

## AJUSTE DOS COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA SÃO MATEUS, ES

**RAMON AMARO DE SALES<sup>1</sup>; EVANDRO CHAVES DE OLIVEIRA<sup>2</sup>; MARCUS JOSÉ ALVES LIMA<sup>3</sup>; EDUARDO MONTEIRO GELCER<sup>4</sup>; ROBSON ARGOLO DOS SANTOS<sup>5</sup> E CÁSSIO FURTADO LIMA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal do Espírito Santo, CEP: 29500-000, Alegre-ES, E-mail: [ramonamarodesales@gmail.com](mailto:ramonamarodesales@gmail.com);

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo Campus Itapina, CEP 29709-910, Colatina-ES, E-mail: [echoliveira@gmail.com](mailto:echoliveira@gmail.com); [cassio.engenhariaflorestal@yahoo.com.br](mailto:cassio.engenhariaflorestal@yahoo.com.br);

<sup>3</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Capitão Poço, CEP 66077-530, Belém-PA, E-mail: [marcuslima01@yahoo.com.br](mailto:marcuslima01@yahoo.com.br);

<sup>4</sup>University of Florida, Department of Agricultural and Biological Engineering, Gainesville, Florida, 32608 - United States. E-mail: [egelcer@ufl.edu](mailto:egelcer@ufl.edu);

<sup>5</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa-MG, E-mail: [argolo.agro@gmail.com](mailto:argolo.agro@gmail.com).

### 1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi ajustar métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência em escala diária para a região de São Mateus, ES, através de dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia. Para tanto, foi utilizado uma série histórica de 15 anos (2000 – 2015), sendo que os primeiros 14 anos foram considerados para ajustar os parâmetros e ao ano de 2015 foram atribuídos dados independentes para validação dos ajustes. O método FAO-56 PM foi referência para a avaliação dos demais métodos, dentre eles: Priestley-Taylor, Tanner-Pelton, Turc, Jensen-Haise, Makkink, Camargo, Hamon, Hargreaves e Samani, Linacre e Benevides Lopes. O desempenho dos métodos foi analisado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice de concordância de Willmott (d), raiz do erro quadrático médio normalizado (RMSEn) e soma do erro absoluto (SEA). Os resultados obtidos mostraram que os métodos que utilizaram a radiação solar como variável preditora foram mais precisos que aqueles que utilizaram somente temperatura e/ou umidade relativa do ar. Os métodos de maior desempenho foram Turc, Jensen e Haise, Priestley e Taylor, Tanner e Pelton e Makkink, os quais apresentaram valores de RMSEn variando entre 3 – 5% e d igual a 0,99, enquanto os demais apresentaram RMSEn de 21 – 29% e d inferior a 0,81, mesmo após o ajuste.

**Palavras-chave:** Penman-Monteith-FAO, irrigação, necessidade hídrica, meteorologia agrícola

**SALES, R. A.; OLIVEIRA, E. C.; LIMA, M. J. A.; GELCER, E. M.; SANTOS, R. A.; LIMA, C. F.**

**ADJUSTMENT OF COEFFICIENTS OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE EQUATIONS FOR SÃO MATEUS, ES**

## 2 ABSTRACT

The objective of this work was to adjust empirical methods to estimate reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) at daily scale for São Mateus, ES region by using weather data from the National Institute of Meteorology. Fifteen years of data (2000 – 2015) were used, with the first 14 years used to adjust parameters and independent data were assigned to the year 2015 to validate the adjustments. The FAO-56 PM method was the reference to evaluate the other ones: Priestley-Taylor, Tanner-Pelton, Turc, Jensen-Haise, Makkink, Camargo, Hamon, Hargreaves the Samani, Linacre the Benevides Lopes. The performance of the methods was analyzed by the coefficient of determination (R<sup>2</sup>), index of Willmott (d), normalized root mean squared error (RMSE<sub>n</sub>) and absolute error of the sum (SEA). The results obtained demonstrated that the methods using solar radiation as predictor variable were more accurate than those in which only temperature and/or relative humidity of the air were used. The methods with better performance were Turc, Jensen-Haise, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton, and Makkink, which presented values of RMSE<sub>n</sub> varying between 3 – 5% and d equal to 0.99, while the others presented RMSE<sub>n</sub> of 21 – 29% and d lower than 0.81, even after adjustment.

**Keywords:** Penman – Monteith - FAO, irrigation, water need, agricultural meteorology

## 3 INTRODUÇÃO

O constante crescimento populacional traz preocupações unânimes quanto ao consumo dos recursos hídricos, seja de forma direta ou indireta, o que leva à adoção de medidas cautelosas quanto ao uso deste recurso natural que pode ser esgotável. O estudo sobre a distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica de uma região é de extrema importância, pois possibilita o estabelecimento de diretrizes para a implantação de políticas de planejamento que venham a contribuir para um uso racional dos recursos hídricos disponíveis (SILVA et al., 2015).

Diversos autores têm estudado a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), a fim de estimá-la com acurácia, por meio de métodos simples (HARGREAVES e ALLEN, 2003; GAVILÁN et al., 2006; TRAJKOVIC, 2007; FOOLADMAND et al., 2008; GELCER et al., 2010). A razão dessa intensa busca está associada ao fato de a evapotranspiração ser indispensável ao cálculo do balanço hídrico do solo, além de que a confiabilidade de tal informação tenha grande importância para estimativa da evapotranspiração das culturas, possibilitando um manejo mais eficiente da irrigação (FERNANDES et al., 2012; SALES et al., 2016).

Atualmente, a equação de Penman-Monteith, parametrizada pela FAO 56 (PM-FAO56) tem sido o método que melhor representa os fatores físicos e fisiológicos que governam o processo de evapotranspiração de referência, sendo então considerado pela FAO como método padrão (BEZERRA et al., 2010; SOUZA et al., 2011; CARVALHO et al., 2015). No entanto, conforme Tanaka et al. (2016), sua aplicação ainda exige muitos parâmetros, os quais na maioria das vezes não estão disponíveis nas estações meteorológicas devido à ausência de sensores ou à baixa qualidade dos dados disponíveis.

Neste caso, diversos estudos têm utilizado o PM-FAO56 para avaliar métodos alternativos, a fim de satisfazer certas localidades que apresentam restrição à obtenção de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1994 a, b). Tais métodos (alternativos ou simplificados) visam estimar a ET<sub>o</sub> de maneira aprimorada, utilizando um número cada vez menor de variáveis meteorológicas no modelo (CARVALHO et al., 2011).

Entretanto, a utilização de tais métodos está atrelada a realização de calibrações locais e/ou regionais, nas quais parâmetros estatísticos que medem a precisão e exatidão das estimativas são utilizados para identificar qual o método empírico que melhor se adequa à disponibilidade local de dados meteorológicos (TAGLIAFERRE et al., 2010; CARVALHO et al., 2011; SOUZA et al., 2011; CARVALHO et al., 2015).

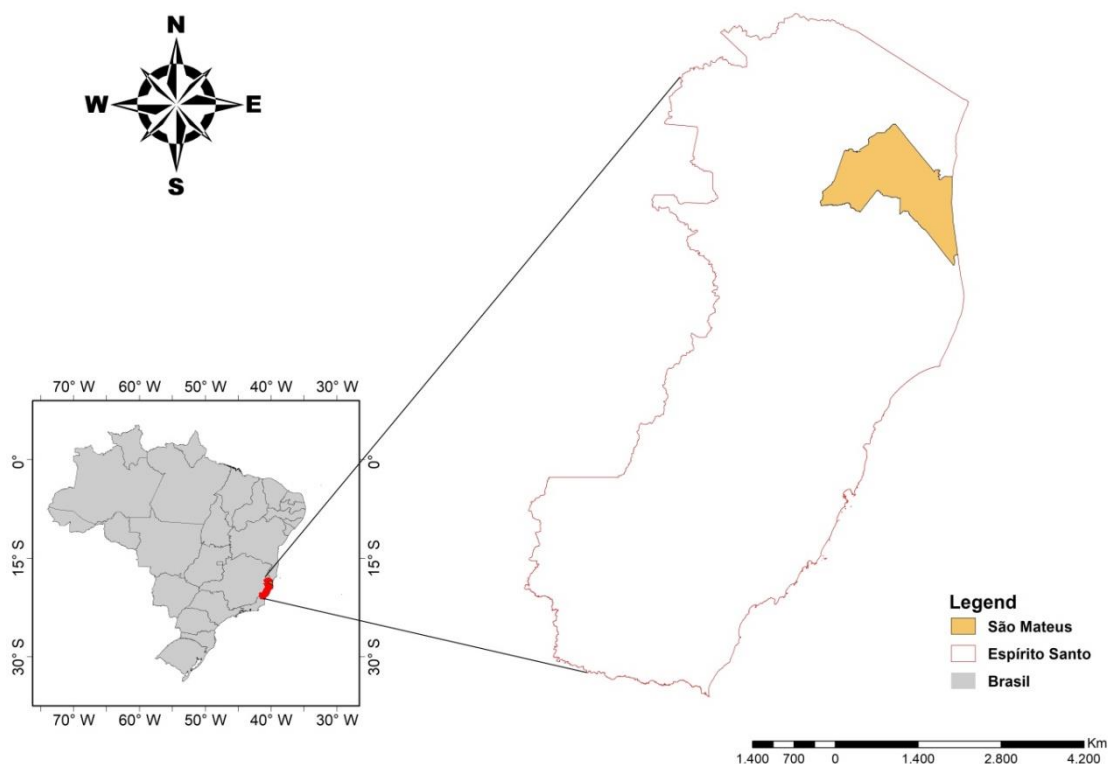
Assim, este estudo teve por objetivo avaliar e calibrar dez modelos, por meio de ajuste de seus coeficientes empíricos, para estimar a ETo diária comparando o valor de ETo dos modelos à ETo calculada pelo método PM- FAO56 para a região de São Mateus, ES.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Para este estudo, foram utilizados dados meteorológicos diários obtidos de uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de São Mateus - ES (Lat.  $-18^{\circ}57'$ ; Long.  $39^{\circ}50'$ ) e situada a 39 metros acima do nível do mar. O clima do município de São Mateus é do tipo Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão (PEEL et al. 2007). A Figura 1 apresenta o estado do Espírito Santo, com destaque para o município de São Mateus, área objeto de estudo.

**Figura 1.** Localização geográfica do estado do Espírito Santo, com destaque para o município de São Mateus.



**Fonte:** Sales et al. (2018)

## 4.2 Métodos de ETo utilizados

A ETo foi estimada por dez métodos alternativos (Tabela 1) e comparada com a ETo definida pela equação da PM-FAO56. O período de coleta dos dados compreendeu os anos de 2000 a 2015. As variáveis meteorológicas utilizadas neste estudo foram: temperatura do ar máxima e mínima, radiação solar global e umidade relativa a 2 metros do nível do solo e velocidade do vento a 10 metros do nível do solo.

Antes das estimativas de ETo, foi feita uma análise de qualidade dos dados para eliminar possíveis erros de medição. Desta forma os dados inconsistentes foram eliminados de acordo com os seguintes critérios: temperatura máxima acima de 50 °C; temperatura mínima inferior a 0 °C; temperatura máxima menor que a temperatura mínima para o mesmo dia; a radiação solar global igual a zero e radiação solar global maior que a radiação solar extraterrestre. Após estas análises restaram 5113 dias com observações consistentes, valor correspondente a 87,44% dos dados.

Na sequência, a ETo foi determinada pelos 10 métodos analisados neste estudo (Tabela 1), sendo que, o período entre 2000 e 2014 foi utilizado para ajustar os parâmetros das referidas equações, enquanto que, ao ano de 2015 foram atribuídos dados independentes para validar tais parâmetros modificados. O ajuste dos parâmetros foi realizado pela minimização da soma de quadrado do erro obtido, pela comparação da ETo estimada pelos métodos alternativos e pelo método padrão PM-FAO56, utilizando a ativação do Solver dentro do software Microsoft Office Excel 2007<sup>®</sup>, além do auxílio do programa de código aberto R (*R core team*, 2016).

**Tabela 1.** Métodos de estimativa de evapotranspiração de referência avaliados e suas respectivas equações e coeficientes originais.

Métodos	Equações de estimativa da ETo	Variáveis
Penman-Monteith (PM), Allen et al, 1998	$E_{To} = \frac{0,408 \times (R_n - G) + \gamma \times \left( \frac{900}{T_m + 273} \right) \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)}$	T <sub>m</sub> ; R <sub>g</sub> ; UR; U
Priestley e Taylor (PT), 1972	$E_{To} = A \times \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times \left( \frac{R_n - G}{2,45} \right)$	T <sub>m</sub> ; R <sub>g</sub> .
Tanner-Pelton (TP), 1960	$E_{To} = \frac{A \times R_n}{2,45 - B}$	T <sub>m</sub> ; R <sub>g</sub> .
Turc (Tc), 1955	$E_{To} = A \times \frac{T_x}{T_x + B} \times (C + R_g \times 23,88)$	T <sub>x</sub> ; R <sub>g</sub>
Jensen-Haise (JH), 1963	$E_{To} = A \times \frac{R_g}{2,45} \times (A \times T_m + B)$	T <sub>m</sub> ; R <sub>g</sub> .
Makkink (Mk), 1957	$E_{To} = A \times \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times \left( \frac{R_g}{2,45} \right) - B$	R <sub>g</sub>
Camargo (Ca), 1971	$E_{To} = A \times \frac{R_g}{2,45} \times T_m$	T <sub>m</sub>
Hamon (Ho), 1961	$E_{To} = A \times \left( \frac{N}{12} \right)^2 \times \left( \frac{B \times \exp^{(C \times T_m)}}{100} \right) \times D$	T <sub>m</sub>
Hargreaves e Samani (HS), 1985	$E_{To} = A \times \frac{R_a}{2,45} \times (T_x - T_n)^{0,5} \times (T_m + B)$	T <sub>x</sub> ; T <sub>n</sub> ; T <sub>m</sub>
Linacre (Li), 1977	$E_{To} = \frac{A \times \frac{T_m}{100 - Lat} + B \times (T_m - T_o)}{C - T_m}$	T <sub>m</sub> ; UR
Benevides-Lopes (BL), 1970	$E_{To} = A \times 10 \left[ \frac{7,5 \times T_m}{237,3 + T_m} \right] \times (1 - 0,01 \times UR) + B \times T_m - C$	T <sub>m</sub> ; UR

E<sub>To</sub>: evapotranspiração de referência (mm.dia<sup>-1</sup>); T<sub>x</sub>, T<sub>n</sub>, T<sub>m</sub> e T<sub>o</sub> representam respectivamente a temperatura máxima, mínima, média e do ponto de orvalho, todas em °C; R<sub>g</sub> é a radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); U<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura (ms<sup>-1</sup>); UR é a umidade relativa (%); Δ é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C<sup>-1</sup>); γ a constante psicrométrica (0,0662 kPa °C<sup>-1</sup>); e<sub>a</sub> é a pressão de vapor do ar (kPa °C<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> que é a pressão de saturação à temperatura da superfície (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>a</sub> é a radiação solar na ausência de atmosfera (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); Lat a latitude; e G a densidade de fluxo de calor no solo (MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>), considerada zero para estimar de E<sub>To</sub> diária. **Fonte:** Sales et al. (2018)

### 4.3 Análise estatística

A qualidade dos ajustes e o desempenho dos métodos alternativos de E<sub>To</sub> foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), a raiz do erro quadrático médio normalizado (RMSEn em %), como sugerido por Loague e Green (1991), soma do erro absoluto (SEA) e o índice de concordância de Willmott (WILLMOTT et al., 1985) (d).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 abaixo informa os valores dos coeficientes originais e os coeficientes ajustados para a região em estudo a fim de satisfazer as necessidades locais.

**Tabela 2.** Valores dos parâmetros originais e ajustados para as equações comparados no estudo

Métodos	Originais				Ajustados			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Penman Monteith (FAO-56 PM)								
Priestley e Taylor (PT)	1,26				0,79			
Tanner-Pelton (TP)	1,12	0,11			0,75	0,108		
Turc (Tc)	0,013	15	50		0,016	21,27	44,14	
Jensen-Haise (JH)	0,025	0,08			0,005	0,48		
Makkink (Mk)	0,61	0,12			0,61	0,0		
Benevides-Lopes (BL)	1,21	0,21	2,3		2,57	0,18	2,6	
Hamon (Ho)	0,55	4,93	0,062	25,4	0,64	5,72	0,06	29,5
Hargreaves e Samani (HS)	0,002	17,8			0,003	5,59		
Camargo (Ca)	0,01				0,013			
Linacre (Li)	500	15	80		107,5	11,8	44,1	

Fonte: Sales et al. (2018)

A Tabela 3 apresenta a avaliação da ETo em ordem crescente de  $R^2$ . Foi verificado que as estimativas de evapotranspiração obtidas pelos métodos de Tc, JH, PT e TP, os quais levam em conta valores de Rg e temperatura do ar, foram fortemente correlacionadas com a ETo estimada por PM-FAO56, apresentando  $R^2 \geq 0,98$ . Porém, todos esses métodos apresentaram RMSEn maior e d menor do que do método Mk. Por isso, o método de Mk foi mais eficiente, pois apresentou  $R^2$  igual a 0,98 utilizando apenas a Rg como variável independente, seguido pelo método de Tc. Tal resultado pode estar atrelado às condições ambientais da área em estudo, visto que o método de Mk é recomendado para regiões com clima úmido, enquanto que o método de Tc foi desenvolvido no oeste europeu, apresentando como vantagem a boa capacidade de estimativa para regiões costeiras e úmidas (FERNANDES et al., 2010).

Os métodos de BL e Li apresentaram valores de  $R^2$  iguais a 0,59 e 0,51, respectivamente. Tais métodos utilizam a Tm e UR como variáveis de entrada, enquanto que os métodos de HS, Ho e Ca estimam a ETo somente em função da temperatura. Nesta condição, o  $R^2$  variou entre 0,29 e 0,47. Portanto, ficou evidente a potencialidade dos métodos que utilizam a Tm e UR, considerando que elevado  $R^2$  garante bons ajustes, capazes de reduzir consideravelmente os erros.

Alguns métodos como o de HS foram desenvolvidos para condições semi-áridas na Califórnia, por isso tendem a superestimar ETo em climas úmidos (SENTELHAS et al., 2010; TRAJKOVIC e KOLAKOVIC, 2009). O mesmo foi observado também por Gelcer et al. (2010), no sul da Flórida, cuja classificação climática é caracterizada pelos autores como clima tropical úmido, obtendo-se valores de  $R^2 = 0,38$ . Deste modo, a estação chuvosa, que é bem definida em São Mateus, pode ter influenciado para os baixos valores de  $R^2$  obtidos com esse método.

No entanto, somente a utilização do  $R^2$  como critério de definição da qualidade de métodos não é adequada, pois não estabelece a magnitude das diferenças entre um valor padrão e um valor previsto por modelos empíricos (BARROS et al., 2009).

**Tabela 3.** Avaliação das estimativas de ETo (mm dia<sup>-1</sup>) obtidas com diferentes métodos em relação ao método padrão, FAO-56 PM, antes (original) e após o ajuste (ajustado) dos parâmetros.

Métodos	Original			Ajustado			Dif <sub>RMSEn</sub> %	Dif <sub>d</sub>
	R <sup>2</sup>	RMSEn	d	R <sup>2</sup>	RMSEn	d		
Tc	0,99	8,33	0,98	0,99	3,67	0,99	55,94	1,38
JH	0,98	23,63	0,92	0,99	4,34	0,99	81,65	8,58
PT	0,98	63,52	0,66	0,98	4,65	0,99	92,69	50,44
TP	0,98	52,15	0,73	0,98	4,65	0,99	91,08	37,03
Mk	0,98	5,26	0,99	0,98	4,65	0,99	11,46	0,13
BL	0,55	25,2	0,74	0,59	21,64	0,86	14,12	15,64
Li	0,49	26,19	0,67	0,51	23,72	0,82	9,43	20,91
HS	0,47	32,09	0,67	0,47	24,59	0,81	23,38	20,7
Ho	0,31	39,39	0,57	0,31	28,22	0,71	28,36	24,91
Ca	0,29	36,88	0,58	0,29	28,98	0,71	21,42	23,84

RMSEn: raiz do erro quadrático médio normalizado; d: Coeficiente de Concordância; R<sup>2</sup>: Coeficiente de Determinação.  $Dif_{RMSEn} = ((RMSEn_{orig} - RMSEn_{aju}) / RMSEn_{orig}) \times 100$  e  $Dif_d = ((d_{aju} - d_{orig}) / d_{orig}) \times 100$ . **Fonte:** Sales et al. (2018)

Estudos realizados em Mato Grosso do Sul (RIGONI et al., 2013) mostraram que os métodos não baseados em radiação solar apresentaram baixo coeficiente de determinação R<sup>2</sup>, confirmando estes resultados. Segundo os autores, os métodos JH, Tc, Mk, PT e RS obtiveram altos valores de R<sup>2</sup> por estarem fortemente ligados ao uso do parâmetro de radiação solar no modelo, sendo este o componente que mais se associa ao fenômeno de evaporação da água. Pandey et al. (2016) corroboram o exposto, no qual concluem que o desempenho superior de modelos de radiação está baseado no fato de que temperaturas extremas e radiação são os fatores dominantes para conduzir ETo.

Após o ajuste dos parâmetros, os métodos Tc, JH, PT, TP e Mk tiveram os erros (RMSEn) de suas estimativas reduzidos de 11 a 93% (Dif<sub>RMSEn</sub>). Embora o método de PT seja uma versão simplificada do método de PM-FAO56 ele foi o mais beneficiado pelo ajuste, pois, utilizando os parâmetros ajustados, este método apresentou um erro de 4,65% (Dif<sub>RMSEn</sub>) e índice de concordância de 0,99 (d). Em outras palavras, o ajuste reduziu o erro em mais de 92% e ampliou índice d em 50%. Isso indica que não se deve utilizar tal método indiscriminadamente para qualquer região, sem o devido ajuste dos parâmetros. Os autores Tabari e Talaei (2011) obtiveram resultados satisfatórios com o ajuste do modelo PT para a estimativa de ETo no Irã, no qual a calibração resultou na diminuição dos valores de RMSE de 2,55 para 0,49 mm dia<sup>-1</sup> em clima árido e de 1,59 para 0,66 mm ano<sup>-1</sup> em clima frio quando comparada ao método de FAO-56.

O método de Mk foi o mais adequado para região estudada, uma vez que apresentou o menor RMSEn e o ajuste dos parâmetros reduziu levemente os erros (Dif<sub>RMSEn</sub> < 12%) e aumentou os valores de d em menos de 0,2%. Ressalte-se que o método de Mk pode ser utilizado diretamente (parâmetros originais) para região de estudo, pois não apresenta grandes erros de estimativa e tem a vantagem de usar somente uma variável meteorológica, a Rg. Os autores Araújo et al. (2010) avaliaram o método de Makkink em cinco escalas de tempo, para o município de Alegre, ES, e o modelo mostrou-se altamente eficiente independentemente da escala avaliada.

Os métodos que utilizam somente a  $T_m$  e UR, como BL e Li apresentaram, após o ajuste, valores de RSMEn iguais a 21,6% e 23,7%, respectivamente, erros relativamente altos quando comparados aos métodos que utilizam a  $R_g$ . Entretanto, os elevados valores de  $d$  (0,86 e 0,82) indicam que somente alguns pares de dados apresentam erros mais discrepantes, evidenciando que tais métodos perdem eficiência em alguma época do ano e que talvez uma subdivisão dos dados pudesse apresentar erros menores, por exemplo, ajustar os parâmetros para o período chuvoso e período seco ou para verão e inverno, como feito por Gelcer et al. (2010).

Outros autores confirmam estes resultados, Brixner, Schöffel e Tonietto (2014) ao determinarem a evapotranspiração por diferentes métodos na Campanha Gaúcha, onde obtiveram um mau desempenho pelo método Li em escala diária, sendo que tal efeito pode estar atrelado ao fato de o método ter sido desenvolvido para estimar a  $E_{To}$  mensal (CARVALHO et al., 2011), e não em escala diária, conforme calculado. No entanto, Araújo et al. (2010) observou que para o município de Campos Sales, CE, os métodos BL e Li apresentaram bons resultados, com desempenho classificado como muito bom e ótimo quando utilizados em escalas mensais.

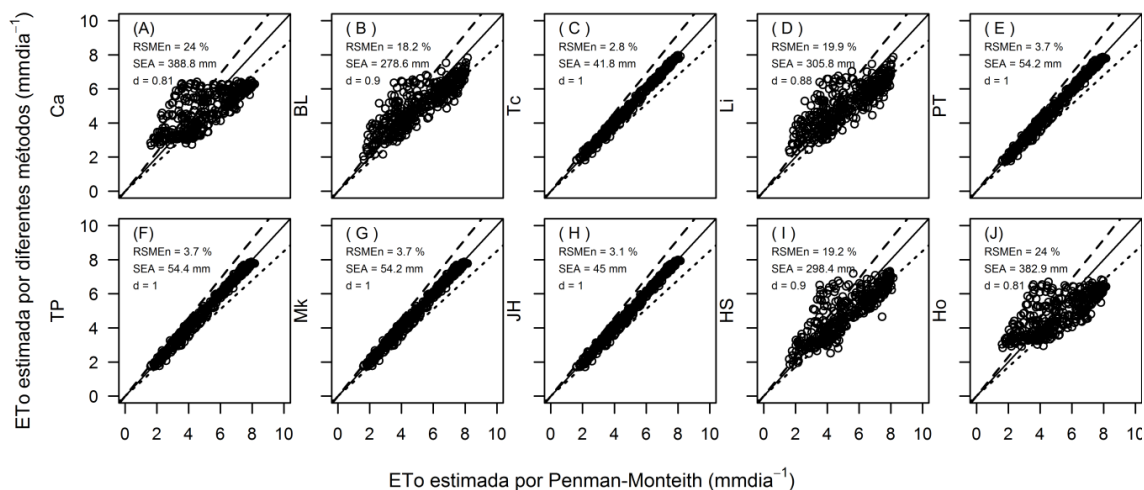
Por fim, os métodos de HS, Ha e Ca, os quais utilizam somente valores de temperatura do ar como variável independente, se mostraram os menos eficientes, apresentando valores de RSMEn de 24,6%, 28,2% e 29,0%, respectivamente, mesmo após a calibração. Lu et al. (2005), ao avaliarem a evapotranspiração potencial de métodos baseados em temperatura e radiação no sudeste dos EUA, perceberam que os métodos que se baseavam em temperatura apresentavam maiores diferenças. Os autores Silva et al. (2015) também obtiveram resultados ruins com o método HS em regiões litorâneas. Além disso, outros autores já vem mencionando resultados ruins em métodos que se baseiam em temperatura (FANAYA JÚNIOR et al., 2012; SANTOS et al., 2017), sendo que a baixa variação na temperatura é apontada como principal causa.

Ao aplicar os métodos de  $E_{To}$ , com parâmetros ajustados nestes estudo (Figura 2), para uma série de dados climáticos independentes, foi observado que todos eles apresentaram erros (RMSEn) inferiores a 25%, entretanto ficou evidente a existência de três categorias quanto a precisão e exatidão das estimativas.

Os métodos de Ca e Ho destacaram-se entre os métodos menos precisos apresentando RMSEn e índice de concordância ( $d$ ) igual a 24% e 0,81%, respectivamente, enquanto que a soma do erro absoluto ao longo do ano de 2015 (SEA) variou entre 283 e 389 mm. Ambos os métodos apresentaram padrões de dispersão semelhantes, ou seja, subestimaram valores altos e superestimaram valores baixos de  $E_{To}$ , mantendo um percentual entre 32 e 37% de suas estimativas dentro de uma faixa de  $\pm 15\%$  (Figura 2, A-J).



**Figura 2.** Correlações entre a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) diária, estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO) e pelos modelos simplificados (Ca, BL, Tc, Li, PT, TP, Mk, JH, HS e Ho) durante o ano de 2015 (dados independentes não utilizados na calibração) em São Mateus, ES. O RMSEn representa a raiz do erro quadrático médio normalizado, SEA é a soma do erro absoluto e d é o índice de concordância de Willmott. As linhas tracejadas referem-se  $\pm 15\%$  de super e subestimativa enquanto que a linha cheia corresponde a linha 1:1.



**Fonte:** Sales et al. (2018)

Os métodos de BL, Li e HS apresentaram um grau intermediário de precisão, nos quais o RMSEn variou entre 18 e 20 % e a SEA foi levemente menor (279 – 306 mm) que os métodos anteriores, considerados menos precisos (Ca e Ho). A dispersão das estimativas apresentou um padrão mais linear e próximo da linha 1:1, com valores de d variando entre 0,88 e 0,90. Conseqüentemente, o percentual de estimativas dentro da faixa de  $\pm 15\%$  foi aumentado para 52 – 58% (Figura 2, B-D-I).

Dentre os métodos de ET<sub>o</sub> utilizados neste estudo, destacam-se os de Tc, PT, TP, Mk e JH. Os mesmos são considerados altamente precisos a julgar pelos valores de RMSEn variando de 2 – 4%, bem como a baixa SEA de 41 – 55 mm. Isso significa um erro médio, inferior a 0,15 mm dia<sup>-1</sup>. A análise de regressão mostrou uma dispersão bastante homogênea ao longo da linha 1:1, com mais de 95 % das estimativas dentro da faixa de  $\pm 15\%$ , o que pode ser evidenciado tanto graficamente (Figura 2), como pelos elevados valores de d, muito próximos da unidade.

Tais observações indicam que as variações climáticas sazonais nesta parte do Estado do Espírito Santo não alteram a precisão desses métodos (Figura 2 C-E-F-G-H). Diversos autores evidenciaram resultados similares, nos quais a comparação entre valores estimados de ET<sub>o</sub> por métodos que utilizam a radiação solar incidente, na grande maioria, apresentam desempenhos superiores aos que utilizam a temperatura do ar (CONCEIÇÃO e MANDELLI 2005; MENDONÇA e DANTAS 2010).

## 6 CONCLUSÕES

1 Os modelos com menor precisão foram aqueles que utilizaram a temperatura média como única variável preditora, sendo representados pelos métodos de Camargo e Hamon.

2 Os métodos de Turc, Priestley e Taylor, Tanner e Pelton, Makkink e Jensen e Haise se mostraram altamente robustos, pois mantiveram a boa precisão de suas estimativas independentemente da variabilidade meteorológica.

3 Dentre os métodos que utilizaram temperatura do ar, o método de Benevides e Lopes foi o que apresentou menores valores de RMSEn e SEA, com respectivos valores de 18 % e 278 mm dia<sup>-1</sup>.

4 A utilização das equações ajustadas para São Mateus se mostrou uma alternativa viável para maior predição da estimativa da evapotranspiração de referência diária em que a disponibilidade de dados meteorológicos é limitada.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFES e ao CNPq pela bolsa de estudos concedida para a realização da pesquisa e também ao e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pela disponibilidade dos dados meteorológicos.

## 8 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage paper, 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, p. 297, 1998.

ALLEN, R. G., SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S. An update for the definition of reference evaporation. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994a.

ALLEN, R.G., SMITH, M.; PEREIRA, L. S; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 35-92, 1994b.

ARAÚJO, E. M.; OLIVEIRA, J. B.; ARAÚJO, E. M.; LEDO, E. R. F.; SILVA, M. G. Desempenho de métodos de estimativa de ETo correlacionados com a equação padrão Penman Monteith FAO56, em cidades do estado do Ceará. **Acta Tecnológica**, Iguatu, v. 5, n. 2, p. 84-101, 2010.

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BENEVIDES, J. G.; LOPEZ, D. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S), **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

BEZERRA, J. R. C.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; DIAS, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marrom, irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 625-632, 2010.

- BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determination of the evapotranspiration by different methods and its application in the dryness index in the Campanha Gaucha Region, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 36 n. 4, p. 780-793, 2014.
- CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. 3ª ed., Campinas, IAC. 24 p. 1971. (Boletim 116).
- CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.
- CARVALHO, D. F.; ROCHA, H. S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.
- 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.
- FANAYA JÚNIOR, E. D.; SILVA LOPES, A.; 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.
- FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos. **Embrapa Arroz e Feijão**, Santo Antônio de Goiás, GO, p. 44. 2010.
- FERNANDES, J. L.; OLIVEIRA, J. B. D.; SOUZA, A. L. M. D.; SILVA, G. S. D.; IZIDIO, N. S. D. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Campos Sales-CE. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v. 6, n. 3, p. 58-67, 2012.
- FOOLADMAND, H. R.; ZANDILAK, H.; RAVANAN, M. H. Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 54, n. 3, p. 321-330, 2008.
- GAVILÁN, P.; LORITE, I. J.; TORNERO, S.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, n. 3, p. 257-281, 2006.
- GELCER, E. M.; FRAISSE, C. W.; SENTELHAS, P. C. Evaluation of methodologies to estimate reference evapotranspiration in Florida. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Madison, v. 123, p. 189-195, 2010.
- HAMON, W. R. "Estimating Potential Evapotranspiration." **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 87, n. 3, p. 107-120, 1961.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 1, n. 2. p. 96-99, 1985.

HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 129, n. 53, p. 53-63, 2003.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation Drainage Division**, American Society of Civil Engineers, Reston, v. 89, n. 1, p. 15-41, 1963.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature alone. **Agricultural Meteorology**, v. 18, p. 409-429, 1977.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 7, p. 51-73, 1991.

LU, J.; SUN, G.; MCNULTY, S. G.; AMATYA, D. M. A. Comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 41, n. 3, p. 621-633, 2005.

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.5, p. 290-305, 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, p. 196-202, 2010.

PANDEY, P. K.; DABRAL, P. P.; PANDEY, V. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 4, n. 1, p. 56-67, 2016.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, p. 81-92, 1972.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 20 Jan 2017.

RIGONI, E. R.; OLIVEIRA, G.; BISCARO, G. A.; QUEIRÓZ, M.; LOPES, A. Desempenho sazonal da evapotranspiração de referência em Aquidauana, MS. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 6, p. 547-572, 2013.

- SALES, R. A.; LOUZADA, J. M.; OLIVEIRA, E. C.; PINEIRO, M. A. B.; SALES, R. A. Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus-ES. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 13 n. 23, p. 598-609, 2016.
- SANTOS, R. A.; SANTOS, E. P.; SALES, R. A.; SANTOS, R. L. Estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Feira de Santana (BA). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 4, p. 1617-1626, 2017.
- SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.
- SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. D. S.; CARMO, F. F.; LÊDO, E. R. F.; FILHO, J. A. S. Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de hargreaves-samani no estado do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 9, n. 2, p. 132-141, 2015.
- SOUZA, A. P.; CARVALHO, D. F.; SILVA, L. B. D.; ALMEIDA, F. T.; ROCHA, H. S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 3, p. 219-228, 2011.
- TABARI, H.; TALAEI, P. H. Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 10, p. 837-845, 2011.
- TANAKA, A. A.; DE SOUZA, A. P.; KLAR, A. E.; 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.
- TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.A. de J.; ROCHA, F.A.; SANTOS, L. da C.; SILVA, C. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.
- TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 65, p. 3391-3403, 1960.
- TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 133, n. 1, p. 38-42, 2007.
- TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resources Management**, v. 23, n. 14, p. 3057, 2009.
- TURC, L. Le bilan d'eau des sols: Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 6, p. 5-131, 1955.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluations and comparisons of models. **Journal of Geophysical**, Ottawa, v. 90, n. 65. p. 8995-9005, 1985.