

# Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil<sup>1</sup>

Defining parameters for the Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in the State of Ceará, Brazil

Juarez Cassiano de Lima Junior<sup>2</sup>, Francisco Dirceu Duarte Arraes<sup>3\*</sup>, Joaquim Branco de Oliveira<sup>4</sup>, Francisco Airdesson Lima do Nascimento<sup>5</sup> e Kleber Gomes de Macêdo<sup>4</sup>

**RESUMO** - O modelo de Hargreaves e Samani é utilizado na estimativa da evapotranspiração de referência, sendo muito útil para o manejo da irrigação, sendo o mesmo considerado de uso prático, pois utiliza elementos meteorológicos de fácil obtenção como a temperatura. Entretanto, o mesmo necessita de calibração regional para estimar adequadamente a evapotranspiração. Objetivou-se calibrar o modelo de Hargreaves e Samani para o estado do Ceará, utilizando dados meteorológicos de doze cidades. Os parâmetros empíricos  $\alpha$  (0,0023) e  $\beta$  (0,5) foram calibrados, considerando dois processos: primeiro, uma calibração simultânea dos dois parâmetros, e depois apenas o coeficiente  $\alpha$ . Na calibração simultânea obteve uma variação dos seus valores extremos em três cidades, o  $\alpha$  oscilou de 0,0004 (Campos Sales e Crateús) a 0,0019 (Guaramiranga) e o expoente  $\beta$  oscilou de 0,51 (Guaramiranga) a 1,1977 (Campos Sales). A correlação entre o modelo de Hargreaves e Samani calibrado com a equação de Penman-Monteith apresentou seu valor máximo na cidade de Jaguaruana, 0,934 para o ajuste com os dois parâmetros e 0,942 para a calibração feita apenas com o coeficiente  $\alpha$ , mostrando que a calibração da equação de Hargreaves e Samani é viável e é necessário para melhorar as estimativas da evapotranspiração.

**Palavras-chave:** Semiárido. Temperatura. Penman-Monteith.

**ABSTRACT** - The Hargreaves-Samani model is used in estimating reference evapotranspiration, and is very useful for irrigation management; it is considered to be of practical use as it uses meteorological elements, which are easily obtained, such as temperature. However, the equation is in need of regional calibration in order to accurately estimate evapotranspiration. The aim of this work was to calibrate the Hargreaves-Samani model for the State of Ceará, using meteorological data from 12 cities. The empirical parameters  $\alpha$  (0.0023) and  $\beta$  (0.5) were calibrated considering two processes: firstly, the simultaneous calibration of the two parameters, and then only the  $\alpha$  coefficient. The simultaneous calibration returned a variation in the extreme values for three cities;  $\alpha$  ranged from 0.0004 (Campos Sales and Crateús) to 0.0019 (Guaramiranga), and exponent  $\beta$  varied between 0.51 (Guaramiranga) to 1.1977 (Campos Sales). The correlation between the Hargreaves-Samani model calibrated with the Penman-Monteith equation, had a maximum value for the city of Jaguaruana, 0.934 when calibrated with the two parameters, and 0.942 when calibrated with the  $\alpha$  coefficient only, demonstrating that calibration of the Hargreaves-Samani equation is viable, and is necessary for improving estimates of evapotranspiration.

**Key words:** Semi-arid region. Temperature. Penman-Monteith.

\*Autor para correspondência

DOI: 10.5935/1806-6690.20160054

<sup>1</sup>Recebido para publicação 24/09/2014; aprovado em 29/10/2015

Parte da Monografia do primeiro autor apresentada ao curso de Irrigação e Drenagem, IFCE - Campus Iguatu

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, Brasil, limajr.soil@gmail.com

<sup>3</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro-PE, Rua José Custódio da Costa, n° 999, Esplanada II, Iguatu-CE, Brasil, 63.505-170, dirceuarraes@gmail.com.

<sup>4</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Iguatu-CE, Brasil, joaquimbrancodeoliveira@gmail.com, kleber117@hotmail.com

<sup>5</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo Baiano, Cruz das Almas-BA, Brasil, airdessonpai@hotmail.com

## INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, uma das principais preocupações é com a crescente demanda hídrica em todos os setores da sociedade. Portanto, a água na produção de alimentos deve ser utilizada da forma mais racional possível. Nesse contexto, a estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) tem o objetivo de otimizar o uso da água na agricultura.

Muitos modelos propostos para a estimativa da  $ET_0$  não podem ser aplicados em cenários diferentes daqueles em que foram originalmente desenvolvidos. A fim de resolver esse problema a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) padronizou o modelo de Penman - Monteith (PM) na estimativa da  $ET_0$  (ALLEN *et al.*, 1998). PM é uma equação que expressa a evapotranspiração de uma cultura hipotética de referência com uma altura uniforme de 0,12 m, a resistência de superfície fixa de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e um albedo de 0,23, crescendo ativamente, cobrindo completamente o solo e sem sofrer estresse hídrico. Nessas condições, os únicos fatores que afetam  $ET_0$  são variáveis climáticas e, conseqüentemente, a  $ET_0$  pode ser considerada uma variável atmosférica e pode ser calculada a partir de dados meteorológicos (SENTELHAS; GILLESPIE; SANTOS, 2010).

O modelo PM é a equação padrão para estimar a  $ET_0$  na escala diária e mensal em todos os climas, e pode ser usado globalmente sem qualquer calibração local e até para estimativas horárias, devido a incorporação de parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos, sendo validada em diferentes ambientes usando medidas precisas obtidas a partir de lisímetros. O processo de cálculo exige medições confiáveis de elementos meteorológicos tais como: temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Porém, frequentemente nem todos esses elementos estão disponíveis, em razão do número limitado de estações meteorológicas devidamente equipadas (FERNANDES *et al.*, 2012), ou apresentam grandes falhas e/ou imprecisões nas medições. Por estas razões, este método tem o seu uso limitado pela falta de elementos climáticos.

Segundo Allen *et al.* (1998) o uso da equação de Hargreaves e Samani (1985) é uma alternativa viável para a estimativa  $ET_0$  quando há falta de parâmetros climáticos requeridos pelo modelo PM.

O modelo de Hargreaves e Samani (HS) necessita apenas das temperaturas mínima, máxima, média do ar. Esse modelo vem sendo utilizado amplamente devido a sua simplicidade e a potencialidade para calibração de seus parâmetros, (BAUTISTA *et al.*, 2009) podendo fornecer dados confiáveis da  $ET_0$  para o intervalo de cinco dias ou períodos mais longos (THEPADIA; MARTINEZ, 2012; TRAJKOVIC, 2007).

As adaptações no modelo de HS não foram suficientes para torná-lo independente de calibração regional de seus parâmetros. Em regiões de clima frio, o modelo de HS superestima a  $ET_0$ , e em casos onde as características da região não se assemelham com a que seus parâmetros foram calibrados originalmente, a estimativa é bastante equivocada (BAUTISTA *et al.*, 2009; FERNANDES *et al.*, 2012; SABZIPARVAR; TABARI, 2010; SHAHIDIAN *et al.*, 2013; TABARI; TALAEI, 2011). Diante do exposto o objetivo do presente trabalho foi calibrar os coeficientes da equação de HS em escala mensal para doze localidades do estado do Ceará.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado utilizando dados meteorológicos do estado do Ceará, que se encontra localizado na região Nordeste do Brasil, entre os paralelos  $2,5^\circ$  e  $8^\circ$  de latitude Sul e os meridianos  $37^\circ$  e  $42^\circ$  de longitude Oeste, cuja sua área total é de  $146.348,6 \text{ km}^2$ . De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta três tipos de clima: BSw'h', Aw' e Cw', havendo uma predominância em aproximadamente 80% da área como BSw'h' (semiárido quente). Foram utilizados dados provenientes de estações meteorológicas convencionais de doze municípios do estado do Ceará (Tabela 1 e Figura 1). Dados estes disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram: velocidade do vento ( $V_v$ ), insolação (Ins), temperatura máxima ( $T_{\max}$ ), temperatura mínima ( $T_{\min}$ ), temperatura média ( $T_{\text{med}}$ ), e umidade relativa (UR).

A FAO recomenda que os métodos empíricos devem ser calibrados e validados com base na equação de Penman-Monteith FAO-56 como referência (ALLEN *et al.*, 1998), descrita como:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{med}} + 273} v_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34v_2)} \quad (1)$$

em que:  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência em  $\text{mm dia}^{-1}$ ;  $R_n$  é a radiação líquida total do gramado em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $G$  é a densidade do fluxo de calor no solo em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $T_{\text{med}}$  é a temperatura média diária do ar em  $^\circ\text{C}$ ;  $v_2$  é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura em  $\text{m s}^{-1}$ ;  $e_s$  é a pressão de saturação de vapor em kPa;  $e_a$  é a pressão parcial de vapor, kPa;  $\Delta$  - declividade da curva de pressão de vapor em  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Hargreaves e Samani (1982) recomendam uma equação simples para estimar radiação solar utilizando a diferença de temperatura:

**Tabela 1** - Características das estações meteorológicas utilizadas no estudo

ID	Estações	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	T <sub>med</sub> (°C)	V <sub>v</sub> (m s <sup>-1</sup> )	UR (%)	Período (anos)
1	Acaraú	-2,88	-40,14	16,50	27,60	4,20	80,73	1976/2011
2	Barbalha	-7,31	-39,30	409,00	26,43	1,85	66,01	1973/2014
3	Campos Sales	-7,00	-40,38	583,50	25,40	4,44	64,95	1962/2014
4	Crateús	-5,16	-40,66	296,82	27,26	2,91	60,74	1961/2014
5	Fortaleza	-3,81	-38,57	26,45	27,13	3,20	78,22	1961/2014
6	Guaramiranga	-4,28	-39,00	870,67	21,76	2,63	86,61	1961/2014
7	Iguatu	-6,36	-39,29	217,60	27,68	2,48	63,56	1961/2014
8	Jaguaruana	-4,87	-37,76	11,71	28,11	3,73	71,06	1969/2014
9	Morada Nova	-5,11	-38,36	43,62	28,24	3,00	69,67	1962/2014
10	Quixeramobim	-5,16	-39,38	79,50	27,30	3,27	64,49	1961/2014
11	Sobral	-3,73	-40,33	109,62	28,03	2,07	70,14	1961/2014
12	Tauá	-6,00	-40,41	398,77	26,98	2,73	61,16	1964/2014

T<sub>med</sub> - Temperatura média do ar; V<sub>v</sub> - Velocidade do vento (anemômetro à dez metros de altura); UR - Umidade relativa do ar

**Figura 1** - Localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo



$$\frac{R_s}{R_a} = Kt(T_{max} - T_{min})^{0.5} \tag{2}$$

em que: *Kt* é o coeficiente empírico, adimensional; *R<sub>a</sub>* é a radiação solar extraterrestre em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>; *R<sub>s</sub>* é a radiação solar global em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>; *T<sub>max</sub>* é a temperatura máxima do ar em °C; *T<sub>min</sub>* é a temperatura mínima do ar em °C.

Hargreaves e Samani (1985) propuseram a seguinte equação para estimativa da ET<sub>o</sub> utilizando apenas os valores das Temperaturas máxima, mínima e média do ar e da radiação no topo da atmosfera:

$$ET_o = \alpha (T_{max} - T_{min})^\beta (T_{med} + 17,8) Ra \tag{3}$$

em que: *α* é um parâmetro empírico, sendo utilizado o seu valor original de 0,0023; *β* é um parâmetro empírico exponencial, sendo seu valor original de 0,5. Sendo a temperatura média obtida através da metodologia descrita por Allen *et al.* (1998), Equação (4):

$$T_{med} = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \tag{4}$$

As médias mensais de ET<sub>o</sub> foram calculadas em ambas as metodologias, PM e HS, para todos os locais estudados. As médias mensais de ET<sub>o</sub> dos meses ímpares foram usados para obtenção dos parâmetros empíricos (*α* e *β*) e com médias mensais de ET<sub>o</sub> dos meses pares fez-se a validação do modelo já calibrado pelos parâmetros (*α* e *β*) previamente calculados. Duas calibrações foram feitas. A primeira ajustando os parâmetros *α* e *β* simultaneamente, e uma segunda calibrando somente o parâmetro *α*, permanecendo o parâmetro *β* com seu valor original de 0,5, tendo como propósito de observar a importância que um parâmetro tem sobre o outro. A mesma quantidade de dados foram utilizados em ambas calibrações. Também foram utilizados os mesmos procedimentos.

O ajuste dos parâmetros da equação de Hargreaves e Samani (1985) foi realizado a partir do Microsoft Excel®, utilizando a metodologia descrita por Wraith e Or (1998)

para ajuste de equação não linear usando o aplicativo Solver.

A análise dos dados foi realizada de acordo com os índices estatísticos sugeridos por Legates e McCabe Júnior (1999): índice de Willmott (*id*), coeficiente de Nash-Sutcliffe (*E*), raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro máximo absoluto (EMAX).

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

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$EMAX = \max \{ |Y_i - X_i| \}_{i=1}^N \quad (8)$$

em que:  $O_i$  é o valor estimado pelo modelo padrão;  $P_i$  é o valor estimado pelos modelos propostos;  $\bar{X}$  é a média dos valores estimados em ambos os modelos;  $Y_i$  é o valor médios obtidos pelos modelos propostos;  $O$  é o valor da media obtido pelo modelo padrão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na calibração simultânea dos parâmetros da equação de Hargreaves e Samani, a variação atingiu seus maiores e menores valores em três cidades, o coeficiente  $\alpha$  oscilou de 0,0004 (Campos Sales e Crateús) a 0,0019 (Guaramiranga) e o expoente  $\beta$  oscilou de 0,51, novamente na cidade de Guaramiranga a 1,1977 em Campos Sales (Tabela 2). De acordo com Fooladmand e Haghghat (2007), locais com valores de velocidade do vento maiores que dois metros por segundo necessitam do uso de coeficientes ajustados em vez do original, o que explica a alta disparidade dos valores corrigidos na calibração simultânea para as cidades de Campos Sales, Crateús e Acaraú, com velocidades de 4,44; 2,91 e 3,0 m s<sup>-1</sup> respectivamente (Tabela 1), segundo Hargreaves e Samani (1985) o modelo estudado e calibrado não se adapta bem a regiões litorâneas, o que possivelmente justificou ainda mais tamanha disparidade na cidade de Acaraú, comportamento semelhante ao que Maestre-Valero, Martínez-Alvarez e González-Real (2013) observaram calibrando a equação de Hargreaves e Samani (1985) em uma região semiárida da Espanha, utilizando dados de 12 estações automáticas, no litoral o coeficiente ajustado chegou a 0,0034, enquanto em regiões mais interioranas não ultrapassou 0,0025. Já no México

observou-se comportamento também semelhante no litoral, sendo que dessa vez a maior diferença não ultrapassou 0,0026 para os meses de abril, maio, outubro e dezembro, visto que foram feitas calibrações mensais (BAUTISTA *et al.*, 2009).

**Tabela 2** - Valores dos coeficientes empíricos para os processos de calibração simultânea e de somente um parâmetro

Cidades	$\alpha$	$\beta$	$\alpha'$
Acaraú	0,0007	1,03	0,0023
Barbalha	0,0013	0,68	0,0021
Campos Sales	0,0004	1,19	0,0025
Crateús	0,0004	1,15	0,0024
Fortaleza	0,0023	0,55	0,0026
Guaramiranga	0,0019	0,51	0,0019
Iguatu	0,0008	0,95	0,0023
Jaguaruana	0,0009	0,91	0,0024
Morada Nova	0,0012	0,73	0,0023
Quixeramobim	0,0008	0,97	0,0026
Sobral	0,0011	0,74	0,0020
Tauá	0,0008	0,92	0,0022

Ainda na calibração feita com os dois parâmetros o valor que menos diferiu do valor original para  $\alpha$  foi encontrado em Guaramiranga (0,0019), inferiores até a 0,0022, que foram encontrados por Bautista *et al.* (2009) no México, para os meses de junho e julho. Já para o coeficiente  $\beta$ , na cidade de Guaramiranga a alteração foi praticamente nula (0,51). No município de Barbalha os ajustes atingiram os valores de 0,0013 para  $\alpha$  e 0,68 para  $\beta$ , valores bem próximos aos encontrados em calibrações locais e regionais feitas por Fernandes *et al.* (2012), para o estado do Goiás, utilizando dados provenientes de dez estações meteorológicas com intervalo de tempo diferentes entre as estações, obtendo 0,00141 como coeficiente  $\alpha$  e 0,68 como expoente empírico  $\beta$ , calibrados regionalmente.

A calibração realizada com apenas o parâmetro  $\alpha$  (Tabela 2), variou de 0,0019 a 0,0026 para as cidades de Guaramiranga e Quixeramobim respectivamente, o menor valor encontrado já era esperado em função do primeiro ajuste feito, visto que o expoente  $\beta$  praticamente não diferiu do original. Valores encontrados em estudos realizados utilizando dados de províncias do Sul do Irã se assemelham com os resultados obtidos nesse estudo, as calibrações anuais feitas por Fooladmand e Haghghat (2007), variaram de 0,0018 a 0,0032 para o coeficiente original da equação de Hargreaves e Samani (1985).

Ainda de acordo com a Tabela 2 o ajuste com apenas um só parâmetro a calibração que menos diferiu do valor original foi calculada para as cidades de Acaraú, Iguatu e Morada Nova, permanecendo com sua constante original (0,0023), já em Jacupiranga - SP, Borges e Mendiondo (2007), utilizaram oito métodos distintos de estimativa de  $ET_o$ , com a correlação feita entre os modelos Hargreaves e Samani (1985) e PM, o coeficiente empírico encontrado para HS foi de 0,00224 para os meses de setembro a abril, e de 0,00202 para os meses de maio até agosto.

Na avaliação dos ajustes da equação de HS, a calibração feita com os dois parâmetros (Tabela 3), apresentou comportamento discretamente mais próximo do modelo padrão do que o ajuste feito somente com o coeficiente  $\alpha$  (Tabela 4). A concordância do modelo proposto em relação à equação de PM foi maior do que 0,9 em quase todas as cidades para a calibração com os dois parâmetros, exceto nas estações localizadas nos municípios de Acaraú, Campos Sales e Tauá, onde o índice de Willmontt foi de 0,833; 0,882 e 0,837, respectivamente (Tabela 3). Valores semelhantes com os encontrados por Bautista *et al.* (2009), no México. Na calibração com apenas o coeficiente  $\alpha$  os municípios que apresentaram os maiores índices de Willmontt foram Guaramiranga (0,936), Jaguaruana (0,905) e Morada Nova (0,926). Os demais valores são maiores do que os encontrados para a cidade de Uberaba - MG, cujo Id foi de apenas 0,7 (MELO *et al.*, 2012).

Na análise da raiz quadrada do erro médio para a calibração feita com os dois parâmetros (RMSE), os valores

encontrados oscilaram de 0,289 mm dia<sup>-1</sup> (Guaramiranga) a 0,805 mm dia<sup>-1</sup> em Campos Sales; Acaraú por sua vez apresentou valor superior ao encontrado por Bautista *et al.* (2009), em ajustes feitos com dados de regiões costeiras e continentais no México, RMSE igual a 0,43 e 0,42 mm dia<sup>-1</sup> respectivamente (Tabela 3).

O ajuste feito somente com o coeficiente  $\alpha$  (Tabela 4) mostrou a importância do expoente  $\beta$  no modelo HS; em relação ao ajuste feito com os dois parâmetros (Tabela 3), os índices de concordância e eficiência foram menores, e os erros calculados foram maiores; a correlação entre o modelo ajustado e a equação padrão (PM) foi boa ( $r > 0,80$ ) em quase todas as localidades, exceto em Acaraú, Barbalha, Jaguaruana, Sobral e Tauá. Ainda de acordo com as Tabelas 3 e 4 Guaramiranga apresentou um comportamento singular, no ajuste feito com os dois parâmetros o expoente  $\beta$  praticamente não diferiu do seu valor original; em função disso as duas calibrações tiveram o mesmo comportamento e apresentaram os mesmos dados estatísticos.

As comparações entre os modelos ajustados com o padrão (PM) e a equação original de Hargreaves e Samani (1985) (Figura 2) mostram claramente a variabilidade na estimativa de  $ET_o$  de uma região para a outra. Em praticamente todas as estações a equação original HS superestimou a  $ET_o$  calculada por PM nos primeiros meses do ano, período esse que apresenta maiores quantidades de chuvas e menores amplitudes térmicas. O modelo de Hargreaves e Samani (1985) tende a superestimar a  $ET_o$  em regiões úmidas e subestimá-lo em regiões muito secas e em regiões de

**Tabela 3** - Avaliação do desempenho da calibração feita com dois parâmetros

Cidades	Id	E	RMSE (mm dia <sup>-1</sup> )	EMAX (mm dia <sup>-1</sup> )	R
Acaraú	0,830	0,580	0,641	1,772	0,770
Barbalha	0,900	0,650	0,485	1,408	0,820
Campos Sales	0,880	0,640	0,805	2,270	0,800
Crateús	0,940	0,790	0,582	2,776	0,890
Fortaleza	0,690	0,408	0,630	1,578	0,678
Guaramiranga	0,940	0,780	0,289	0,849	0,890
Iguatu	0,950	0,820	0,466	1,650	0,910
Jaguaruana	0,960	0,860	0,405	1,048	0,930
Morada Nova	0,960	0,850	0,388	1,154	0,920
Quixeramobim	0,950	0,810	0,579	1,835	0,900
Sobral	0,930	0,760	0,520	1,554	0,880
Tauá	0,840	0,490	0,714	1,893	0,720
Média	0,920	0,730	0,534	1,655	0,860

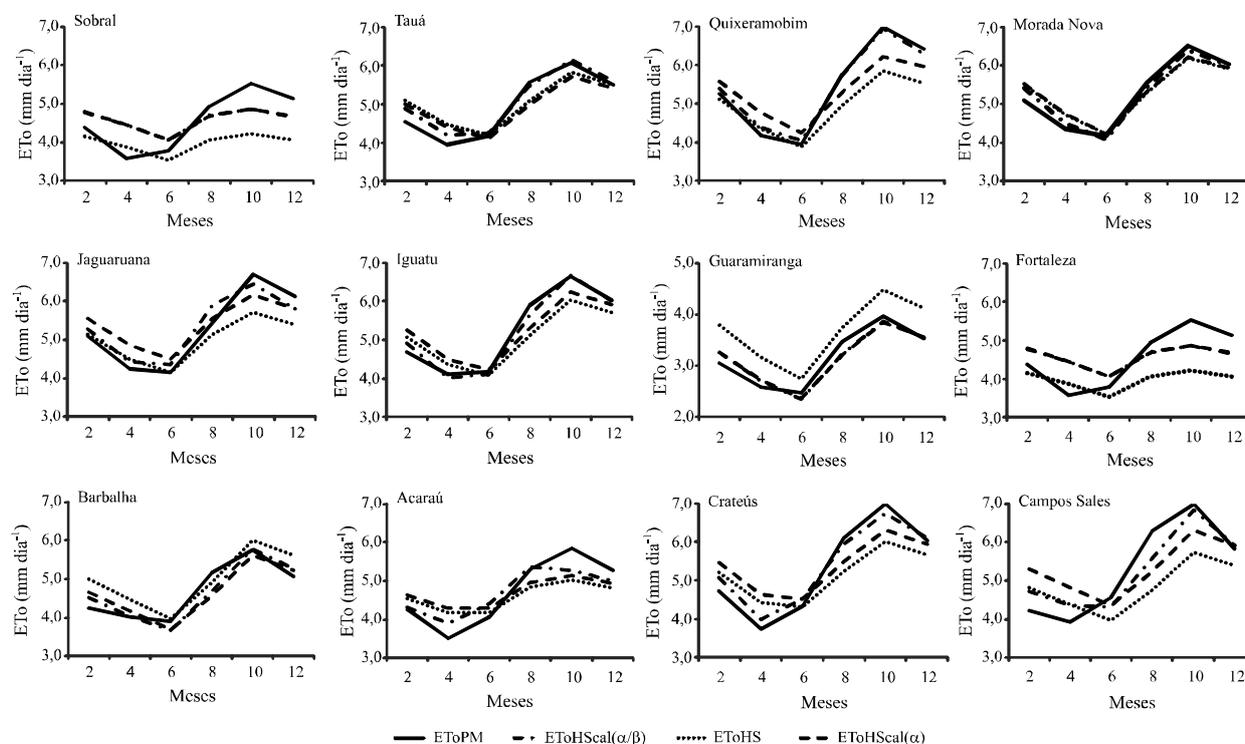
velocidade de vento superiores a  $4 \text{ m s}^{-1}$  (TEMESGEN; ALLEN; JENSEN, 1999; XU; SINGH, 2002). Portanto, o modelo de Hargreaves e Samani (1985) requer a calibração

local antes ser aplicada para estimar  $ET_0$  em qualquer região específica (BAUTISTA *et al.*, 2009; FOOLADMAND; HAGHIGHAT, 2007; GAVILÁN *et al.*, 2006).

**Tabela 4** - Avaliação do desempenho da calibração feita com um parâmetro

Cidades	Id	E	RMSE (mm dia <sup>-1</sup> )	EMAX (mm dia <sup>-1</sup> )	R
Acaraú	0,709	0,469	0,721	1,643	0,788
Barbalha	0,879	0,623	0,507	1,451	0,791
Campos Sales	0,757	0,477	0,966	2,298	0,713
Crateús	0,847	0,653	0,756	2,067	0,874
Fortaleza	0,682	0,405	0,632	1,559	0,683
Guaramiranga	0,936	0,780	0,289	0,854	0,884
Iguatu	0,896	0,722	0,581	1,936	0,87
Jaguaruana	0,905	0,762	0,528	1,369	0,942
Morada Nova	0,926	0,785	0,467	1,309	0,901
Quixeramobim	0,800	0,442	0,959	3,827	0,729
Sobral	0,894	0,725	0,559	1,571	0,885
Tauá	0,799	0,524	0,689	1,617	0,733
Média	0,850	0,633	0,638	1,813	0,828

**Figura 2** - Comparação dos valores calculados de  $ET_0$  por PM, HS e modelos ajustados



É observado também que o modelo o qual foi ajustado, somente um parâmetro superestima PM nos primeiros meses do ano tornando-se menor a partir do meio do ano, apresentando diferenças maiores do que o modelo com dois parâmetros ajustados, e às vezes até mesmo com erro maior do que o modelo original (Figura 2). A maioria das estações apresentaram resultados satisfatórios ao longo do ano com valores próximos entre os modelos ajustados e a equação original. Talae (2014) comparando seis versões de ajustes da equação de HS notou que o modelo que melhor se comportou no clima semiárido foi o calibrado em Davis na Califórnia, cidade de clima quente e seco, que se adequa bem ao modelo original.

Os valores que mais diferiram na comparação da equação original de HS com o modelo padrão de PM foram nas cidades de Acaraú, Campos Sales e Crateús; o que motivou tal discrepância foi a localização litorânea, no caso da estação de Acaraú (Figura 1) e o valor da velocidade do vento, no caso das estações de Campos Sales e Crateús (Tabela 2), confirmando os resultados obtidos por Fooladmand e Haghghat (2007).

## CONCLUSÕES

1. A calibração dos coeficientes da equação de Hargreaves e Samani para o estado do Ceará se mostrou como uma alternativa para uma melhor estimativa da evapotranspiração de referência em locais com disponibilidade de dados limitada;
2. O modelo de HS superestima a equação Penman-Monteith nos primeiros meses do ano, independente se calibrado ou não. Para a cidade de Guaramiranga ambas as calibrações apresentam resultados semelhantes quando comparadas entre si, já para a cidade de Fortaleza o ajuste do modelo de HS não se faz necessário;
3. O ajuste que apresentou os resultados mais próximos do modelo padrão foi a calibração simultânea do coeficiente  $\alpha$  e do expoente  $\beta$ .

## REFERÊNCIAS

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

BAUTISTA, F. *et al.* Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. **Atmosfera**, v. 22, n. 4, p. 331-348, 2009.

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.

FERNANDES, D. S. *et al.* Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 246-255, 2012.

FOOLADMAND, H. R.; HAGHIGHAT, M. Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly ET<sub>0</sub> based on Penman-Monteith method. **Irrigation and Drainage**, v. 56, p. 439-444, 2007.

GAVILÁN, P. *et al.* Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 3, p. 257-281, 2006.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 108, p. 225-230, 1982.

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

LEGATES, D. R.; MCCABE JÚNIOR, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro climatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; GONZÁLEZ-REAL, M. M. Regionalization of the Hargreaves coefficient to estimate long-term reference evapotranspiration series in SE Spain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 4, p. 1137-1152 2013.

MELO, G. L. de; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.5, p.875-888. 2012.

SABZIPARVAR, A. A.; TABARI, H. Regional estimation of reference evapotranspiration in arid and semiarid regions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 136, n. 10, p. 724-731, 2010.

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**, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SHAHIDIAN, S. *et al.* Parametric calibration of the Hargreaves-Samani equation for use at new locations hydrological processes. **Hydrological Process**, v. 27, p. 605-616, 2013.

TABARI, H.; TALAEE, 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.

TALAEI, P. H. Performance evaluation of modified versions of Hargreaves equation across a wide range of Iranian climates. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 126, n. 1-2, p. 65-70, 2014.

TEMESGEN, B.; ALLEN, R.; JENSEN, D. *et al.* Adjusting temperature parameters to reflect well-water conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 125, n. 1, p. 26-33, 1999.

THEPADIA, M.; MARTINEZ, C. J. Regional calibration of solar radiation and reference evapotranspiration estimates with minimal data in Florida. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 2, p. 111-119, 2012.

TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 1, p. 38-42, 2007.

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, v. 27, p. 13-19, 1998.

XU, C. Y.; SINGH, V. P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. **Water Research Management**, v. 16, n. 3, p. 197-219, 2002.