

MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET₀) NO MUNICÍPIO DE SANTA TERESA, ES

ANDRE DALLA BERNARDINA GARCIA¹; JOSÉ CARLOS MENDONÇA²
E CLAUDIO MARTINS DE ALMEIDA³

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia ES 080, Km 93, São João de Petrópolis, CEP 29660-000, Santa Teresa, ES, Fone:(27)3259-7878, E-mail:andredallabg@outlook.com

²Laboratório de Engenharia Agrícola/UENF, Av. Alberto Lamego, 2000,P1,sl 209, Horto, Campos dos Goytacazes, RJ, Fone (22) 2739-7308, E-mail: mendonca@uenf.br

³Laboratório de Engenharia Agrícola/UENF, Av. Alberto Lamego, 2000,P1,sl 209, Horto, Campos dos Goytacazes, RJ, Fone (22) 2739-7308, E-mail: claudio@pq.uenf.br

1 RESUMO

Devido aos constantes debates ocorridos sobre a racionalização dos recursos hídricos, a busca de maneiras e boas práticas de utilização da água têm sido cada vez mais difundidas, principalmente na agricultura. Dentre os meios de preservar os recursos hídricos está o manejo de irrigação, por isso é muito importante realizar a estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀). Neste contexto, o presente trabalho foi desenvolvido para o município de Santa Teresa, localizado na meso região Central Espírito-Santense com o objetivo de avaliar e comparar diferentes métodos de estimativa da ET₀ com o método de Penman-Monteith FAO56, considerado como padrão de calibração, na ausência de dados lisimétricos. Os métodos utilizados foram os de Hargreaves-Samani, Radiação Solar, Makkink, Jesen-Haise, Linacre e Penman Simplificado. O coeficiente de determinação (R²), índice de concordância de Willmott (D), o erro médio absoluto (MAE), o erro máximo (EMAX), a eficiência do método (EF) e o índice de desempenho (c) foram utilizados para avaliar os indicadores observados. Dentre os métodos avaliados, os que apresentaram melhores resultados foram os de Makkink e Penman Simplificado (R² = 0,96 e 0,96; D= 0,99 e 0,97; MAE = 0,23 e 0,44; EMAX = 1,36 e 1,07; EF = 0,95 e 0,87 e c = 0,97 e 0,95) respectivamente, seguidos do método de Hargreaves-Samani (R² = 0,86; D= 0,91; MAE = 0,60; EMAX = 2,16; EF = 0,69 e c = 0,85). Os resultados obtidos com os métodos de Linacre, Radiação Solar e Jensen-Haise foram inferiores e sendo a sua utilização não recomendada para a região de Santa Teresa, ES.

Palavras-chave: Agrometeorologia, demanda hídrica, irrigação, Penman-Monteith

GARCIA, A. D. B.; MENDONÇA, J. C.; MARTINS, C. A.
METHODS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION (ET₀) FOR
THE CITY OF SANTA TERESA, ES

2 ABSTRACT

Due to constant discussion about rationalization of water resources, the search for ways and good practices in water use have been increasingly widespread, especially in agriculture. Among the means of preserving water resources is irrigation management, so it is very important to estimate the reference evapotranspiration (ET₀). In this context, the present work

Recebido em 09/02/2017 e aprovado para publicação em 18/10/2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v22n4p701-714>

was developed for the municipality of Santa Teresa, located in Central Espírito-Santo mesoregion with the objective of evaluating and comparing different ET_0 estimation methods with Penman-Monteith FAO56 method considered as calibration standard, in the absence of lysimetric data. The methods used were those of Hargreaves-Samani, Solar Radiation, Makkink, Jensen-Haise, Linacre and Penman Simplified. The coefficient of determination (R^2), Willmott concordance index (D), mean absolute error (MAE), maximum error (EMAX), method efficiency (EF) and performance index (c) were used for assessing the observed indicators. Among the evaluated methods, the ones with the best results were Makkink and Penman Simplified ($R^2 = 0.96$ and 0.96 D = 0.99 and 0.97 , MAE = 0.23 and 0.44 , EMAX = 1.36 and 1.07 , EF = $.95$ and 0.87 and $c = 0.97$ and 0.95) respectively, followed by Hargreaves-Samani methods ($R^2 = 0.86$, D = 0.91 , MAE = 0.60 , EMAX = 2.16 , EF = 0.69 and $c = 0.85$). The results obtained with the methods of Linacre, Solar Radiation and Jensen-Haise were lower and their use is not recommended for the region of Santa Teresa, ES.

Keywords: Agrometeorology, hydric demand, irrigation, Penman-Monteith

3 INTRODUÇÃO

A escassez de água e o uso correto dos recursos hídricos tem sido pauta da maioria dos assuntos abordados nas mídias e em grande parte dos estudos acadêmicos relacionados ao tema. Por este motivo, a água, quando aproveitada para fins agrônômicos deve ser utilizada da forma mais racional possível. Com esta premissa, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) tem por objetivo otimizar o uso da água na agricultura, por meio do manejo correto e eficiente da irrigação.

Costa, Mantovani e Sedyama (2015) afirmam que o conceito de evapotranspiração de referência, desenvolvido por Thornthwaite (1948), tem como objetivo de estudar a demanda evaporativa da atmosfera para qualquer cultura, sendo os fatores climáticos as únicas variáveis a afetarem a evapotranspiração.

Da Silva et al. (2013) reiteram que existem diversos métodos para estimar a ET_0 , no entanto, o desempenho deles pode variar conforme o ambiente, já que os mesmos possuem algum tipo de conhecimento empírico envolvido. Os mesmos autores ainda destacam que o método de Penman-Monteith foi parametrizado por Allen et al. (1998) e reportado no manual da Food and Agriculture Organization (FAO) nº 56, sendo ele estabelecido como modelo padrão de determinação da ET_0 e apesar de ter sido estabelecido como método padrão, o Penman-Monteith (FAO 56), necessita de um conjunto de dados meteorológicos específicos para realização da estimativa da ET_0 , o que pode ser um problema, já que alguns deles nem sempre estão disponíveis nas estações meteorológicas.

De acordo com Allen et al. (1998) e Lima Junior et al. (2016), o modelo de Hargreaves-Samani é uma possível alternativa para estimativa da ET_0 quando há ausência de alguns dados meteorológicos. Isto acontece, pois, este modelo utiliza apenas dados das temperaturas máxima, mínima e média do ar e da radiação solar no topo da atmosfera, o que ainda assim faz com que seja amplamente utilizado devido a sua simplicidade e potencial (BAUTISTA et al., 2009).

Fernandes et al. (2012) relatam que um dos problemas apresentados pelo método de Hargreaves-Samani é que em regiões de clima frio, nas quais as características não se assemelham ao local onde ele foi calibrado originalmente, ocorre a superestimação dos dados da ET_0 , em relação ao método padrão.

Dentre os modelos simplificados está o método da Radiação Solar ou método (FAO 24) da Radiação, que se trata de uma adaptação feita do modelo proposto por Makkink, substituindo os coeficientes 'a' e 'b' por um parâmetro 'c', que é em função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA 1997; Tanaka et al., 2016).

O modelo proposto por Makkink (1957) utilizou dados de evapotranspiração potencial de um gramado sobre um lisímetro de lençol freático constante e dessa forma obteve uma correlação entre a evapotranspiração potencial (ETP) diária e a radiação solar ao nível de superfície (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997). Jensen e Haise (1965) propuseram uma metodologia de estimativa da evapotranspiração potencial em campos irrigados nas áreas árida e semiáridas. Neste caso, é preferível denominá-la de ET_c , pois na definição apresentada não há obrigação de área de bordadura homogênea, ilimitada e bem abastecida de água conforme requer a ET_p (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997; FERRONATO et al., 2016).

O método proposto por Linacre (1977) é uma simplificação do método de Penman (1963) e considera a temperatura do ar como a única variável para estimar a evapotranspiração, além de necessitar da latitude e altitude do local. Este modelo necessitou de algumas aproximações para sua concepção.

Outro modelo, proveniente de uma simplificação é o método de Penman Simplificado (2006). Este método baseado em Penman foi desenvolvido por Villa Nova et al. (2006), que de modo mais simples estima a evapotranspiração potencial, considerando apenas o período diurno, pois segundo o autor esses valores são mais representativos devido a maior transformação de água em vapor, que ocorrem pela manhã quando as temperaturas são mais elevadas (MENDONÇA, DOS SANTOS ESTEVES e DE SOUZA, 2013).

Um ponto a ser destacado, implicando na importância do trabalho é a redução dos custos necessários para estimativa da ET_0 pelos métodos indiretos, uma vez que as estações meteorológicas completas, que fornecem todas os elementos climáticos para estimar a ET_0 pelo método de P-M apresentam custo elevado a nível de produtor rural. Dessa forma, uma estimativa por outros métodos devidamente calibrados localmente pode ser realizada com uso reduzido de sensores meteorológicos, o que diminui consideravelmente o custo da estimativa da ET_0 .

Considerando que a ET_0 apresenta variabilidade espacial e que o Método de Penman-Monteith necessita de dados obtidos com diferentes sensores meteorológicos, o objetivo na realização deste trabalho consistiu em estimar a evapotranspiração de referência (ET_0), utilizando uma série de cinco anos de dados médios diários, por seis métodos diferentes e comparar os resultados com os valores estimados pelo método de Penman-Monteith (FAO 56) no município de Santa Teresa-ES.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Dados locais meteorológicos e métodos utilizados para estimar ET_0

Este trabalho foi desenvolvido com base em informações meteorológicas obtidas na estação automática A613, pertencente ao INMET, localizado na meso região Central Espírito-Santense, cidade de Santa Teresa-ES, coordenadas geográficas 19 °56'12"S e 40 °35'28"W, com altitude de 976 m. O clima da região caracteriza-se como Cwa, mesotérmico, com estação seca no inverno e forte pluviosidade no verão (classificação de Köppen), com precipitação

média anual de 1.249,6 mm. A temperatura média anual de 19,9 °C, com máxima de 32,8 °C e mínima de 10,6 °C (INCAPER, 2011).

Devido à disponibilidade dos dados viáveis, optou-se pela utilização de dados diários entre o período de janeiro de 2012 a janeiro de 2017. Conforme Mendonça et al. (2006), foram eliminados os dados referentes aos dias em que houve precipitação pluviométrica superior a 1,0 mm dia⁻¹, como também não utilizou-se dados em que havia inconsistência na leitura ou registros incompletos, o que resultou em uma amostra composta 1003 médias diárias viáveis para o período avaliado.

Após a triagem dos dados climáticos, efetuou-se o cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀), por meio de sete equações de diferentes modelos, sendo utilizados os propostos por Penman-Monteith-FAO56 (PM-FAO56), Hargreaves-Samani (H-S), Radiação Solar FAO (RS FAO), Makkink (MKK), Jensen-Haise (J-H), Linacre (LIN) e Penman Simplificado (PS). Dentre os modelos utilizados, o primeiro (PM FAO) foi usado como padrão de comparação para os demais.

4.1.1 Método de Penman-Monteith-FAO56

Para estimar a evapotranspiração de referência, em escala diária, utilizou-se o modelo proposto por Penman-Monteith (FAO 56) (ALLEN et al. 1998), conforme apresentado na Equação 1.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Em que: R_n – Radiação líquida, em MJ m⁻²s⁻¹; G – Densidade do fluxo de calor no solo, em MJ m⁻²s⁻¹; T – Temperatura média diária do ar, em °C; γ – Constante psicrométrica, em kPa °C⁻¹; Δ – Tangente à curva de pressão de saturação de vapor em função da temperatura do ar, em kPa °C⁻¹; U₂ – Velocidade média diária do vento a 2 metros de altura, em m s⁻¹; e_a – Pressão de vapor de saturação, média diária, em kPa; e_s – Pressão de vapor de saturação, média diária, à temperatura do ponto de orvalho, em kPa

4.1.2 Método de Hargreaves-Samani

A estimativa da ET₀ utilizando somente a diferença entre as temperaturas máxima e mínima, mas também a temperatura média do ar e a radiação no topo da atmosfera conforme recomendado por Hargreaves e Samani (1985) e citado por Lima Júnior et al. (2016), efetuada conforme a Equação 2, mais simples em relação a equação proposta por Penman-Monteith.

$$ET_0 = 0,023Ra(T_{\max} - T_{\min})^{0,5}(T + 17,8) \quad (2)$$

Em que: Ra – radiação extraterrestre, em MJ m⁻²dia⁻¹; T_{max} – temperatura máxima do ar, em °C; T_{min} – temperatura mínima do ar, em °C; T – temperatura média do ar, em °C.

4.1.3. Método Radiação Solar FAO

O modelo de Radiação Solar (FAO) para obtenção da ET_0 foi realizado conforme a Equação 3 (VESCOVE e TURCO, 2005), que utiliza radiação solar ao nível do solo, o coeficiente angular de regressão, determinado em função da umidade relativa e média e da velocidade média do vento a 2 m de altura e o fator de ponderação dependente da temperatura do ar.

$$ET_0 = cWRs \quad (3)$$

Em que: c – Coeficiente angular que pode ser obtido utilizando-se a Equação 4; W – Fator de ponderação dependente da temperatura do ar e do coeficiente psicrométrica; Rs – Radiação solar a nível da superfície do solo, expressa em equivalente de evaporação (mm dia^{-1});

$$c = c_0 + cL \quad (4)$$

Em que: $cL = a_0 + a_1 UR + a_2 Vd + a_3 UR Vd + a_4 UR^2 + a_5 Vd^2$; $c_0 = -0,3$; $a_0 = 1,0656$; $a_1 = -0,0012795$; $a_2 = 0,044953$; $a_3 = -0,00020033$; $a_4 = -0,000031508$; $a_5 = -0,0011026$; UR – Umidade relativa média, em %; Vd – Velocidade média do vento no período diurno a 2 m de altura, em m s^{-1} , (considerou-se a $Vd = a 70\%$ da velocidade média do vento no período de 24 horas).

De acordo com Tanaka et al. (2016), o fator W pode ser calculado de acordo com as condições diárias, fazendo-se uso da Equações 5 ou 6, com base na temperatura.

$$W = 0,407 + 0,0145T; \quad 0 < T < 16^\circ C \quad (5)$$

$$W = 0,483 + 0,01T; \quad 16,1 < T < 32^\circ C \quad (6)$$

4.1.4. Método de Makkink

O método de estimativa da ET_0 pelo modelo de Makkink, demonstrado conforme a Equação 7, tornou simplificado o modo proposto por Penman, eliminando da equação os termos aerodinâmicos. Makkink substituiu o Saldo de Radiação pela Radiação Solar Global, o que foi justificado devido a grande dificuldade de obter os dados de Saldo de Radiação (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997).

$$ET_0 = 0,61 W Rs - 0,12 \quad (7)$$

Em que: Rs – Radiação solar global, em mm dia^{-1} ; W - Fator de ponderação dependente da temperatura do ar e do coeficiente psicrométrico, calculado conforme as equações 5 e 6.

4.1.5. Método de Jensen-Haise

A avaliação da ET_0 pelo modelo proposto por Jensen-Haise, consiste em uma equação empírica que utiliza a temperatura do ar e foi desenvolvida para regiões áridas e semi-áridas

(PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997). Neste modelo estimado conforme Equação 8, também faz-se uso da radiação solar global, além da temperatura média (FERRONATO et al. 2016).

$$ET_0 = (0,0252T + 0,078)Rs \quad (8)$$

Em que: T – Temperatura média do ar, em °C; Rs - Radiação solar global, em mm dia⁻¹.

4.1.6. Método de Linacre

O modelo de estimativa de ET₀ desenvolvido por Linacre foi baseado em dados para locais com clima temperado, quente e seco. Assim como vários outros métodos, trata-se de uma simplificação da equação de Penman-Monteith, neste caso utilizando a temperatura, latitude e longitude para estimar a evapotranspiração, conforme Equação 9 (DA ROCHA et al. 2015).

$$ET_0 = \frac{500(T + 0,006H) + 15(T - T_d)}{(100 - \varphi)(80 - T)} \quad (9)$$

Em que: T – Temperatura do ar, em °C; H – Altitude, em m; φ – Latitude, em graus; T_d – Temperatura do ponto de orvalho, em °C.

4.1.7. Método Penman Simplificado

Um método simplificado para calcular a evapotranspiração de referência foi desenvolvido com base na abordagem de Penman (1963), no entanto, considerando apenas o valor diurno para o cálculo da mesma, visto que durante este período a passagem da água do estado líquido para o estado de vapor é mais expressiva, logo há maior evapotranspiração. O modelo está descrito na Equação 10 e utiliza variáveis como fluxo de calor no solo e um fator de ponderação dependente da temperatura do ar (MENDONÇA et al., 2013).

$$ET_0 = 0,408 \frac{(Rn - G)}{(2 - W)} \quad (10)$$

Para este estudo, os valores de G foram considerados nulos, por se tratar apenas do período diurno. Fausto et al. (2016) obtiveram valores ínfimos para esta variável indicando uma média de 0,18 Wm⁻², sendo a maior partição de radiação na forma de calor sensível, o que indica uma utilização de um valor insignificante de “G”, nestas condições.

4.2. Análise Estatística

Para avaliar o desempenho dos métodos testados em relação ao método padrão de Penman-Monteith (FAO 56), foram utilizados como indicadores o índice de concordância (D) conforme Willmott et al. (1985), erro médio absoluto (MAE), erro máximo (EMAX), eficiência do modelo ou método (EF) e índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), calculados de acordo com equações 11, 12, 13, 14 e 15, respectivamente.

$$D = 1 - \frac{\sum_i^n (Pi - Oi)^2}{\sum_i^n (|Pi - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Oi - Pi| \quad (12)$$

$$EMAX = MAX(|Oi - Pi|) \quad (13)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O - Pi)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$c = r D \quad (15)$$

Em que: P_i – Valores estimados pelo método em teste; O_i – Valores estimados pelo método padrão, ET_0PM ; \bar{O} – Média dos valores estimados pelo método padrão, ET_0PM ; MAX – Máximo valor encontrado da diferença em módulo; r – Coeficiente de correlação de Pearson; D – Índice de concordância de Willmott, obtido pela Eq. 12.

De acordo com Peixoto et al. (2014), para os índices ‘D’, ‘EF’ e ‘c’, quanto mais próximos a 1, melhor o desempenho do método, isso indica que os valores obtidos na previsão do modelo em teste são também similares aos resultados obtidos com o método considerado como padrão. No entanto, a diferença entre os três índices é que ‘D’ e ‘c’ pode assumir somente valores entre 0 e 1, ou seja, positivos. Já os valores obtidos em ‘EF’ podem variar - ∞ a 1 (ZHANG et al., 2007; VIOLA et al., 2009). Isso significa, caso negativo, que a média dos dados do modelo padrão predizem melhor os resultados do que aqueles estimados pelo modelo em estudo (PEIXOTO et al., 2014).

Como meio de classificação dos índices, adotou-se diferentes tabelas de categorização que relacionam o valor obtido com uma categoria específica, transformando o dado numérico ou quantitativo em qualitativo.

A classificação da eficiência do modelo (EF), também conhecido como coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), foi arranjada de acordo a indicação de diferentes autores. Beskow et al. (2011) sugerem que para valores do índice $EF = 1$, o ajuste é considerado perfeito, valores de $EF > 0,75$ o modelo é considerado adequado e bom, e se $0,36 < EF < 0,75$ o modelo é considerado aceitável. No entanto para Zappa e Gurtz (2002), valores de EF maiores do que 0,5 já habilitam o modelo para simulação.

Para classificar o índice de desempenho (c), adotou-se a Tabela 1, seguindo os critérios indicados por Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 1. Critérios de interpretação do índice de desempenho “c”.

Índice de desempenho "c"	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,60	Sofrível
0,41 - 0,50	Mal
≤ 0,4	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos Índices de Concordância de Willmott (D), Coeficiente de Determinação (R^2), Erro médio Absoluto (MAE), Erro Máximo (EMAX), Índice de Desempenho (c) e Eficiência do Modelo (EF).

Tabela 2. Índices e erros comparativos dos métodos em teste em relação ao método padrão

Modelo\Índice	R^2	D	MAE	EMAX	c	EF
H-S	0,86	0,91	0,6	2,16	0,85	0,69
RS FAO	0,96	0,89	0,96	2,04	0,87	0,36
MKK	0,96	0,99	0,23	1,36	0,97	0,95
J-H	0,97	0,77	1,62	3,11	0,76	-0,75
LIN	0,69	0,80	0,79	2,81	0,67	0,48
PS	0,96	0,97	0,44	1,07	0,95	0,87

Fica evidente que os métodos com pontos mais agrupados possuem um valor de Coeficiente de Determinação (R^2) mais elevado, o que mostra um agrupamento melhor dos resultados com valores muito próximos a 1, são eles J-H, MKK, RS FAO e PS. Os métodos de H-S e LIN tiveram os resultados menos expressivos, de modo que LIN apresentou-se muito disperso com R^2 próximo a 0,7 (Tabela 2).

Os resultados encontrados por Sanches et al. (2016) corroboram os obtidos neste estudo, pois para os modelos de MKK e LIN os autores obtiveram o melhor e o pior coeficiente de determinação (R^2), respectivamente. O método de LIN também obteve os piores resultados para ‘ R^2 ’ nas regiões de Paraíba e Minas Gerais (MENDONÇA; DANTAS, 2010; PEREIRA et al. 2009).

Quanto à análise do Índice de Willmott (D), pode-se notar que todos os modelos apresentaram valores razoáveis para ‘D’, no entanto os modelos MKK e PS destacam-se por serem muito próximos a 1, o que demonstra uma superioridade comparado aos outros modelos. Como este índice é dado por uma aproximação matemática que avalia a exatidão, a dispersão e o afastamento dos valores simulados em relação aos observados (WILLMOTT et al., 1985), pode-se afirmar, com base neste índice, que os dois métodos estimam a ET_0 de forma muito similar ao método padrão.

Paiva e Pinheiro (2016) também encontraram resultados satisfatórios para MKK em Pirai do Sul -PR, sendo considerado um dos métodos recomendados para cálculo da ET_0 no

local. Brixner, Schöffel e Tonietto (2010) também recomendam a utilização do método de Makkink para cálculo do Índice de Seca no Rio Grande do Sul.

O modelo de H-S também mostrou um bom potencial para o índice “D”, seguido por RS FAO, e pelos métodos J-H e LIN, que apresentaram os menores resultados numericamente.

Para os dados de MAE e EMAX os modelos de MKK e PS apresentaram os menores resultados, ou seja, mais próximos a zero. Para estas duas análises de erro, todos os outros modelos proporcionaram valores razoáveis, exceto J-H que expôs resultados elevados, o que o torna menos adequado dentre os modelos testados.

Comparando alguns modelos com o padrão, Back (2008) obteve um erro médio absoluto (MAE) de 1,141 para o modelo de H-S, o que o autor considerou um resultado insatisfatório, justificando o fato do mesmo ter sido desenvolvido para condições semiáridas e desse modo recomendou fazer devidas correções para melhor aplicação do método.

Observando como parâmetro o estudo realizado por Back (2008), pode-se dizer que os resultados do MAE neste estudo foram satisfatórios para todos os modelos, excetuando-se J-H, no qual o erro é de 1,62 mm dia⁻¹, considerada uma média de erro de grande relevância numérica.

Ao classificar os resultados expostos na Tabela 2, conforme o Índice de Desempenho (c) percebe-se que novamente os modelos de MKK e PS apresentaram os melhores resultados classificados como “Ótimo”, assim como o método RS FAO.

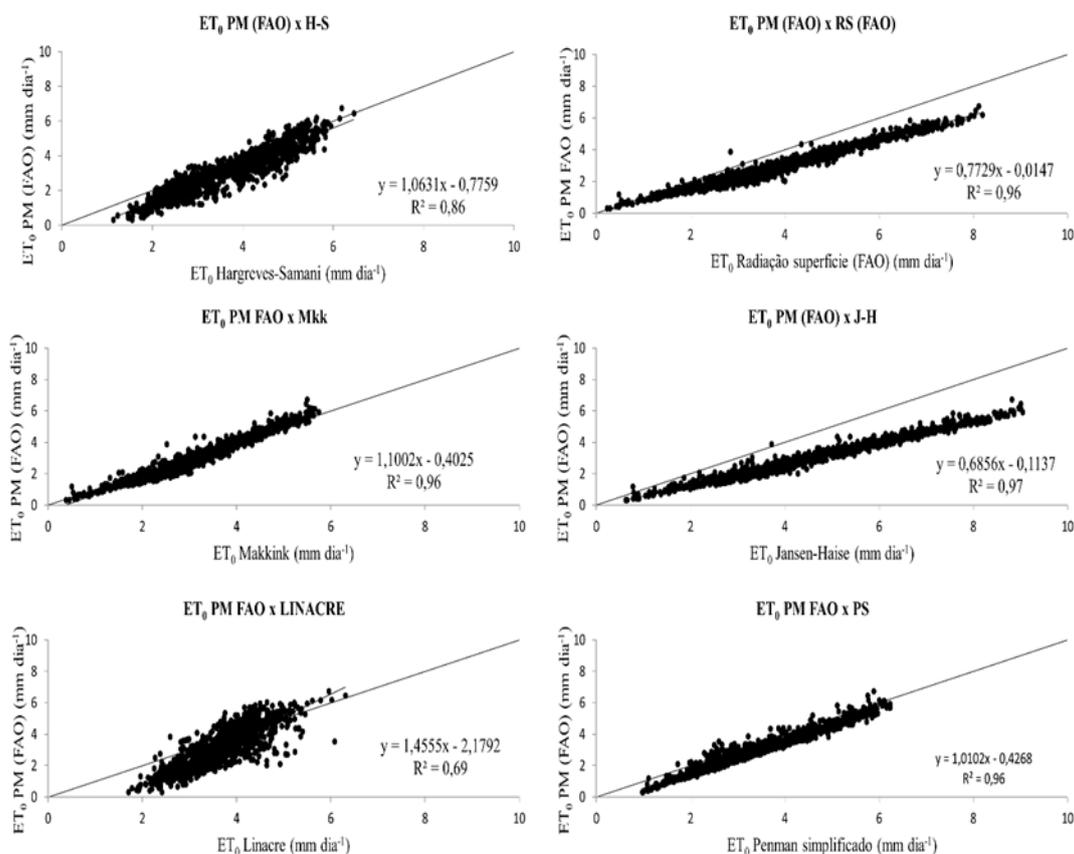
O modelo de H-S mostrou-se “Muito bom” para o desempenho de ajuste, o que corrobora os resultados de Borges e Mendiondo (2007), que encontraram boa correlação entre o método de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith (FAO 56), com confiabilidade superior a 0,90, atendendo satisfatoriamente à estimativa da ET₀.

Os autores Camargo e Sentelhas (1997) obtiveram para ambos modelos de LIN e RS FAO, em diferentes regiões do estado de São Paulo e trabalhando com Evapotranspirômetros, um valor menor do que 0,5, o que consideraram um mau resultado, diferente do ocorrido neste estudo.

Conforme a classificação de Zappa e Gurtz (2002), os métodos de MKK, PS e H-S são classificados como ‘Habilitado’ para o índice de Eficiência do Modelo (EF) e os métodos de RS FAO, J-H e LIN foram classificados como ‘Não recomendados’. Pela classificação de Beskow et al. (2011), destacam-se os métodos de MKK e PS classificados como ‘Adequado/Bom’, seguido por H-S e LIN classificados como ‘Aceitável’ e os métodos de RS FAO e J-H foram considerados como ‘Inaceitável’.

Os modelos de RS FAO e J-H, não foram aprovados em nenhuma das duas classificações para o índice de EF. De acordo com Zhang et al. (2007), o valor de EF indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, o que indica que os modelos RS FAO e J-H não obtiveram bons ajustes.

Na Figura 1 são apresentados os gráficos de correlação ente os métodos avaliados e o método padrão em relação a reta 1:1.

Figura 1. Gráficos da relação entre os métodos avaliados e o método padrão.

Pode-se observar na Figura 1 que, quatro dos seis modelos testados, tendem a superestimar a ET_0 sendo eles os de Hargreaves-Samani (H-S), Radiação Solar (RS FAO), Jensen-Haise (J-H) e Penman Simplificado (PS), com 17%, 30%, 51% e 12% respectivamente.

Araújo et al (2013), ao trabalhar com os métodos de H-S e RS FAO obteve resultados semelhantes, uma vez que estes superestimaram a ET_0 em 30,51% e 23,85% respectivamente. De acordo com o autor, tais métodos que se baseiam na temperatura do ar e radiação tendem a superestimar a evapotranspiração em cerca de 15 a 25% em climas úmidos.

Os outros dois métodos, Makkinik (MKK) e Linacre (LIN), tendem a superestimar em valores de ET_0 mais baixos e a subestimar em valores mais altos, com 2% para MKK e 16% para LIN. Da Silva e De Souza (2011), em experimento realizado no Semiárido Pernambuco, obtiveram um resultado inverso para LIN, de modo que o modelo subestimou a ET_0 em valores baixos e superestimou em valores mais altos, isto se deve a diferença entre as condições climáticas das regiões. Sanches et al. (2016), observaram que os métodos de MKK e J-H superestimaram os valores de ET_0 , para a região norte do Brasil, enquanto o modelo de LIN subestimou, em comparação ao modelo PM (FAO).

Pela análise gráfica, observa-se que os modelos MKK, PS e H-S se destacam em obter os valores mais equivalentes aos estimados pelo padrão, isso ocorre devido ao seus coeficientes angulares (a) 1,1002, 1,0002 e 1,0631, respectivamente, serem muito próximos a 1, ou seja, em praticamente todo o intervalo de dados a estimativa é bastante similar ao modelo padrão.

6 CONCLUSÕES

Os métodos de Makkink (MKK) e Penman Simplificado (PS) apresentaram melhores desempenhos, pois estes se sobressaíram, na classificação dos índices, apresentando maiores valores para 'D', 'c', R² e EF (0,99, 0,97, 0,96, 0,95 e 0,97, 0,95, 0,96 e 0,87, respectivamente) e ainda menores valores de MAE e EMAX (0,23 e 1,36 para MKK e 0,44 e 1,07 para PS), o que os torna mais indicados para a região estudada.

O método de Hargreaves-Samani (H-S), apesar de apresentar um alto valor para EMAX, pode ser indicado para uso em caso da impossibilidade de utilização de outros métodos, pois apresentou 'D', 'c' e R² (0,91, 0,85 e 0,86) próximos a 1, boa eficiência (0,69) e um baixo erro médio (MAE = 0,60).

Apesar de ser classificado como 'Aceitável', na classificação de Beskow et al., em relação a EF, o método de Linacre (LIN) apresentou resultados muito aquém para os outros índices de classificação, com baixo 'D' e 'c' (0,80 e 0,67), e também MAE e EMAX elevado (0,79 e 2,81), o que desqualifica o método para a região.

Os métodos de Jesen-Haise (J-H) e Radiação Solar (RS FAO) tiveram os piores resultados para EF (-0,75 e 0,36), sendo estes qualificados como 'inadequados', assim como mostraram os valores de MAE mais elevados (1,62 e 0,96), o que indica pouca confiabilidade destes métodos para a região estudada, deste modo não indicado o uso dos mesmos.

7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MARTINS, C. A. S.; BARBOSA, V. S. RODRIGUES, R.R. Desempenho comparativo de métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 2, p. 84-95, 2013.
- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.
- BAUTISTA, F.; BAUTISTA, D.; DELGADO-CARRANZA, C. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. **Atmósfera**. Mexico City, v. 22, n. 4, p. 331-348, 2009.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions. **Catena**, United Kingdom, v. 86, n. 3, p. 160-171, 2011.
- BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na Campanha Gaúcha, Brasil. **Revista Brasileira Fruticultura**, Jaboticabal, v. 36, n. 4, p. 780-793, 2010.

CAMARGO, A. P.; 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.

COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comportamento dos diferentes métodos de determinação da evapotranspiração de referência nas cinco regiões brasileiras. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 5, p. 310-319, 2015.

DA ROCHA, I. P.; DA SILVA LIMA, N.; CHAGAS, R. M.; DE ALMEIDA, G. L. P. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Garanhuns, PE. **Revista Geama**, Recife, v. 2, n. 1, p. 25-40, 2016.

DA SILVA, A. P. N.; DE SOUZA, L. R. Estimativa de evapotranspiração de referência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 4, p. 3-22, 2011.

DA SILVA, M. G.; ARRAES, F. D. D.; LEDO, E. R. F.; SANTOS, N. T.; FILHO, J. A. da S. Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos mínimos no sertão do Ceará. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 7, n. 3, p. 284-293, 2013.

FAUSTO, M. A.; SANTOS, A. C. A.; SILVA, H.; JÚNIOR, J. H. C.; LOBO, F. A. Componentes do balanço de energia estimados por meio do método da razão de bowen em um pomar de caju. **AMBIÊNCIA**, Guarapuava, v. 12, n. 1, p. 119-126, 2016.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 2, p. 246-255, 2012.

FERRONATO, A.; CHIG, L. A.; GOULART, D. B.; JÚNIO, J. H. C.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Santo Antônio do Leverger-MT. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 14, n. 1, p. 110-118, 2016.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 01, n. 02, p. 96-99, 1985.

INCAPER. **Planejamento e programação de ações para Santa Teresa**: programa de assistência técnica e extensão rural PROATER. Santa Teresa: Secretaria de Agricultura, 2011.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal off the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York. v. 89, p. 15-41, 1965.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, F. A. L.; MACÊDO, K. G.. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 447, 2016.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

MAKKINK, G. F. Ekzamenno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Amsterdam, v.5, n. 1, p. 209-305, 1957.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 196-202, 2010.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F., ANDRE, R. G. B., BERNARDO, S. Coeficientes do tanque classe A para a estimativa da evapotranspiração de referência em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 123-128, 2006.

MENDONÇA, J. C.; DOS SANTOS ESTEVES, B.; DE SOUSA, E. F. Reference Evapotranspiration (ET₀) in North Fluminense, Rio de Janeiro, Brazil. In: ALEXANDRIS, S. G.; STICEVIC, R. **Evapotranspiration: An Overview**. Croácia: Intech, 2013. p. 259-276.

PAIVA, C. M. S.; PINHEIRO, A. S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 39, n. 1, p. 42-51, 2016.

PENMAN, H. L. *Vegetation and Hydrology*. Farnham Royal: Commonwealth Agric. Bureaux, 1963.. 124 p. (Tech. Commun., 53).

PEIXOTO, T. D. C.; LEVIEN, S. L. A.; BEZERRA, A. H. F.; SOBRINHO, J. E. Avaliação de diferentes metodologias de estimativa da ET₀ baseadas no tanque classe A, em Mossoró, RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 2, p. 58-65, 2014.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

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.

SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; DA CUNHA, F. F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. **Revista De Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 13, n. 2, p. 19-31, 2016.

TANAKA, A. A.; DE SOUZA, A. P.; KLAR, A. E.; DA SILVA, A. C.; GOMES, A. W. A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 91-104, 2016.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2005.

VILLA NOVA, N. A.; MIRANDA, J. H.; PEREIRA, A. B.; SILVA, K. O. Estimation of the potential Evapotranspiration by a Simplified Penman Method. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 713-721, 2006.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. ; ACERBI Jr, F. W.; SILVA, A. M.. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuroca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, 8995-9005, 1985.

ZAPPA, M.; GURTZ, J. The spatial resolution of physiographic data as sensitive variable for distributed hydrological simulations in prealpine and alpine catchments. **Water Resources and Environment Research**, Zürich, v. 1, p. 101-105, 2002.

ZHANG, H. G.; FU, S. H.; FANG, W. H.; IMURA, H.; ZHANG, X. C. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 911-918, 2007.