



## DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU, SP

R. de C. Bispo<sup>1</sup>, K. M. Ventura<sup>2</sup>, M. H. C. Souza<sup>3</sup>, R. D. S. Santos<sup>4</sup>

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em comparação com o método de Penman-Monteith padrão FAO, para o município de Botucatu, SP. Foram utilizados dados climáticos diários para estimativa da ET<sub>o</sub>, dos diferentes métodos, obtidos na estação meteorológica automática do Lajeado UNESP, Botucatu, SP. Na avaliação dos métodos foram empregados os indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e o coeficiente de desempenho (c). Os resultados mostraram que os métodos de Hargreaves, Turc, Priestley-Taylor e Makkink, que utilizam como variáveis de entrada a temperatura do ar e radiação solar apresentaram “ótimo” desempenho, com coeficientes “c” superiores a 0,85. O método de Jensen-Haise, mostrou desempenho “muito bom”, com coeficiente “c” igual a 0,83. Enquanto, os métodos de Benevides-Lopez e Ivanov, apenas apresentaram-se “mediano” e “sofrível”, respectivamente, não sendo recomendado o uso dos mesmos para região, considerando o período estudado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Penman-Monteith; métodos indiretos; irrigação.

### PERFORMANCE OF METHODS TO ESTIMATE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN BOTUCATU, SP

**SUMMARY:** The objective of this research was to evaluate the performance of different methods for estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in comparison with the FAO standard Penman-Monteith method for the city of Botucatu, SP. Daily climatic data were used to estimate the ET<sub>o</sub>, from the different methods, obtained from the automatic meteorological station of Lajeado UNESP, Botucatu, SP. In the evaluation of the methods, statistical indicators were used: coefficient of determination (R<sup>2</sup>), correlation coefficient (r), agreement index (d) and coefficient of performance (c). The results showed that the Hargreaves, Turc, Priestley-

<sup>1</sup> Doutoranda em Irrigação e Drenagem, Depto de Engenharia Rural, UNESP, CEP 18610-307. Botucatu, SP. Fone: (14) 38807165. E-mail: regianecarvalhoks@gmail.com

<sup>2</sup> Mestrando em Irrigação e Drenagem, Depto de Engenharia Rural, UNESP. Botucatu, SP.

<sup>3</sup> Doutorando em Irrigação e Drenagem, Depto de Engenharia Rural, UNESP. Botucatu, SP.

<sup>4</sup> Doutoranda em Irrigação e Drenagem, Depto de Engenharia Rural, UNESP. Botucatu, SP.

Taylor and Makkink methods, which use as input variables air temperature and solar radiation presented "optimum" performance, with coefficients "c" higher than 0.85. The Jensen & Haise method showed "very good" performance, with coefficient "c" equal to 0.83. Meanwhile, the methods of Benevides-Lopez and Ivanov, only presented "medium" and "tolerable", respectively, being not recommended the use of the same for the region, considering the studied period.

**KEYWORDS:** Penman-Monteith; Indirect methods; irrigation.

## INTRODUÇÃO

A agricultura, dentre os diversos usos da água, tem se caracterizado como aquele de maior expressão, em virtude da grande quantidade de água normalmente utilizada na irrigação. Com o crescimento contínuo da agricultura irrigada, se torna indispensável, a adoção de metodologias que promovam cada vez mais o uso racional deste recurso. Nesse aspecto, destaca-se o manejo da água, no qual depende dentre diversos fatores, da quantificação correta do conteúdo de água perdido pelas culturas pelo processo evapotranspirativo.

O uso consuntivo de água, com base no valor da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), define a lâmina de água a ser repostada pela irrigação diariamente. Esta variável pode ser obtida pelo produto da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) por um coeficiente de cultura ( $k_c$ ), geralmente tabelado ou proposto na literatura (Allen et al., 1998).

A estimativa do consumo hídrico das culturas pode ser realizada através de várias metodologias como medições diretas no campo ou por meio indireto através de equações empíricas. As medições diretas muitas vezes requerem a utilização de equipamentos sofisticados e caros o que no geral inviabiliza sua utilização. Por isso, tem-se recorrido à utilização de equações empíricas, por serem mais práticas e viáveis de serem usadas para fins de manejo da irrigação (Cavalcante Junior et al., 2011).

De acordo com Grismer et al. (2002), existem cerca de cinquenta métodos indiretos para a estimativa da  $ET_o$ , os quais exigem informações meteorológicas distintas. Dentre os modelos indiretos, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda o uso do método de Penman-Monteith como método padrão para a estimativa de  $ET_o$ , devendo assim ser utilizado na avaliação de outros métodos de estimativa (Allen et al., 1998), uma vez que este mostra-se eficiente em diversas condições climáticas. Entretanto, esse método necessita de um grande número de elementos meteorológicos, que nem sempre estão disponíveis em algumas regiões (Camargo & Camargo, 2000). Nessa situação, outros métodos

que necessitem de um número menor de elementos meteorológicos podem ser usados para estimativa de ETo (Fietz, 2005).

Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) em comparação com o método de Penman-Monteith padrão FAO, para o município de Botucatu, SP.

## MATERIAL E METODOS

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo correspondem ao período de janeiro a dezembro de 2016; e foram obtidos na estação meteorológica do Lajeado UNESP, Botucatu, SP (Lat. 22° 50' 48"S; Long. 48° 25' 53"W; Alt. 786 m). As estimativas de evapotranspiração de referência (ETo) tomaram como base dados coletados através de um datalogger CR 23X, operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias a cada 5 minutos, bem como, médias diárias.

Os métodos utilizados para a estimativa da ETo foram: Benevides-Lopes, Hargreaves, Ivanov, Jensen-Haise, Makkink, Priestley & Taylor e Turc. Todos foram comparados ao método de Penman-Monteith, considerado padrão pela FAO.

O método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO considera a altura da grama fixada em 0,12 m, a resistência estomática de 70 s m<sup>-1</sup> e albedo de 0,23. Sua estimativa se dá utilizando a equação (1) (Allen et al., 1998):

$$ET_{OPM} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U2)} \quad (1)$$

Em que,

ET<sub>OPM</sub> – evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>

Rn – saldo de radiação, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

G – fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

T<sub>med</sub> – temperatura média diária, °C;

U2 – velocidade do vento a 2 m de altura, m s<sup>-1</sup>;

es – pressão de saturação de vapor, kPa;

ea – pressão atual de vapor, kPa;

Δ – declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>;

γ – constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>.

O método de Benavides-Lopez (BL), foi desenvolvido por Garcia Benavides e Lopez Diaz (1970) e, baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar (Pereira et al., 1997):

$$ET_{O_{BL}} = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_{med}}{237,5 + T_{med}}\right)} (1 - 0,01UR) + 0,21T_{med} - 2,30 \quad (2)$$

Em que,

$ET_{O_{BL}}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Benevides-Lopes, mm dia<sup>-1</sup>;

$T_{med}$  – Temperatura média do ar, °C;

UR – Umidade relativa do ar, %.

O método de Hargreaves (1977) utiliza como dados de entrada apenas temperatura média e radiação solar global, na equação (3):

$$ET_{O_{HG}} = 0,0075R_{s_{mm}}(1,8T_{med} + 32) \quad (3)$$

Em que,

$ET_{O_{HG}}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Hargreaves, mm dia<sup>-1</sup>;

$T_{med}$  – temperatura média do ar, °C;

$R_{s_{mm}}$  – radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (milímetros) obtida pela equação 4.

$$R_{s_{mm}} = \frac{R_s}{\lambda} \quad (4)$$

Em que,

$R_s$  – radiação solar global MJm<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>;

$\lambda$  – calor latente de vaporização MJ kg<sup>-1</sup>.

O método de Ivanov que tem como variável de entrada, a temperatura do ar e umidade relativa, descrito por Jensen (1973):

$$ET_{O_{Iva}} = 0,006(25 + T_{med})^2 \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (5)$$

Em que,

$ET_{O_{Iva}}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Ivanov, mm dia<sup>-1</sup>;

$T_{med}$  – temperatura média do ar, °C;

UR – umidade relativa média do ar, %.

Método de Jensen & Haise (1963) foi desenvolvido para regiões áridas e semiáridas. Consiste em estimar a evapotranspiração de referência apenas com dados de temperatura do ar e radiação solar, conforme a equação (5):

$$ET_{O_{JH}} = R_{s_{mm}}(0,025T_{med} + 0,08) \quad (6)$$

Em que,

$ET_{oJH}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Jensen & Haise, mm dia<sup>-1</sup>;

$RS_{mm}$  – radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (milímetros) e pode ser obtida conforme a equação 4.

O método de Priestley & Taylor constitui-se em uma aproximação do método de Penman. Nesta equação, permanece apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico “ $\alpha$ ”, conhecido como parâmetro de Priestley & Taylor (1972), o qual incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico:

$$ET_{oPT} = \frac{\alpha \frac{(\Delta + \gamma)}{\gamma} (Rn - G)}{\lambda} \quad (7)$$

Em que,

$ET_{oPT}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Jensen & Haise, mm dia<sup>-1</sup>;

$\alpha$  – parâmetro de Priestley & Taylor (1,26), adimensional;

$Rn$  – saldo de radiação, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

$\gamma$  – constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>.

O método de Makkink utiliza a radiação solar como variável de entrada, descrito por Pereira et al. (1997) da seguinte forma:

$$ET_{oMak} = 0,61WRs_{mm} - 0,12 \quad (8)$$

Em que,

$ET_{oMak}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Jensen & Haise, mm dia<sup>-1</sup>;

$RS_{mm}$  – radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (milímetros) e pode ser obtida conforme a equação 4;

$W$  – fator de ponderação calculado pela equação (9).

$$W = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \quad (9)$$

Em que,

$\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>;

$\gamma$  – constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>.

O método de Turc foi desenvolvido em 1961 para o oeste europeu, onde a umidade do ar é maior que 50% (Kashyap & Panda, 2001):

$$ET_{oTur} = a_t 0,013 \left( \frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \left( \frac{Rs/0,0238846 + 50}{\lambda} \right) \quad (10)$$

Em que,

$ET_{oTur}$  – evapotranspiração de referência segundo o método de Turc, mm dia<sup>-1</sup>;

$T_{med}$  – temperatura média do ar, °C;

$R_s$  – radiação solar global  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;

$\gamma$  – constante psicrométrica,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

A comparação entre as ETo estimadas pelos diferentes métodos e ETo padrão foi feita utilizando regressão linear e o coeficiente de desempenho “c” proposto por Camargo & Sentelhas (1997), correspondente à multiplicação do coeficiente de correlação “r” pelo coeficiente de exatidão “d” apresentado por Willmott et al. (1985) e descrito por Camargo & Sentelhas (1997) da seguinte forma:

$$d=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^N(Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N(|Pi - Oi| + |Oi - O|)^2}\right] \quad (11)$$

Em que,

Pi – valor da ETo estimado;

Oi – valor da ETo padrão;

O – média dos valores padrão.

O desempenho foi classificado como ótimo para valores de “c” maiores que 0,85; como muito bom para valores entre 0,76 e 0,85; como bom para valores entre 0,66 e 0,75; como mediano para valores entre 0,61 e 0,65; como sofrível para valores entre 0,51 e 0,60; como mau para valores entre 0,41 e 0,50; e como péssimo para valores inferiores a 0,40.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos de análise do desempenho dos métodos de estimativa da ETo. Observa-se que entre os métodos analisados, os que utilizam como parâmetros de entrada a temperatura do ar, a radiação solar, assim como o saldo de radiação, foram os que apresentaram melhor desempenho, com “c” igual a 0,92; 0,99; 0,88 e 0,87, para os métodos Hargreaves, Makkink, Priestley & Taylor e Turc, respectivamente, sendo classificados como ótimo, ainda o método de Jensen-Haise apresentou desempenho muito bom, com “c” igual a 0,79. Silva et al. (2014), encontraram resultados inferiores, mas ainda assim satisfatório para o método de Hargreaves em trabalho realizado em Fernando de Noronha, PE que apresentou coeficientes de exatidão (d) e determinação (c) de 0,85 e 0,66, respectivamente, classificado com bom desempenho.

Para o método de Makkink além de desempenho ótimo, para os demais coeficientes obteve alta exatidão, correlação e determinação com valores iguais a 0,99. Resultados

corroboram com Conceição & Mandelli (2005), que registraram desempenho ótimo do método com coeficientes “c” igual 0,91 e “d” igual 0,95, para as condições de Bento Gonçalves, RS.

Ainda na Tabela 1, os resultados encontrados para o método de Priestley & Taylor também foram observados por Silva et al. (2011), em Uberlândia, MG, com índice de desempenho classificado como ótimo, para o método. Contudo de acordo com os autores, o ótimo desempenho desse método era esperado por ele se assemelhar ao método padrão Penman-Monteith, exigindo praticamente os mesmos elementos climatológicos como o saldo de radiação, que por sua vez acaba restringindo o uso para locais onde há carência de equipamentos para medi-los.

O método de Turc apresentou ótimo desempenho e com coeficiente de correlação igual a 0,99. Fanaya Júnior et al., (2012), encontraram resultados diferentes para o município de Aquidauana, MS, observaram que a correlação do método padrão com o método de Turc foi de 0,97. No entanto, esse valor, apesar de alto, não demonstrou um bom resultado do conjunto do método, que apresentou o índice de desempenho (c) igual a 0,65.

Os resultados apresentados para o método de Jensen-Haise, na Tabela 1, demonstraram alta correlação e determinação 0,99 e 0,98, respectivamente, e foi classificado como muito bom. Pereira et al. (2009) chegaram a um resultado semelhante ao deste trabalho, onde o método de Jensen-Haise foi classificado como ótimo para períodos chuvosos e muito bom para períodos secos, sendo o método mais recomendado para as condições climáticas da região da Serra da Mantiqueira, MG.

O método de Benevides-Lopes apresentou desempenho mediano com coeficiente de correlação 0,61 (Tabela 1). Araújo et al. (2010), em estudo nas cidades de Cretéu e Jaguaruana, ambas no Ceará, encontraram resultados inferiores ao deste trabalho para o método de Benevides-Lopes, que apresentou desempenho péssimo, não sendo recomendada a utilização para os municípios do estudo.

Entre os métodos utilizados nesse estudo, o de Ivanov apresentou o pior desempenho com “c” igual a 0,44, sendo considerado mau, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,31. Lima (2010) encontrou para região de Limoeira, CE, o índice de desempenho (c) para o método de Ivanov igual a 0,62, sendo classificado como regular.

Deste modo, os métodos avaliados nesse trabalho que utilizaram temperatura do ar e umidade relativa apresentaram os piores resultados. Concordando com Pereira et al. (2009) que justificaram que os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que empregam radiação solar apresentam melhor desempenho que os métodos que utilizam apenas a temperatura do ar. Ainda, segundo Conceição (2003), os métodos que empregam somente a

temperatura do ar, limitam a representatividade das condições climáticas para efeito de estimativa da evapotranspiração de referência. Isso porque, conforme as condições de umidade relativa do ar e vento, a demanda hídrica da atmosfera será diferente para os mesmos valores da temperatura do ar.

## **CONCLUSÃO**

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que utilizam como variáveis de entrada, a temperatura do ar e a radiação solar, apresentaram melhor desempenho, para o município de Botucatu, sendo assim uma alternativa para o manejo da irrigação, quando não se dispõe de maior número de variáveis climáticas.

## **AGRADECIMENTO**

A Capes, pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor, ao CNPq pela bolsa concedida aos demais autores e a equipe da Estação Meteorológica do Lageado - UNESP pelo fornecimento dos dados climáticos.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALLEN, R. G.; PEREIRA; L. S.; RAES, D. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper 56.
- ARAÚJO, W.F.; CONCEIÇÃO, M.A.F.; VENANCIO, J.B. Evapotranspiração de referência diária em Boa Vista (RR) com base na temperatura do ar. Irriga, Botucatu, Edição Especial, p. 155-169, 2012.
- BENAVIDES, J.G.; LOPEZ DIAZ, J. Formula para el calculo de La evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15o N - 15o S). Agronomia Tropical, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Bragantia, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.
- CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89 – 97, 1997.



- CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; SOBRINHO, J. E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. *Semina*, v. 32, p. 1699-1708, 2011.
- CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 303 – 307, 2005.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.
- FANAYA JÚNIOR, E.D.; LOPES, A.S.; OLIVEIRA, G.Q.; JUNG, L.H. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquidauana, MS. *Irriga*, Botucatu, v. 17, n. 4, p. 418-434, 2012.
- GRISMER, M. E.; ORANG, M.; SNYDER, R.; MATYAC, R. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, New York, v. 128, n. 3, p. 180 - 184, 2002.
- HARGREAVES, G.H. *World water for agriculture*. Contract AID/ta-C-1103, Washington, DC: Utah State University and Agency for International Development, 1977. 177p.
- KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, 2001.
- JENSEN, ME (ed.), 1973. *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. American Society of Civil Engineers, New York, USA, 215p.
- JENSEN, M.E. & HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Reston, v. 89, n. IR4, p. 15-41, 1963.
- LIMA, J. E. B. Análise comparativa da evapotranspiração de referência estimada por diferentes métodos no município de Limoeiro do Norte, Ceará. 2010. 62p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará. 2010.
- PEREIRA, A.R. et al. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, D.R.; YANAGI, S.N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; SILVA, L.A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009.
- PRIESTLEY, C.H.B., TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux on evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, Washington, v.100, p. 81-92, 1972.
- SILVA, V.J.; CARVALHO, H.P.; DA SILVA, C.R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R.E.F.

Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. Bioscience Journal, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; SANTOS, E. S. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Fernando de Noronha. Irriga, v.19(3): 390-404, 2014.

WILLMOTT, C. J., CKLESON, S.G., DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research. Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995 – 9005, 1985.

**Tabela 1.** Coeficiente de correlação (r), determinação (R<sup>2</sup>), exatidão (d) e desempenho (c) para valores diários da ETo estimada pelos métodos: Benevides-Lopes, Hargreaves, Ivanov, Jensen-Haise, Makkink, Priestley & Taylor e Turc comparados com o método padrão de Penman-Monteith parametrizado pela FAO. Botucatu, SP.

Métodos de estimativa de ETo	d	R <sup>2</sup>	r	c	Desempenho
Benevides-Lopes	0.81	0.48	0.69	0.56	Mediano
Hargreaves	0.93	0.99	1.00	0.92	Ótimo
Ivanov	0.73	0.37	0.61	0.44	Mau
Jensen-Haise	0.80	0.98	0.99	0.79	Muito bom
Makkink	0.99	0.99	0.99	0.99	Ótimo
Priestley & Taylor	0.88	0.98	0.99	0.88	Ótimo
Turc	0.87	0.98	0.99	0.87	Ótimo