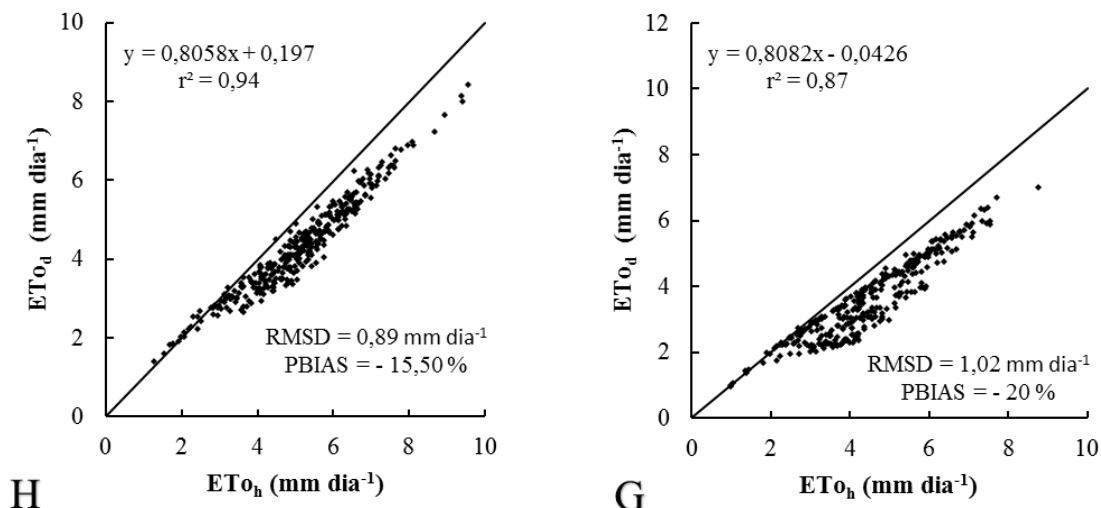


Figura 1. Análise de regressão linear entre “EToh versus ETod”, Coeficiente de determinação (r^2), índice “d”, desvio padrão (RMSD) e erro relativo (PBIAS), para as localidades e tipos climáticos no Brasil. A) Cruzeiro do Sul-AC (Clima Af), B) Maceió-AL (Clima Am); C) Barra-BA (Clima Aw); D) Pão de Açúcar-AL (Clima BSh); E) Florianópolis-SC (Clima Cfa); F) Passo Fundo-RS (Clima Cfb); G) Bambuí-MG (Clima Cwa); e, H) Araxá-MG (Clima Cwb).

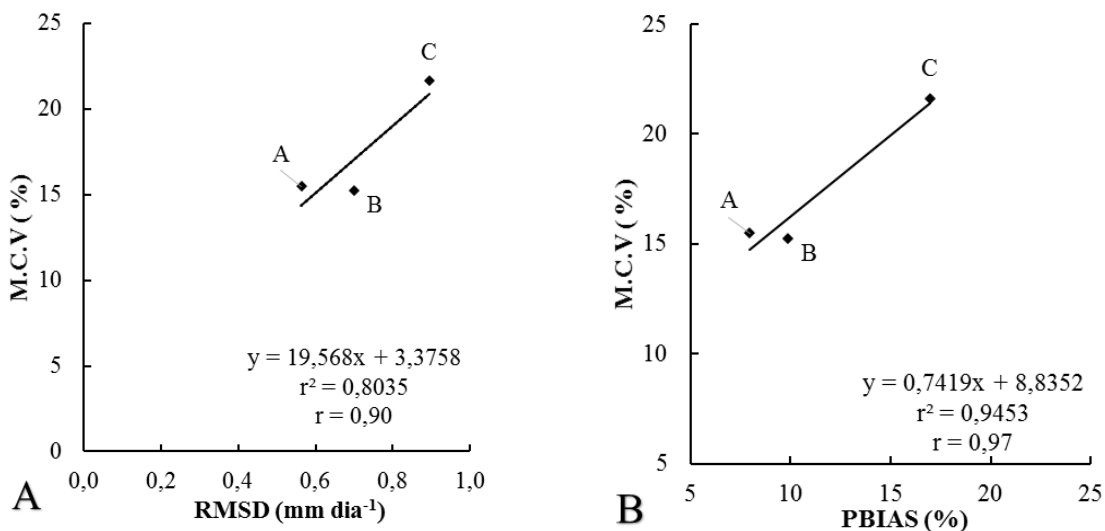


Figura 2. Análise de regressão linear, coeficiente e correlação (r) e determinação (r^2) para tipos climáticos no Brasil. A - raiz quadrada média dos desvios RMSD versus (M.C.V); B - erro relativo médio (PBIAS) versus Coeficiente de variação médio (M.C.V). Nas figuras: A- Tropical; B - Semiárido; C - Subtropical.

CONCLUSÕES

A ET_{od} subestima os valores de ETo em relação a ET_{oh} . A relação entre ET_{oh} e ET_{od} é mais exata respectivamente para os tipos climáticos tropical, semiárido e subtropical. A exatidão das relações entre ET_{od} e a ET_{oh} possuem relação com quantidade de pares utilizados para análise. Para o uso de estimativas em grandes escalas a utilização da ET_{od} ou ET_{oh} são

equivalentes, contudo, para o uso pontual, como no manejo e gestão de cultivos irrigados, a ET_{0h} é mais precisa e exata para tipos climáticos no Brasil. Entretanto, para obter uma interpretação mais completa, um estudo adicionando lisímetros para comparar com os valores das estimativas torna-se necessário.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio cedido ao trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: **Irrigation and Drainage Paper 56**. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 1998. 300 p.

ALTHOFF, D.; FILGUEIRAS, R.; DIAS, S.H.B.; RODRIGUES, L.N. Impact of sum-of-hourly and daily timesteps in the computations of reference evapotranspiration across the Brazilian territory. **Agricultural Water Management**, v. 226, n. 10578, p. 1-10, 2019.

ANA. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Agência Nacional das Águas, Brasília - DF, Brazil. 2017. 86p.

BOJANIC, A. **7 anos da visão 2050**. Trabalho apresentado no Diálogo: Desafio 2050 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, São Paulo, 2017.

DJAMAN, K., IRMAK, S., SALL, M., SOW, A., KABENGE, I. Comparison of sum-of-hourly and daily time step standardized ASCE Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Theor. Appl. Climatol.** v.134, p.533–543, 2018.

DHUNGEL, R.; AIKEN, R.; COLAIZZI, P.D.; LIN, X.; BAUMHARDT, R.L.; EVETTI, S.R.; BRAUER, D.K.; MAREK, B.G.W.; O'BRIEN, D. Increased Bias in Evapotranspiration Modeling Due to Weather and Vegetation Indices Data Sources. **Agronomy Journal**, v. 3, n. 3, p. 1407-1424, 2019.

IRMAK, S., HOWELL, T.A., ALLEN, R.G., PAYERO, J.O., MARTIN, D.L. Standardized ASCE Penman-Monteith: impact of sum-of-hourly versus. 24-hour timestep computations at reference weather station sites. *Trans. ASAE* 48, 1063–1077, 2005.

LOPES, I.; LEAL, B. G. Evapotranspiração horária x diária utilizando Penman-Monteith para o polo de desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.10, n.5, p. 914 - 924, 2016.

NOIA, C.P.Z.; PEREIRA, S.B.; ROSA, D.R.Q.; ALMEIDA, R.A. Evapotranspiração de referência estimada pelos métodos Penman-Monteith-FAO (56) e Hargreaves & Samani para o município de Dourados, MS. **Revista Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 300-308, 2014.

NOLZ, R.; RODNÝ, M. Evaluation and validation of the ASCE standardized reference evapotranspiration equations for a subhumid site in northeastern Austria. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 67, n. 3, p. 289-296, 2019.

SANTOS, A.A.; SOUZA, J.L.M.; ROSA, S.L.K. Hourly and Daily Reference Evapotranspiration with ASCE-PM Model for Paraná State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.36, n.2, p.197-209, 2021.

TAWEGOUM, R.; LEROY, F.; SINTES, G.; CHASSÉRIAUX, G. Forecasting hourly evapotranspiration for triggering irrigation in nurseries. **Biosystems Engineering**, v.129, p.237-247, 2015.

TREDER, W.; KLAMKOWSKI, K. An hourly reference evapotranspiration model as a tool for estimating plant water requirements. **Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich**, v. 2, p. 469-481. 2017.