

**EQUAÇÃO DE HARGREAVES-SAMANI CALIBRADA EM DIFERENTES BASES TEMPORAIS PARA SETE LAGOAS, MG**

João Carlos Ferreira Borges Júnior¹, Aline Lilian Marques Oliveira², Camilo de Lelis Teixeira de Andrade³ & Marcus André Braidó Pinheiro⁴

¹ Engenheiro Agrícola, Professor da UFSJ/Campus Sete Lagoas-MG, jcborges@ufsj.edu.br

² Engenheira Agrícola e Ambiental, Mestre em Ciências Agrárias na UFSJ/Campus Sete Lagoas-MG, aline.oliveira_eaa@yahoo.com.br

³ Engenheiro Agrícola, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo/Sete Lagoas-MG, camilo.andrade@embrapa.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Ciências Agrárias na UFSJ/Campus Sete Lagoas-MG, marcus-andre.b.p@hotmail.com

Palavras-chave:

distribuição de probabilidade
evapotranspiração de referência
FAO Penman-Monteith

RESUMO

Dados de evapotranspiração de referência (ET_o) são requeridos em diversas análises relacionadas ao uso de recursos hídricos, como no manejo de irrigação, balanço hídrico de sequeiro, manejo de bacias hidrográficas, etc. O método FAO Penman-Monteith (FAO-PM) é considerado padrão para cálculo da ET_o. Contudo, a aplicação deste método pode ser restringida pela falta de dados meteorológicos. Um dos métodos alternativos com menor requisição de dados é o Hargreaves-Samani (HS), o qual comumente necessita calibração local para obtenção de maior exatidão na aplicação. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do método Hargreaves-Samani, na sua forma original e calibrado em base anual, semestral, trimestral e mensal, frente ao método padrão FAO-PM, com base em extensa série histórica de dados meteorológicos diários (86 anos), para a localidade de Sete Lagoas, MG. Calibraram-se os coeficientes e o expoente da equação de HS pela minimização do erro absoluto médio (EAM). Para avaliar a adequabilidade de aplicação de testes comparativos e para determinar o ajuste das distribuições de probabilidade de ET_o, foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov e Mann-Whitney, respectivamente. A calibração do método HS anulou a tendência de superestimativa sistemática dos valores de ET_o diária, comparativamente ao FAO-PM, reduzindo-se o EAM. A calibração em diferentes bases temporais acarretou a aproximação das distribuições de probabilidade de ET_o calculada por meio do método HS, que não diferiram significativamente entre si, à obtida com o método FAO-PM.

Keywords:

probability distribution
reference evapotranspiration
FAO Penman-Monteith

HARGREAVES-SAMANI EQUATION CALIBRATED IN DIFFERENT TIME BASES FOR SETE LAGOAS, MG, BRAZIL**ABSTRACT**

Reference evapotranspiration (ET_o) data are required in several analysis related to the use of water resources, such as irrigation management, rainfall water balance, watershed management, etc. The FAO Penman-Monteith method (FAO-PM) is considered the standard for calculating ET_o. However, the application of this method may be restricted by the lack of meteorological data. One of the alternative methods with the lowest data requirement is Hargreaves-Samani (HS), which usually needs local calibration for greater accuracy in the application. This study aimed to evaluate the performance of the Hargreaves-Samani method in its original form and calibrated in an annual, semester, quarterly and monthly basis, in comparison to the FAO-PM standard method, based on an extensive historical series of daily meteorological data (86 years) collected in the city of Sete Lagoas, MG. The coefficients and the exponent of the HS equation were calibrated by minimizing the mean absolute error (MAE). The Kolmogorov-Smirnov and Mann-Whitney tests, respectively, were used to evaluate the suitability of comparative tests and to determine the ET_o probability distribution adjustments. The calibration of the HS method nullified the trend of systematic overestimation of the daily ET_o values, compared to FAO-PM, reducing the MAE. Calibration at different time bases led to the approximation of the probability distributions of ET_o calculated using the HS method. These data did not differ significantly from each other in comparison to that obtained with the FAO-PM method.

INTRODUÇÃO

O método padrão para calcular a evapotranspiração de referência, E_{To} , consiste na aplicação da equação Penman-Monteith a uma cultura hipotética, com altura média de 0,12 m, resistência da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. Esse método, denominado FAO Penman-Monteith, requer o conhecimento das informações meteorológicas relativas à radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2015).

O conhecimento da E_{To} é requerido em diversas análises relacionadas ao uso de recursos hídricos, como o estudo de estratégias de manejo de irrigação, dimensionamento de sistemas de irrigação e/ou drenagem, zoneamento agropecuário e ecológico, balanço hídrico de sequeiro, manejo de bacias hidrográficas, entre outras. Alguns estudos requerem séries históricas de variáveis meteorológicas, enquanto em outros, como a definição do manejo de irrigação, necessita-se do conhecimento dessas variáveis no decorrer do ciclo agrícola. A E_{To} é um dos mais úteis indicadores do requerimento hídrico para determinação de um manejo eficiente de irrigação (BERTI et al., 2014).

O requerimento de ampla base de dados meteorológicos impõe restrições, em muitas situações, à aplicação do método FAO Penman-Monteith, indicando a necessidade do uso de métodos alternativos (GHAMARNIA et al., 2011; BORGES JÚNIOR et al., 2012; TALAEE, 2014). Estações meteorológicas podem não prover todos os dados necessários à aplicação do método padrão, seja por não terem o conjunto de equipamentos necessários ou pela ocorrência de falhas no funcionamento de sensores ou em registros. Observa-se que o maior custo impõe dificuldades à aquisição de estações meteorológicas mais sofisticadas e completas, especialmente por pequenos produtores.

O método Hargreaves-Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1985) tem como requerimento básico dados de temperatura do ar, sendo uma alternativa quando dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento não estão disponíveis. Conforme Allen et al. (1998), a

equação de Hargreaves-Samani acarreta tendência em subestimar a E_{To} em condição de elevada velocidade de vento (superior a 3 m s^{-1} a 2 m sobre o nível do solo) e de superestimar em condição de alta umidade relativa. Comentam ainda que esta equação pode ser ajustada localmente, calibrando-se os coeficientes angular e linear por meio de análise de regressão, em base mensal ou anual.

Estudos relativos à calibração da equação de Hargreaves-Samani, utilizando-se diferentes técnicas e bases temporais, têm sido desenvolvidos para diferentes países e cenários. Ghamarnia et al. (2011) calibraram a equação de Hargreaves-Samani para regiões semiáridas no oeste do Irã. Seus resultados indicaram que as médias mensais e anuais obtidas com o método Hargreaves-Samani, localmente calibrado, foi significativamente correlacionada com as obtidas pelo método FAO Penman-Monteith. Martinez e Thepadia (2010) empregaram o método Hargreaves-Samani sem calibração, entre outros, a dados de 72 estações meteorológicas da Flórida, EUA, tendo verificado que os maiores erros ocorreram para estações localizadas em porções interiores do estado e em ilhas, com tendência de superestimar a evapotranspiração de referência. Berti et al. (2014) examinaram possibilidade de calibração da equação de Hargreaves-Samani para a região de Veneto, no nordeste da Itália, tendo verificado redução drástica da tendência de superestimativa por meio da calibração. Melhorias no desempenho do método, decorrentes de calibração, foram também relatadas em estudo para outras regiões em diferentes continentes (VEGA & JARA, 2009; BORGES JÚNIOR et al., 2012; RAVAZZANI et al., 2012; BOGAWSKI & BEDNORZ, 2014; PATEL et al., 2015).

Em hipótese, a variação na base temporal na qual pode ser desenvolvida a calibração pode influenciar a exatidão de estimativas da E_{To} por métodos alternativos. A divisão do conjunto de dados diários em semestres, trimestres ou meses implica na obtenção de calibrações específicas para as respectivas bases temporais, o que pode contribuir para a redução do erro absoluto médio, melhorando o ajuste entre distribuições de valores da E_{To} obtidas com o método padrão e o alternativo proposto. Entretanto, quanto mais reduzida a base

temporal, maior complexidade é associada ao processo de calibração e maior será o número de equações calibradas para o método alternativo, aspecto que se torna mais relevante quanto maior o número de estações estudadas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do método Hargreaves-Samani, na sua forma original e calibrado em base anual, semestral, trimestral e mensal, frente ao método padrão FAO Penman-Monteith, com base em extensa série histórica de dados meteorológicos diários, para a localidade de Sete Lagoas, MG. Além da aplicação de indicadores de exatidão e precisão, comumente empregados em estudos de ajustes de modelos, propõe-se a verificação de ajustes das distribuições de probabilidade e de concentração de desvios.

MATERIAL E MÉTODOS

Trabalhou-se com dados meteorológicos coletados em base diária na estação meteorológica convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Sete Lagoas, Estado de Minas Gerais, Brasil, com latitude de 19,48° Sul, longitude de 44,17° Oeste e altitude de 732 m. O clima da região é caracterizado como tropical chuvoso, com inverno seco, tendo estação chuvosa predominantemente no período de outubro a março. O clima é mesotérmico úmido, do tipo Cwa conforme a classificação de Köppen (PANOSO *et al.*, 2002; ALVARES *et al.*, 2013).

Foi utilizada uma série histórica de dados climáticos de 86 anos, de 1927 a 2013, constituída das seguintes variáveis meteorológicas: temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), número de horas de brilho solar (n), velocidade média do vento medida a 10 m do nível do solo (U) e umidade relativa média do ar (UR).

Na estação, tem-se como rotina a verificação da T_{max} às 00:00 UTC e da T_{min} às 12:00 UTC. A temperatura média diária (T_{med}) foi calculada por meio da média entre T_{max} e T_{min} . Os valores de umidade relativa média foram obtidos somando-se as umidades relativas às 12:00, 18:00 e duas vezes às 00:00 UTC, sendo essa soma dividida por

quatro. A velocidade do vento foi ajustada para a altura de 2 m do nível do solo, conforme Allen *et al.* (1998).

Desenvolveu-se a análise de consistência dos dados meteorológicos em planilha eletrônica (Microsoft® Excel® 2016), complementada com análise gráfica das variáveis ao longo do tempo. Valores de n superiores à duração astronômica do período diurno (N), ou seja, ao máximo número de horas de brilho solar diário, calculado conforme Allen *et al.* (1998), foram identificados e tratados como inconsistências. Como recomendado por Allen (2013), foi considerado como limite inferior, para a velocidade do vento à 2 m altura, o valor de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Dados inconsistentes foram excluídos.

Para o período de 1927 a 2011 foram identificadas faltas de dados de até três dias, que foram preenchidas pela média dos dias imediatamente anterior e posterior, considerando-se que tais dados são requerimento mínimo ao estudo. Entretanto, para sequências com falhas superiores a três dias, os dias foram removidos das análises. Para os anos de 2011 a 2013, 82 falhas verificadas nos dados de T_{min} foram preenchidas com dados de uma estação automática da marca Metos, modelo μ Metos, localizada a 2,45 km da estação do INMET, após ter sido verificado coeficiente de correlação de 0,91 e erro absoluto médio de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ entre séries de valores obtidos nas duas estações. Considerando-se o total de faltas, houve uma redução de 2% do total de 31.777 dias da série.

A análise aplicada aos dados de precipitação pluvial (P) foi conduzida separadamente, visando a auxiliar na caracterização climática local e considerando-se que a exclusão de valores diários decorrente da falta de registro de outro elemento meteorológico acarretaria perdas de informação para totalização de valores mensais. A precipitação pluvial diária acumulada foi coletada às 12:00 UTC, sendo que a série de dados correspondeu aos anos de 1927 a 2013.

À base de dados organizada em planilha eletrônica, aplicou-se os métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani em base diária. Para o método FAO Penman-Monteith, a ETo foi calculada por meio da equação descrita a seguir (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ETo = \frac{0,408 \ddot{A}(R_n - G) + \ddot{a} \frac{900}{T_{med} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\ddot{A} + \ddot{a} (1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

em que,

ETo = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;
 Δ = declividade da curva de pressão de vapor na saturação versus temperatura do ar, kPa °C⁻¹;
 R_n = saldo de radiação, MJ m⁻² d⁻¹;
 G = densidade de fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;
 γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹;
 U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;
 e_s = pressão de vapor na saturação, kPa; e
 e_a = pressão de vapor atual, kPa.

O saldo diário de radiação na superfície do cultivo (R_n) foi obtido a partir da diferença entre o saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) e o saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}), utilizando-se a fórmula de Angstrom para cálculo da radiação solar de ondas curtas (R_s), conforme Allen et al. (1998). Considerou-se como nulo o fluxo de calor no solo contabilizado em base diária.

Para o método Hargreaves-Samani, aplicou-se a equação:

$$ETo = A_{HS} R_a (T_{max} - T_{min})^{B_{HS}} (T_{med} + C_{HS}) \quad (2)$$

em que,

R_a = radiação solar extraterrestre recebida em uma superfície horizontal, expressa em equivalente de evaporação, mm d⁻¹; e
 A_{HS} , C_{HS} , B_{HS} = respectivamente, os valores originais 0,0023, 17,8 e 0,5 (HARGREAVES & SAMANI, 1985; ALLEN, 2013).

A calibração do método de Hargreaves-Samani consistiu na busca do conjunto de valores de A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} que acarretasse a minimização do erro absoluto médio, calculado como:

$$EAM = N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} |P_i - O_i| \quad (3)$$

em que,

EAM = erro absoluto médio, mm d⁻¹;
 N_d = número de pares de dados;
 P_i = valor de ETo estimado pelo método avaliado

(Hargreaves-Samani), mm d⁻¹; e

O_i = valor de ETo calculado pelo método padrão FAO Penman-Monteith, mm d⁻¹

Na calibração, foram considerados os valores originais de A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} como valores iniciais. A ferramenta Solver da planilha eletrônica Excel foi empregada para minimização do EAM. Observa-se que o erro absoluto médio foi adotado por ser considerado a mais natural medida do erro médio e por não apresentar ambiguidades (WILLMOTT & MATSUURA, 2005).

As calibrações foram desenvolvidas com base anual, semestral, trimestral e mensal. Na base semestral, foram considerados os semestres de outubro a março, como de primavera-verão, e de abril a setembro, como outono-inverno. Para a base trimestral, foram considerados os conjuntos janeiro a março, abril a junho, julho a setembro e outubro a dezembro. Para o método padrão e para o método Hargreaves-Samani, na forma original e com coeficientes calibrados em base anual, semestral, trimestral e mensal, computaram-se a média, valores máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação.

Além do erro absoluto médio, também se calculou o coeficiente de correlação para os dados resultantes da aplicação do método Hargreaves-Samani em relação aos obtidos com o método FAO Penman-Monteith, na sua forma original e para as quatro calibrações feitas (anual, semestral, trimestral e mensal). Os resultados da análise estatística descritiva foram computados para cada mês, assim como as médias mensais da evapotranspiração de referência diária.

A fim de se analisar a adequabilidade de aplicação de testes comparativos paramétricos ou não paramétricos, verificou-se o ajuste à distribuição Normal das distribuições dos valores diários de ETo, obtidos com os métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani na forma original e calibrado em diferentes bases temporais. Nessa análise, empregou-se o programa @RISK (Palisade Corporation), versão 6.3.1, aplicando-se o teste Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de significância.

Aplicou-se os testes Mann-Whitney, ao nível de 5% de significância, para avaliar o ajuste entre

as distribuições de probabilidade dos valores diários de ETo, obtidas com o método padrão FAO Penman-Monteith e com o método Hargreaves-Samani com calibração em base anual. Esse teste também foi aplicado para comparar a distribuição de probabilidade dos valores diários de ETo, obtida com o método Hargreaves-Samani calibrado em base anual, com as distribuições obtidas com este método, mas com calibrações em base semestral, trimestral e anual. O teste de Mann-Whitney foi processado por meio da aplicação dos programas StatTools versão 6.3.1, componente do pacote DecisionTools Suíte (Palisade Corporation), e R versão 3.2.0. A utilização dos dois programas possibilitou a checagem dos valores-P obtidos.

Verificou-se a concentração dos desvios entre dados diários de ETo, obtidos com os métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani sem calibração e calibrado em base anual, semestral, trimestral e mensal. Essa análise de concentração foi feita a partir de distribuições de probabilidade acumulada, sendo relativa ao intervalo entre -1 e 1 mm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentadas as médias mensais e anuais das variáveis climáticas consideradas no

estudo. Observa-se a distinção entre os semestres de primavera-verão, de outubro a março, em que se verificam maiores temperaturas médias, radiação de ondas curtas e precipitação pluviométrica, comparativamente ao semestre de outono-inverno. As amplitudes entre as médias mensais de temperaturas máximas e mínimas são mais elevadas nesse semestre, variando de 12,3 °C em abril a 15,5 °C em agosto.

Os coeficientes e o expoente da equação de Hargreaves-Samani são apresentados na Tabela 2. As variações nos valores de A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} , foram de 0,00098 a 0,00408; de 0,102 a 0,774 e de -3,210 a 38,936, respectivamente. Bogawski e Bendroz (2014) verificaram que o melhor desempenho do método, para estações na Polônia, foi obtido com A_{HS} igual a 0,001, B_{HS} igual a 0,724 e C_{HS} igual a 17,0, valores estes presentes nos intervalos verificados neste estudo. Trajkovic (2007) encontrou o valor de B_{HS} igual a 0,424, tendo verificado forte redução na tendência de superestimativa, observada com a forma original do método para a região dos Bálcãs, no sudeste europeu, após a calibração. Borges Júnior et al. (2012), em trabalho com dados do Agreste Meridional Pernambucano, obtiveram os seguintes resultados de calibração: A_{HS} = 0,0013, B_{HS} = 0,76, C_{HS} = 17,76, para o semestre primavera-verão, e A_{HS} = 0,0014, B_{HS} = 0,74, C_{HS}

Tabela 1. Médias mensais e anuais das variáveis meteorológicas, obtidas a partir da série histórica (1927 a 2013) para Sete Lagoas, MG

Período	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	T _{med} (°C)	n (h d ⁻¹)	UR (%)	U ₂ (m s ⁻¹)	R _s (MJ m ⁻² d ⁻¹)	ETo (mm)	P (mm)
jan	29,1	18,2	23,7	6,3	77,5	1,2	20,5	4,2	265,4
fev	29,7	18,2	23,9	7,1	76,2	1,1	21,3	4,3	169,5
mar	29,3	17,8	23,6	7,0	76,9	1,1	19,7	3,9	155,8
abr	28,3	16,1	22,2	7,9	75,5	1,1	18,6	3,4	58,1
mai	26,9	13,4	20,2	8,3	73,6	1,0	16,7	2,8	22,3
jun	26,2	11,6	18,9	8,6	71,3	1,1	15,8	2,5	7,7
jul	26,1	11,1	18,6	8,8	67,1	1,2	16,6	2,8	9,0
ago	27,8	12,3	20,1	9,1	60,9	1,4	19,1	3,6	8,3
set	29,0	14,9	21,9	7,5	60,9	1,6	19,4	4,1	36,0
out	29,2	16,9	23,1	6,6	66,8	1,5	19,9	4,3	98,8
nov	28,5	17,7	23,1	6,0	74,2	1,3	19,7	4,1	209,8
dez	28,2	18,2	23,2	5,3	78,7	1,2	19,0	3,9	304,6
anual	28,2	15,5	21,9	7,4	71,7	1,2	18,8	3,7	1.345,2

* T_{max} = temperatura máxima; T_{min} = temperatura mínima; T_{med} = temperatura média; n = horas de brilho solar; UR = umidade relativa média diária; U₂ = velocidade do vento a 2 m de altura, média diária; R_s = radiação de ondas curtas; ETo = evapotranspiração de referência diária calculada pelo método FAO Penman-Monteith; P = precipitação total no período

= 17,79, para o semestre outono-inverno. Observa-se que naquele estudo a variação entre os valores calibrados por semestre foi consideravelmente menor que as indicadas para calibração semestral vista na Tabela 2.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de erro absoluto médio (EAM) e os coeficientes de correlação (r), obtidos para a aplicação do método Hargreaves-Samani original e calibrado nas diferentes bases temporais. Observa-se que a calibração, em qualquer base temporal, acarretou expressiva redução do EAM, que é uma medida de exatidão. Alencar et al. (2015) obtiveram EAM variando de 0,63 a 1,26 mm d⁻¹, com a aplicação do método Hargreaves-Samani, sem calibração, em estações do estado de Minas Gerais. Melo e Fernandes (2012) obtiveram EAM de 0,96 mm d⁻¹ para Uberaba, MG, também para o método sem calibração. A média de valores mensais de EAM verificada na Tabela 3, para a situação sem calibração, foi de 0,86 mm d⁻¹. A exatidão do método, sem a calibração, depende fortemente do

clima local, especialmente em relação à variação da umidade relativa e vento (ALLEN et al., 1998). A calibração possibilitou que a média de valores mensais de EAM variasse de 0,43 mm d⁻¹, para calibração mensal, a 0,47 mm d⁻¹, para calibração anual, indicando expressiva melhoria na exatidão do método.

Na Tabela 3, observa-se que não se verificou tendência resultante da calibração sobre o coeficiente de correlação, que se trata de uma medida de precisão. Os coeficientes de correlação (r) variaram entre 0,43 e 0,87, com os menores valores verificados para os meses de maio a setembro, de mais baixa demanda evapotranspirométrica. Os coeficientes de correlação gerais obtidos foram iguais a 0,84, para o método sem calibração, 0,85 com a calibração anual, e 0,86 para as demais calibrações. Palaretti et al. (2014), aplicando o método Hargreaves-Samani sem calibração a localidades do estado de São Paulo, sem agrupamentos temporais, obtiveram coeficientes de correlação variando de 0,76 a 0,98.

Tabela 2. Parâmetros calibrados da equação de Hargreaves-Samani (coeficientes A_{HS} e C_{HS} e expoente B_{HS}), em diferentes bases temporais, para Sete Lagoas, MG

Base de calibração	Período de calibração	Parâmetro calibrado		
		A_{HS}	B_{HS}	C_{HS}
Anual	Ano	0,00173	0,639	8,292
Semestral	Outubro a março	0,00140	0,751	6,012
	Abril a setembro	0,00337	0,346	12,233
Trimestral	T1 - janeiro a março	0,00173	0,762	-0,280
	T2 - abril a junho	0,00388	0,340	7,729
	T3 - julho a setembro	0,00337	0,296	18,085
	T4 - outubro a dezembro	0,00119	0,744	11,803
Mensal	janeiro	0,00195	0,762	-3,210
	fevereiro	0,00186	0,774	-2,468
	março	0,00147	0,736	5,948
	abril	0,00252	0,500	8,683
	maio	0,00341	0,293	15,685
	junho	0,00408	0,147	23,060
	julho	0,00398	0,102	32,030
	agosto	0,00368	0,172	30,616
	setembro	0,00135	0,484	38,936
	outubro	0,00098	0,681	27,044
	novembro	0,00115	0,751	12,410
	dezembro	0,00168	0,757	0,538

Tabela 3. Erro absoluto médio (EAM, mm d⁻¹) e coeficiente de correlação (r), obtidos para o método Hargreaves-Samani original (Orig.) e calibrado em diferentes bases temporais

Mês	Calibração					Calibração				
	Orig.	Anual	Semestral	Trimestral	Mensal	Orig.	Anual	Semestral	Trimestral	Mensal
	EAM					r				
jan	1,12	0,56	0,53	0,53	0,52	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
fev	0,99	0,55	0,53	0,53	0,53	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
mar	0,90	0,47	0,47	0,47	0,47	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81
abr	0,68	0,37	0,36	0,37	0,35	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76
mai	0,68	0,31	0,28	0,27	0,27	0,67	0,65	0,69	0,68	0,69
jun	0,69	0,30	0,26	0,24	0,23	0,43	0,43	0,47	0,47	0,47
jul	0,63	0,36	0,30	0,30	0,27	0,46	0,44	0,49	0,50	0,53
ago	0,62	0,48	0,42	0,39	0,37	0,58	0,56	0,61	0,62	0,62
set	0,81	0,59	0,57	0,57	0,55	0,67	0,66	0,65	0,64	0,67
out	0,99	0,59	0,61	0,60	0,59	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78
nov	1,07	0,55	0,55	0,54	0,54	0,83	0,84	0,84	0,84	0,84
dez	1,16	0,53	0,50	0,51	0,50	0,86	0,86	0,87	0,86	0,87

Melo e Fernandes (2012) obtiveram r de 0,88 para o método aplicado sem calibração. A forte correlação, independente da calibração, se deve à consideração na equação de Hargreaves-Samani das temperaturas máxima, mínima e média, além da radiação extraterrestre, variáveis essas às quais a evapotranspiração de referência sofre elevada sensibilidade.

Na Figura 1 são apresentadas as médias mensais de ETo, obtidas por meio da aplicação do método Hargreaves-Samani sem calibração e calibrado em base anual, semestral, trimestral ou mensal. Comparativamente às médias obtidas com o método FAO Penman-Monteith (Tabela 1), observa-se que os desvios percentuais variaram de 14,8% a 28,8% para o método original. Para as médias mensais, a calibração possibilitou forte redução nos erros percentuais, que variaram de -5,3 a 2,9%, -5,9 a 4,3%, -3,0 a 3,2% e -0,8 a 1,1%, respectivamente, para calibração anual, semestral, trimestral e mensal. Patel et al. (2015) calibraram com base em lógica Fuzzy a equação de Hargreaves-Samani para localidades na Índia, tendo verificado que a calibração propiciou melhoria no desempenho do método quanto à estimativa de médias mensais da evapotranspiração de referência diária.

Identificou-se pelo teste Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de significância, que para nenhum dos métodos considerados houve aderência à distribuição Normal, para a ETo diária. Obtiveram-se valores da estatística do teste

variando de 0,0529, para o método Hargreaves-Samani com calibração anual, a 0,0761, para o método FAO Penman-Monteith, sendo que o valor tabelado correspondente ao nível de significância considerado e ao total de 31.132 dados foi de 0,0109. O agrupamento de dados diários em maiores intervalos tende a provocar redução na variabilidade e expectativa de ajuste à distribuição Normal. Souza et al. (2014), ao analisar o ajuste de diferentes distribuições a dados decendiais de ETo para Ponta Grossa, PR, verificaram que a função densidade de probabilidade Normal foi a que possibilitou melhor ajuste, seguida da distribuição Gama. Silva et al. (2015) verificaram que as distribuições Normal e Gama se ajustaram a períodos de 10, 15 e 30 dias a dados de ETo para Petrolina, PE, mas a aderência não foi constatada para períodos de 5 dias.

São apresentados na Tabela 4 os dados relativos à estatística descritiva aplicada às distribuições de probabilidade da ETo diária, obtida com os métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani original e calibrado em base anual, semestral, trimestral e mensal. Observa-se que as médias obtidas com o método Hargreaves-Samani calibrado foram próximas ou equivalentes à obtida com o método padrão. Contudo, verifica-se superestimativa da média obtida pelo método Hargreaves-Samani original em relação ao método FAO Penman-Monteith. Tendência similar ocorre em relação à moda e à mediana. As distribuições

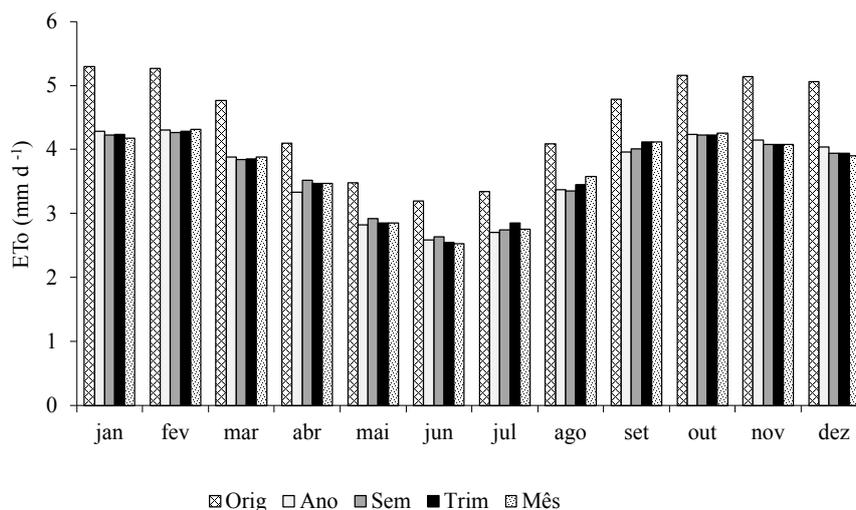


Figura 1. Médias mensais de evapotranspiração de referência (ETo), obtidas com a aplicação da equação de Hargreaves-Samani original (sem calibração, HSortig) e calibrada em base anual (HSanual), semestral (HSsem), trimestral (HStrim) e mensal (HSmes).

Tabela 4. Mínimo, máximos, média, moda, mediana, desvio padrão (σ) e coeficientes de assimetria e curtose relativos às distribuições de probabilidade da evapotranspiração de referência diária obtida com os métodos FAO Penman-Monteith (PM) e Hargreaves-Samani, calibrado em base anual (HSanual), semestral (HSsem), trimestral (HStrim) e mensal (HSmes) e na forma original (HSorig)

Método	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Média (mm)	Moda (mm)	Mediana (mm)	σ (mm)	Assimetria	Curtose
PM	1,10	8,43	3,66	2,72	3,47	1,13	0,40	2,25
HSanual	0,40	7,63	3,64	2,82	3,56	0,98	0,24	2,44
HSsem	0,57	8,20	3,64	2,80	3,53	0,97	0,43	2,80
HStrim	0,59	7,99	3,66	2,72	3,55	0,98	0,39	2,74
HSmes	0,58	8,01	3,66	2,65	3,58	0,99	0,37	2,63
HSorig	0,80	8,33	4,47	3,45	4,42	1,07	0,16	2,23

se mostram ligeiramente positivas em relação à assimetria e com curtose inferior à relativa e à distribuição Normal, igual a 3. Observa-se também que valores máximos e mínimos obtidos com o método Hargreaves-Samani são inferiores aos obtidos com o método FAO Penman-Monteith.

Na Figura 2 são apresentadas as distribuições de probabilidade acumulada empíricas dos valores de ETo, obtidos com os métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, na forma original e calibrado em base anual, semestral, trimestral e mensal. Constata-se que as distribuições de probabilidade acumulada para o método Hargreaves-

Samani com diferentes calibrações apresentam-se quase sobrepostas, situando-se ligeiramente à direita da distribuição para o método FAO Penman-Monteith até aproximadamente o percentil 60% e, a partir deste, ligeiramente à esquerda. A distribuição de probabilidade acumulada para o método Hargreaves-Samani original situa-se claramente à direita, dominando estocasticamente as demais e indicando forte tendência em superestimar, o que corrobora os dados apresentados nas Tabelas 1 e 4 e Figura 1. A tendência de superestimativa no cálculo da ETo pela forma original da equação de Hargreaves-Samani, especialmente em regiões de

clima úmido ou subúmido, tem sido verificada por diferentes autores (MELO & FERNANDES, 2012; BOGAWSKI & BEDNORZ, 2014; PALARETTI et al., 2014; ALENCAR et al., 2015).

Como resultados do teste Mann-Whitney, ao nível de significância de 5%, aplicado para comparação entre as distribuições de probabilidade da evapotranspiração de referência diária, verifica-se a rejeição da hipótese de nulidade, isto é, de ajuste entre as distribuições referentes aos métodos FAO Penman-Monteith e Hargreaves-Samani calibrado em base anual. Obteve-se neste teste o valor-P igual a 0,0028. Por outro lado, constatou-se o ajuste entre as distribuições de valores diários de E_{To} , obtidos com o método Hargreaves-Samani calibrado em diferentes bases, corroborando as percepções a partir da Figura 2. Os valores-P obtidos foram 0,6009; 0,1974 e 0,4495, respectivamente, na comparação da distribuição da E_{To} , obtida com o método Hargreaves-Samani calibrado em base anual, com as distribuições obtidas pela aplicação desse método calibrado em base semestral, trimestral e mensal.

Estudos tem indicado tendências de subestimação ou superestimação do método Hargreaves-Samani, respectivamente, em locais de elevada velocidade de vento e alta umidade relativa (ALLEN et al., 1998; ALENCAR et al., 2015). Assim, espera-se que a calibração em menores bases temporais possibilite ganhos de exatidão mais expressivos em locais em que ocorram maior variabilidade sazonal nos

dados meteorológicos. Por outro lado, anomalias no padrão sazonal dos elementos meteorológicos, como aquelas verificadas na ocorrência do fenômeno El-Niño (ESNO), podem, a princípio, acarretar perda de exatidão do método Hargreaves-Samani calibrado para estações ou períodos específicos. Esta possibilidade, contudo, não foi detectada para a estação estudada, na análise dos desvios.

Na Figura 3 são apresentadas as funções densidade de probabilidade empíricas de desvios entre valores diários de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith e com o método Hargreaves-Samani original (sem calibração) e calibrado em base anual, semestral, trimestral e mensal. Verificou-se elevadas concentrações de desvios entre -1 e 1 mm, sendo 64,0%, 90,8%, 91,1%, 91,4% e 91,7%, respectivamente, para o método Hargreaves-Samani na forma original e com calibração anual, semestral, trimestral e mensal. Observa-se que há incremento considerável nas concentrações dos desvios entre -1 e 1 mm, propiciado pela calibração da equação de Hargreaves-Samani em relação ao método original. Incrementos menos expressivos são obtidos a partir da redução do período de calibração. Por meio desta figura, novamente se verifica a tendência de superestimação pela aplicação do método Hargreaves-Samani em relação ao método original, para a estação analisada, bem como a equivalência na exatidão obtida com a aplicação da calibração em diferentes bases temporais.

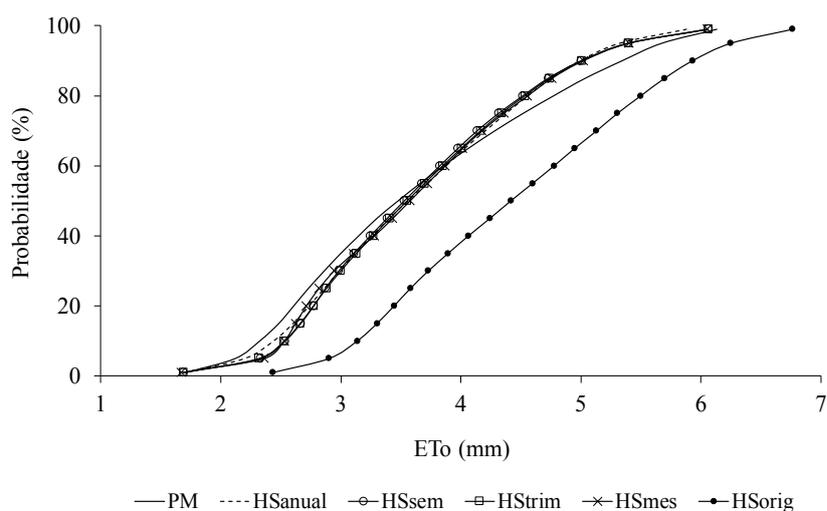


Figura 2. Distribuições de probabilidade acumulada empíricas dos valores de evapotranspiração de referência (E_{To}) obtidos com os métodos FAO Penman-Monteith (PM) e Hargreaves-Samani, calibrado em base anual (HSanual), semestral (HSsem), trimestral (HStrim) e mensal (HSmes) e na forma original (HSortig).

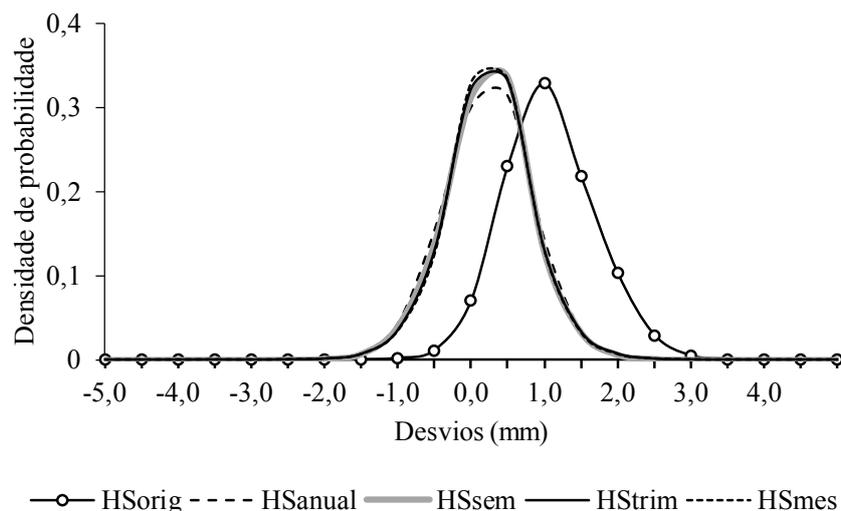


Figura 3. Funções densidade de probabilidade empíricas de desvios entre valores diários de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith e com o método Hargreaves-Samani original (sem calibração, HStrim) e calibrado em base anual (HSanual), semestral (HSsem), trimestral (HStrim) e mensal (HSmes).

CONCLUSÕES

- Verificou-se forte tendência de superestimativa no cálculo da evapotranspiração de referência em base diária com a aplicação do método Hargreaves-Samani não calibrado, em comparação ao método padrão FAO Penman-Monteith.
- A calibração do método Hargreaves-Samani, em todas as bases temporais, anulou a tendência de superestimativa sistemática dos valores de evapotranspiração de referência diária calculada por este método comparativamente à calculada pelo método FAO Penman-Monteith.
- Não houve diferença significativa entre as distribuições de probabilidade de valores de evapotranspiração de referência diária calculada por meio do método Hargreaves-Samani calibrado em diferentes bases temporais, para a estação meteorológica estudada.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG pelo apoio concedido ao projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G.C.; MANTOVANI, E.C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.35, n.1, p.39-50, jan./fev. 2015. doi: dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p39-50/2015.
- ALLEN, R.G. **REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations**. Idaho, United States: University of Idaho, 2013. 91p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p.711-728, 2013. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BERTI, A.; TARDIVOVA, G.; CHIAUDANIB, A.;

- RECHC, F.; BORINA, M. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. **Agricultural Water Management**, v.140, p.20-25, abr. 2014. doi: dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.015.
- BOGAWSKI, P.; BEDNORZ, E. Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe). **Water Resource Management**, v.28, n.14, p.5021-5038, nov. 2014. doi: 10.1007/s11269-014-0787-8.
- 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**, Campina Grande, v.16, n.4, p.380-390, abr. 2012. doi: 10.1590/S1415-43662012000400008.
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. In: WINTER MEETING, 1985, Chicago. **Anais...** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1985.
- MARTINEZ, C.J.; THEPADIA, M. Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.136, n.7, 2010. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000214.
- MELO, G.L.; 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, set./out. 2012.
- PALARETTI, L.F.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões citrícolas paulistas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.1, jan./fev. 2014. doi: 10.1590/S0100-69162014000100005.
- PANOSO, L.A.; RAMOS, D.P.; BRANDÃO, M. Solos do Campo Experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n.5, 2002. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/338497/1/bpd052002milhosorgo.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.
- PATEL, J.; PATEL, H.; BHATT, C. Modified Hargreaves Equation for Accurate Estimation of Evapotranspiration of Diverse Climate Locations in India. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, India, v.85, n.1, 2015. doi: 10.1007/s40011-014-0314-y.
- PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, 2015. doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.
- 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**, Reston, v.138, n.7, 2012. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000453.
- SILVA, A.O.; CORREIA, J.S.; BASSOI, L.H.; TEIXEIRA, A.H.C. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v.9, n.1, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2015v9n1p30-38>.
- SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Irriga**, Botucatu, v.19, n.2, abr./jun. 2014. doi: dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n2p279.
- 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, may 2014. doi: 10.1007/s00703-014-0333-5.
- TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston,

v.133, n.1, 2007. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38).

[dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000300006](https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000300006).

VEGA, E.C.; JARA, J.C. Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.3, jul.set. 2009. doi:

WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, Oldendorf-Luhe, v.30, n.1, p.79-82, 2005.