

AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MODELO DE HARGREAVES E SAMANI PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM ESCALA DIÁRIA PARA MACEIÓ-AL

Kleber Gomes Macêdo¹, Francisco Dirceu Duarte Arraes², Juarez Cassiano Lima Junior³,
Willame Candido Oliveira⁴, Yara Rodrigues Araujo⁴

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi ajustar o modelo de Hargreaves e Samani de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições da cidade de Maceió, Alagoas. Foram utilizados dados meteorológicos de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar global. Os ajustes realizados foram comparados com o modelo padrão Penman Monteith, utilizando os índices estatísticos erro padrão de estimativa, índice de Willmont e coeficiente de correlação (r), e o desempenho foi avaliado utilizando o índice “c”. De acordo com os índices estatísticos o ajuste que obteve a melhor estimativa foi o com três parâmetros calibrados. Os ajustes de um e dois parâmetros apresentaram desempenho semelhante.

Palavras-chave: temperatura do ar, Penman Monteith, radiação solar.

ADJUSTMENT OF PARAMETERS OF THE HARGREAVES AND SAMANI EQUATION FOR ESTIMATE OF THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION AT DIARY SCALE FOR MACEIÓ-AL

ABSTRACT

The objective of this work was to adjust the model of Hargreaves and Samani estimation of reference evapotranspiration for the conditions of the city of Maceio-AL. Were used meteorological data of air temperature, wind speed, relative humidity and solar radiation. The adjustments made were compared with the standard model Penman Monteith FAO 56, using statistical indices estimate of standard error (EPE), Willmont index, correlation coefficient (r), and the performance was evaluated using the “c” index. According to the statistical indices adjustment that got the best estimate was three calibrated parameters. The settings of one and two parameters showed similar performance.

Keywords: air temperature, Penman Monteith, solar radiation.

¹ Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, e-mail: kleber117@hotmail.com

² Doutor em Agronomia, Professor do Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia Sertão Pernambucano, e-mail: dirceuarraes@gmail.com

³ Mestrando em Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará, e-mail: limajr.soil@gmail.com

⁴ Graduando em Tecnologia de Irrigação e Drenagem, Instituto Federal Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, e-mail: willamecandidoo@gmail.com; yaraaraujo20@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é um dos principais fatores a serem considerados na agricultura, pois, por meio dela é possível estimar a quantidade de água requerida pelas plantas, proporcionando economia deste recurso e aumento da produção agrícola. Esta estimativa vem sendo amplamente utilizada para manejo de irrigação, podendo ser realizada de várias maneiras, entre elas, modelos físicos, empíricos e combinados (TABARI et al., 2014).

O modelo físico combinado de Penman-Monteith (PM) foi indicado como padrão de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (ALLEN et al., 1998), este modelo requer dados climáticos de: temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e insolação.

Os dados requeridos por certos modelos de ET_o podem estar indisponíveis a nível municipal, principalmente nos países em desenvolvimento (TABARI et al., 2013). Allen et al. (1998) sugeriu que na falta de dados necessários a PM, o modelo de Hargreaves e Samani (1985) surge como opção para estimativa de ET_o, pois, utiliza apenas dados medidos de temperatura do ar, e, por ser este um dos elementos do clima mais comumente medido, este modelo é amplamente utilizado mundialmente (MARTÍ et al., 2015).

O modelo de Hargreaves e Samani (HS) apresentou bons resultados em vários locais em que foi utilizado, principalmente quando efetuado ajuste dos seus parâmetros (BORGES; MENDIONDO, 2007; TABARI; TALAEE, 2011; JÚNIOR et al., 2012; RAZIEI; PEREIRA, 2013; TABARI et al., 2013; LIMA JUNIOR et al., 2016).

O ajuste de parâmetros deste modelo deve ser realizado principalmente em regiões úmidas, pois, os maiores erros registrados deste método são para tais condições, que ocorrem principalmente em regiões litorâneas ou com altitude elevada

(RAVAZZANI et al., 2012; TABARI et al., 2013; PANDEY et al., 2014; FENG et al., 2016). Este trabalho teve como objetivo ajustar a equação de Hargreaves e Samani (1985) de três formas distintas e analisar qual modelo ajustado obteve a melhor estimativa da ET_o para a cidade de Maceió-AL.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado para as condições climáticas da cidade de Maceió, Alagoas, localizada na Latitude 9° 39' 57" Sul, Longitude 35° 44' 07" Oeste e altitude de 64,5 m. Foram utilizados dados diários de temperatura máxima, mínima, e média do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar global. Estes dados foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da sua rede de estações automáticas, do período de 2006 a 2015.

Segundo a FAO, métodos empíricos devem ser calibrados e validados com base na equação de PM FAO-56 (ALLEN et al., 1998), por este modelo apresentar ótimos resultados em diversas condições climáticas, sendo este utilizado como padrão no presente estudo (Equação 1).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

em que: ET_o = evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹; R_n = radiação líquida total do gramado, MJ m⁻² dia⁻¹; G = densidade do fluxo de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹; T_m = temperatura média do ar, °C; u₂ = velocidade do vento média diária a 2 m de altura, m s⁻¹; e_s = pressão de saturação de vapor, kPa; e_a = pressão parcial de vapor, kPa; Δ = declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T_m, kPa°C⁻¹; γ = coeficiente psicrométrico, kPa°C⁻¹.

Pela disponibilidade de dados de radiação solar global (R_s), o uso de dados de insolação foi dispensado, sendo inserido

diretamente os valores de R_s na rotina de cálculo do modelo de Penman Monteith.

Hargreaves e Samani (1985) propuseram a seguinte equação para estimativa da E_{To} utilizando apenas os valores das Temperaturas máxima, mínima e média do ar e da radiação solar extraterrestre (Equação 2).

$$E_{T_o} = 0,408 \cdot a \cdot R_a (T_x - T_n)^b \cdot (c + T_m) \quad (2)$$

em que: R_a - radiação solar extraterrestre; T_x - temperatura máxima do ar, °C; T_n - temperatura mínima do ar, °C; T_m - temperatura média do ar, °C; a - parâmetro de ajuste (valor original: 0,0023); b - parâmetro de ajuste (valor original: 0,5); c - parâmetro de ajuste (valor original: 17,8).

O modelo de HS foi calibrado tendo como base o modelo de Penman-Monteith FAO 56, foram realizadas calibrações de três formas: de um (a), dois (a e b) e três parâmetros (a, b e c) a partir do Microsoft Excel®, utilizando a metodologia descrita por Wraith e Or (1998).

As formas de calibração foram analisadas segundo os índices estatísticos sugeridos por Legates e McCabe Jr. (1999): erro padrão de estimativa (EPE), índice de Willmott (id) e coeficiente de determinação (r^2) (Equações 3 a 5).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$id = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)} \right] \quad (4)$$

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O) \cdot (P_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - O)^2}} \right]^2 \quad (5)$$

em que: O_i - valores estimados pelo modelo padrão; P_i - valores estimados

pelos modelos propostos; O - é a média dos valores observados; N : número de dados.

O desempenho dos métodos foi avaliado segundo recomendado por Camargo e Sentelhas (1997) em que o grau de precisão foi obtido por meio do coeficiente de correlação “ r ” (Equação 4), e a concordância foi avaliada pelo índice de Willmott “ id ” (Equação 3) e o desempenho pelo indicador “ c ”. Sendo “ c ” obtido pelo produto de $id * r$. Onde os valores de “ c ” são classificados conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Valores do coeficiente de desempenho “ c ” conforme Camargo e Sentelhas (1997).

Valor de “ c ”	Desempenho
> 0.85	Ótimo
0.76 a 0.85	Muito bom
0.66 a 0.75	Bom
0.61 a 0.65	Mediano
0.51 a 0.60	Sofrível
0.41 a 0.50	Mau
≤ 0.40	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1 (a, b, c e d) é possível observar a variação anual da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e extraterrestre. A temperatura do ar variou de 20,6 a 30,8°C, tendo o menor valor ocorrido no mês de agosto e o maior no mês de março. O maior valor de umidade relativa do ar ocorreu no mês de junho (83%) e o menor no mês de janeiro (76,6%), a umidade relativa apresentou comportamento inverso ao da temperatura máxima. A velocidade do vento apresentou pouca variação no período estudado, tendo como valor médio 2,64 m s⁻¹. A radiação solar global apresentou maior valor no mês de novembro (22 MJ m⁻² dia⁻¹), os maiores valores de radiação solar ocorreram nos meses com as maiores temperaturas, mostrando relação direta destes dois elementos do clima. A radiação solar extraterrestre variou de 29 MJ m⁻²dia⁻¹ a 39 MJ m⁻²dia⁻¹ nos meses de junho e janeiro, respectivamente.

AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MODELO DE HARGREAVES E SAMANI PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM ESCALA DIÁRIA PARA MACEIÓ-AL

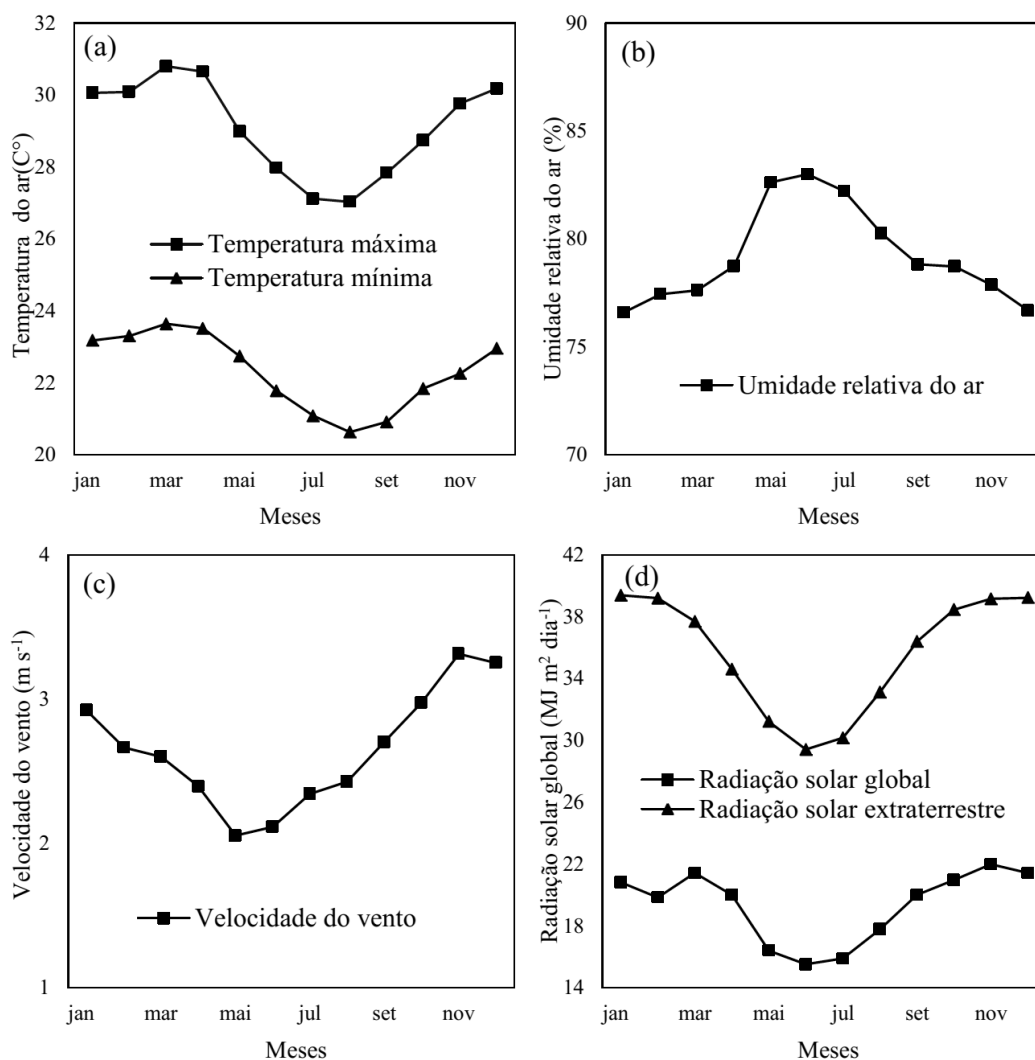


Figura 1. (a): valores médios mensais de temperatura do ar; (b): valores médios mensais da umidade relativa do ar (%); (c): valores médios mensais da velocidade do vento (m s^{-1}); (d): valores médios de radiação solar global e extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Foram efetuadas três formas de calibração, tendo a calibração de apenas um parâmetro (a) apresentado valor de 0,0025 (Tabela 2), próximo ao recomendado 0,0023 do modelo original, ajustando este modelo para Fortaleza-CE, Lima Junior et al., (2016) obtiveram valor semelhante calibrando apenas o coeficiente “a” com 0,0026. A calibração de dois parâmetros obteve para “a” 0,0028 e para “b” 0,4287, valores que diferem dos originais 0,0023 e 0,5000 respectivamente. Já Arraes et al., (2016) parametrizando a equação de HS para o estado de Pernambuco, obtiveram “a” 0,0024 e “b” 0,5000 em Recife, condição semelhante ao do presente trabalho.

O ajuste realizado nos três parâmetros da equação mostrou valores distintos dos

Tabela 2. Valores dos parâmetros ajustados do modelo de Hargreaves e Samani.

Modelo	Parâmetros de ajuste		
	a	b	c
HS cal. 1	0.0025	-	-
HS cal. 2	0.0028	0.4287	-
HS cal. 3	0.0050	0.4056	0.0000

*HS cal. 1: Hargreaves e Samani (calibrado a); HS cal. 2: Hargreaves e Samani (calibrado a e b); HS cal. 3: Hargreaves e Samani (calibrado a, b e c).

originais recomendados, mostrando que este modelo não apresenta boa aplicação quando utilizado na sua forma original na cidade de Maceió. Deve-se ressaltar que o parâmetro “c” obteve valor 0 no ajuste, divergindo do original 17,8, mostrando que este termo da equação não apresenta importância no ajuste da equação para Maceió.

O comportamento da ETo durante o ano pode ser observado na Figura 2. Nota-se que o modelo de HS original manteve-se sempre abaixo dos valores de PM, evidenciando uma subestimativa em todos os meses do ano, isto pode ter ocorrido pelas variações de umidade relativa e velocidade do vento, elementos do clima cujo modelo de HS não leva em consideração. O uso de valores medidos de Rs no modelo padrão de comparação PM também pode ter contribuído para tal subestimativa, pois, o modelo original de HS estima a Rs através da temperatura do ar e da radiação solar extraterrestre, sendo que, esta forma de estimativa pode apresentar falhas quando não ajustado localmente. Júnior et al., (2012) registraram melhores resultados do modelo original de HS, para a cidade de Garanhuns-PE.

Ainda sobre a figura 2, os modelos calibrados apresentaram comportamento semelhante, com pequena vantagem para a calibração com três parâmetros, mantendo-se próxima da média mensal do modelo de PM, diferindo de Hosseinzadeh Talaei, (2014) que constatou uma superestimativa do modelo calibrado durante o ano para a cidade de Gorgan no Irã. Para o mês de

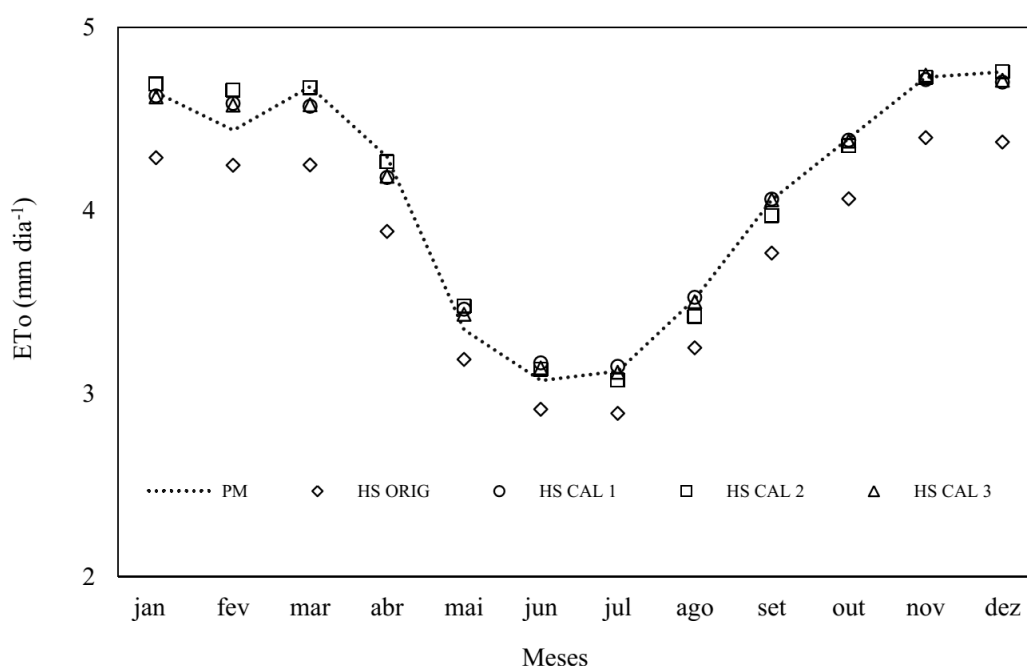
fevereiro observa-se que nenhuma das formas do modelo de HS utilizada esteve próxima do modelo padrão Penman Monteith, isso pode ter ocorrido pelo aumento da umidade relativa do ar devido o início da estação chuvosa no nordeste brasileiro.

Segundo o EPE, o menor erro de estimativa foi da calibração com três parâmetros (HS cal 3) com $0,47 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tabela 3). Em estudo realizado no clima úmido da Região de Tadong, em Sikkim na Índia, Pandey et al., (2014) utilizando os coeficientes “a” 0,0020, “b” 0,5 e “c” 12,2 obtiveram resultado semelhante com um EPE de $0,54 \text{ mm dia}^{-1}$ para a escala

Tabela 3. Desempenho das formas de calibração do modelo de Hargreaves e Samani.

Modelo	EPE	id	C
HS Orig	0,57	0.86	Bom
HS Cal 1	0,49	0.89	Bom
HS Cal 2	0,49	0.89	Bom
HS Cal 3	0,47	0.90	Muito Bom

* HS Orig: Hargreaves e Samani original; HS cal. 1: Hargreaves e Samani (calibrado a); HS cal. 2: Hargreaves e Samani (calibrado a e b); HS cal. 3: Hargreaves e Samani (calibrado a, b e c).



*PM: Penman-Monteith; HS Orig: Hargreaves e Samani original; HS cal. 1: Hargreaves e Samani (calibrado a); HS cal. 2: Hargreaves e Samani (calibrado a e b); HS cal. 3: Hargreaves e Samani (calibrado a, b e c).

Figura 2. Variação mensal da evapotranspiração de referência dos modelos avaliados.

AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MODELO DE HARGREAVES E SAMANI PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM ESCALA DIÁRIA PARA MACEIÓ-AL

diária. Já Tabari et al., (2013) obtiveram pior resultado com um EPE de 1,08 mm dia⁻¹ utilizando os parâmetros “a” 0,0030, “b” 0,4000 e “c” 20, para a cidade de Rasht, situada na costa do mar Caspio no norte do Irã. Hosseinzadeh Talaei, (2014) também obteve desempenho insatisfatório utilizando estes parâmetros, com um EPE de 1,86 mm dia⁻¹, para condições semelhantes de Gorgan no Irã.

As calibrações realizadas com um e dois parâmetros mostraram desempenho semelhante de acordo com a análise estatística, sendo que, obtiveram valores idênticos de EPE e id com 0,49 mm dia⁻¹ e 0,89 respectivamente. Borges e Mendiondo (2007) ajustando na escala mensal apenas o coeficiente “a” que foi de 0,0022 de setembro a abril e 0,0020 de maio a agosto, obtiveram melhor desempenho segundo

o id com 0,99. Utilizando os parâmetros ajustados “a” 0,0014 e “b” 0,65, Fernandes et al., (2012) registraram um EPE de 0,15 mm dia⁻¹ na escala diária para a cidade de Minaçu-GO. O índice “c” também aponta a semelhança entre as calibrações com um e dois parâmetros, tendo estas alcançado desempenho considerado bom.

A menor dispersão dos valores de ETo em relação a PM foi observado no modelo com três parâmetros calibrados (Figura 3), tendo este alcançado um r² de 0,71. As estimativas obtidas por meio do modelo com a calibração de apenas um parâmetro e o modelo original apresentaram o mesmo valor de r² e dispersão semelhante. Com uma pequena vantagem sobre os mencionados anteriormente, o modelo com calibração de dois parâmetros obteve um r² de 0,69, Júnior et al. (2012) constataram melhor resultado

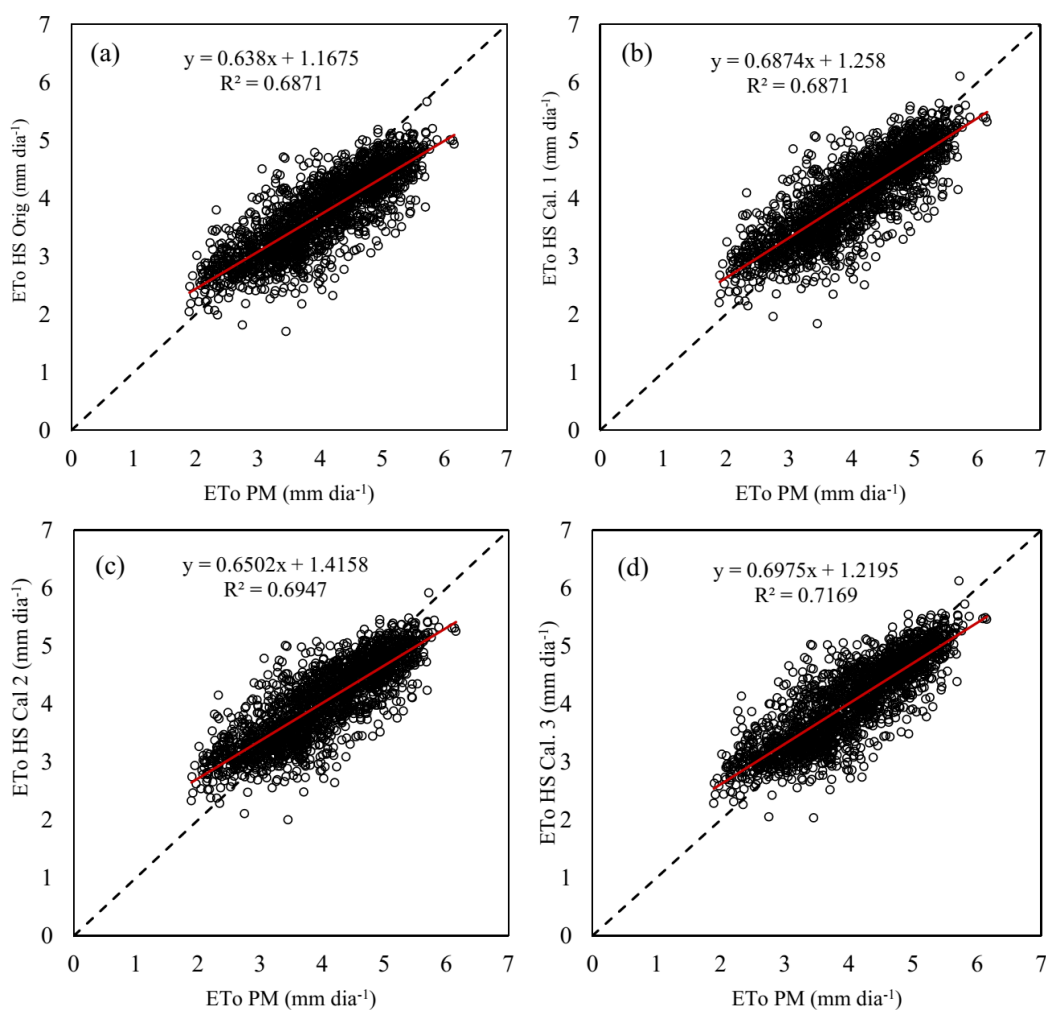


Figura 3. Evapotranspiração de referência diária, ETo, método FAO Penman-Monteith versus métodos avaliados, (linha tracejada indica reta 1:1).

de HS calibrado para o período de Outono-Inverno com r^2 0,81, porém, para o período Inverno-Verão seu r^2 foi 0,71, semelhante ao presente estudo.

O modelo de Hargreaves e Samani em sua forma original obteve o pior desempenho dentre as formas de cálculo analisadas, e a divergência dos valores ajustados para com os valores nativos mostra que esse modelo requer ajustes ao ser utilizado em locais semelhantes.

CONCLUSÕES

As calibrações realizadas nos três parâmetros da equação de Hargreaves e Samani proporcionam melhores estimativas de evapotranspiração de referência do que o modelo original, sendo recomendadas em locais semelhantes.

O modelo de Hargreaves e Samani em sua forma original mostra-se inadequado para o local estudado.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por disponibilizar os dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper** 56. p. 300, 1998.

ARRAES, F. D. D. LIMA JUNIOR, J. C. OLIVEIRA, J. B. MACÊDO, K. G. COURAS, Y. S. OLIVEIRA, W. C. Parametrização da equação de Hargreaves-Samani para o estado do Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 1, p. 410–419, 2016.

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**, v. 11, n. 3, p. 293–300, 2007.

FENG, Y., CUI, N., ZHAO, L., HU, X., & GONG, D. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. **Journal of Hydrology**, v. 536, p. 376–383, 2016.

FERNANDES, D. S., HEINEMANN, A. B., PAZ, R. L. F. OLIVEIRA, A. A. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 246-255, 2011.

HOSSEINZADEH TALAEI, P. Performance evaluation of modified versions of Hargreaves equation across a wide range of Iranian climates. **Meteorology and Atmospheric Physics**, p. 65–70, 2014.

BORGES JÚNIOR, J. C. F., ANJOS, R. J., SILVA, T. J. A., LIMA, J. R. S., ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.

LIMA JUNIOR, J. C., ARRAES, F. D. D., OLIVEIRA, J. B. D., NASCIMENTO, F. A. L. D., MACÊDO, K. G. Defining parameters for the Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in the State of Ceará, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 447-454, 2016.

MARTÍ, P., GONZÁLEZ-ALTOZANO, P., LÓPEZ-URREA, R., MANCHA, L. A., SHIRI, J. Modeling reference evapotranspiration with calculated targets. Assessment and implications. **Agricultural Water Management**, v. 149, p. 81–90, 2015.

AJUSTE DOS PARÂMETROS DO MODELO DE HARGREAVES E SAMANI PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM ESCALA DIÁRIA PARA MACEIÓ-AL

PANDEY, V., PANDEY, P. K., & MAHANTA, A. P. Calibration and performance verification of Hargreaves-Samani equation in a humid region. **Irrigation and Drainage**, v. 63, n. 5, p. 659-667, 2014.

RAVAZZANI, G., CORBARI, C., MORELLA, S., GIANOLI, P., & MANCINI, M. Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine river basins. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 7, p. 592-599, 2011.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 121, p. 1–18, 2013.

TABARI, H., HOSSEINZADEHTALAEI, P., WILLEMS, P., & MARTINEZ, C. Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 3, p. 610-619, 2016.

TABARI, H.; GRISMER, M. E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, v. 31, n. 2, p. 107–117, 2013.

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. October, p. 837–845, 2011.