

Ajuste da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração no Estado do Pará

Adjustment of the Hargreaves e Samani equation to estimate evapotranspiration in the State of Pará

Camila Duane Correa Gaia¹  ; Enzo Dal Pai² 

¹Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS/PA), Diretoria de Mudanças Climáticas, Travessa Lomas Valentinas, 2717, 66093-677, Belém, PA, Brasil; ² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Engenharia Rural, Rua José Barbosa de Barros, 1780, 18.610-307, Botucatu, SP, Brasil. *corresponding author: camilagaia7@gmail.com

Recebido: 15/03/2023

Aceito: 12/08/2024

Publicado: 05/09/2024

Resumo:

O estudo da evapotranspiração de referência é importante para o manejo adequado dos recursos hídricos e para o planejamento agrícola da Região Amazônica. Por isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a equação de Hargreaves e Samani no Estado do Pará, e propor ajustes locais de seus parâmetros em relação à equação de Penman-Monteith. O ajuste foi feito com base no coeficiente de desempenho elaborado por Sentelhas e Camargo. Observou-se que temperatura do ar e radiação solar foram os componentes que mais contribuíram para justificar as variações ao longo do ano da evapotranspiração de referência. A equação de Hargreaves e Samani, na sua forma original, apresentou bom desempenho, que foi melhorado com ajuste local. Recomenda-se o uso da equação de Hargreaves e Samani original ou ajustada localmente para o cálculo da evapotranspiração de referência no Estado do Pará, nos casos em que a utilização da equação de Penman-Monteith é inviável.

Palavras-chave: Radiação solar, Temperatura, Clima úmido, Penman-Monteith.

Abstract:

The study of reference evapotranspiration is important for the proper management of water resources and for agricultural planning in the Amazon region. Therefore, the objective of this work was to evaluate the Hargreaves and Samani equation in the State of Pará, and to propose local adjustments of their parameters in relation to the Penman-Monteith equation. The adjustment was made based on the performance coefficient prepared by Sentelhas and Camargo. It was observed that air temperature and solar radiation were the components that most contributed to justify the variations throughout the year of the reference evapotranspiration. The Hargreaves and Samani equation, in its original form, performed well, which was further improved with local adjustment. The use of the original or locally adjusted Hargreaves and Samani equation is recommended for the calculation of reference evapotranspiration in the State of Pará, in cases where the use of the Penman-Monteith equation is not feasible.

Keywords: Solar radiation, Temperature, Humid climate, Penman-Monteith.

1. Introdução

A evapotranspiração de referência (ET_o) é definida como a mudança de estado físico da água da forma líquida para a gasosa, através de uma superfície natural gramada, padrão, sem restrição hídrica. Em situações quaisquer de umidade e de cobertura vegetal, chama-se de evapotranspiração real ou atual (ET_a) (Camargo; Camargo, 2000).

Desde a introdução do conceito de evapotranspiração foram desenvolvidos métodos por diversos autores para a estimativa da ET_o ao longo dos anos, com estimativas baseadas, sobretudo, na temperatura e radiação solar. No entanto, a FAO (Food and Agriculture Organization), adotou a equação desenvolvida por Penman-Monteith como padrão, devido a utilização de muitas variáveis biofísicas de entrada, tornando-a referência mundial e utilizada para comparar outros métodos de estimativa de ET_o (Allen *et al.*, 1998).

Entretanto, em situações de limitação na coleta de algumas variáveis que compõem a equação de Penman-Monteith não é possível o uso desse método. Além disso, diferente das outras regiões do País, a Região Norte como um todo possui poucos pontos de monitoramento climatológico devido ao acesso restrito em algumas localidades (Vila Nova *et al.*, 1976).

Equações mais simples, baseadas em temperatura e em radiação solar, por outro lado, são mais fáceis de serem implementadas, são exemplos as equações de Thornthwaite e Hargreaves e Samani (Camargo; Camargo, 2000), que apesar de não terem o mesmo desempenho da equação de Penman-Monteith, este pode ser melhorado através de ajustes locais.

Esforços neste sentido têm sido feitos como para o Estado do Ceará (Lima Junior *et al.*, 2016), para o Noroeste Paulista (Conceição, 2013), na Bahia (Santiago *et al.*, 2016), em Sergipe (Barros *et al.*, 2017), no Espírito Santo (Zanetti *et al.*, 2018), entre outros trabalhos realizados com ajustes locais para cidades e estados do Brasil.

Tendo a Amazônia um papel importante na climatologia do mundo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da equação de Hargreaves e Samani no Estado do Pará, e propor ajustes de seus parâmetros em relação a equação de Penman-Monteith. Estudos sobre a evapotranspiração são essenciais para o planejamento agrícola e manejo dos recursos hídricos da Região Amazônica.

2. Material e Métodos

No estudo foram utilizados dados oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) de 22 estações localizadas no Estado do Pará, conforme listadas na Tabela 01. Foram disponibilizados pelo Inmet dados horários de: temperatura do ar máxima, mínima e média; umidade relativa do ar máxima, mínima e média; radiação solar global; velocidade do vento a 10 metros de altura e precipitação.

Tabela 01. Estações automáticas do Estado do Pará utilizadas no estudo**Table 01.** Automatic stations of the State of Pará used in the study

Estações	Pontos	Latitude	Longitude	Atitude (m)	Ano de abertura	Número de dias
BELÉM	1	-1,4112	-48,439512	21,00	2003	3.529
BRAGANÇA	2	-1,0473	-46,785790	41,00	2008	3.096
CAMETÁ	3	-2,2397	-49,499827	10,00	2008	2.043
CAPITÃO POÇO	4	-1,7348	-47,057500	79,00	2011	1.960
CASTANHAL	5	-1,3009	-47,947967	47,00	2003	1.902
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	6	-8,3036	-49,282770	176,00	2008	2.999
ITAITUBA	7	-4,2770	-55,993087	24,00	2008	2.415
MARABÁ	8	-5,3664	-49,051166	117,00	2009	2.678
MINA PALITO	9	-6,3201	-55,787783	260,00	2010	1.525
MONTE ALEGRE	10	-2,0001	-54,076479	101,00	2012	1.771
NOVO REPARTIMENTO	11	-4,2440	-49,939308	101,00	2008	2.509
ÓBIDOS	12	-1,8808	-55,519856	90,00	2012	1.297
PACAJÁ	13	-3,8437	-50,638098	89,00	2008	1.929
PARAGOMINAS	14	-2,9904	-47,407833	113,00	2007	3.563
PLACAS	15	-3,8640	-54,216416	100,00	2008	2.818
RONDON DO PARÁ	16	-4,8275	-48,173556	203,00	2008	3.389
SALINÓPOLIS	17	-0,6189	-47,356596	23,00	2008	3.754
SANTANA DO ARAGUAIA	18	-9,3386	-50,350280	177,00	2008	3.146
SERRA DOS CARAJÁS	19	-6,0774	-50,142265	707,00	2008	2.789
SOURE	20	-0,7278	-48,515795	13,00	2008	3.396
TOMÉ-AÇU	21	-2,5926	-48,360585	43,00	2007	2.408
TUCURUÍ	22	-3,8228	-49,674956	138,00	2008	3.272

Os dados horários foram convertidos em dados diários através da linguagem R. Foram removidos dias com dados faltantes e com a radiação solar global abaixo de $2,0 \text{ MJ dia}^{-1}$ ou maior do que a radiação solar extraterrestre (R_a).

Para a estimativa da evapotranspiração de referência, a equação mundialmente aceita como padrão e parametrizada pela FAO é a de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que utiliza uma cultura hipotética semelhante a grama, com os seguintes parâmetros: altura de 0,12 m; albedo igual a 23% e resistência da cultura igual a 69 s m^{-1} .

As equações que se seguem podem ser encontradas no capítulo 2 do Boletim 56 intitulado “Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements” publicada pela FAO (ALLEN et al., 1998).

Inicialmente calcula-se a declinação solar (D_s), o ângulo solar horário (w_s), e a distância relativa terra-sol (d_r), conforme as Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$D_s = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} \text{DJ} - 1,39 \right) \quad (1)$$

$$w_s = \arccos (-\tan \varphi \tan D_s) \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} \text{DJ} \right) \quad (3)$$

em que:

D_s – declinação solar (rad); DJ – dia juliano (dia); w_s – ângulo solar horário (rad); φ – latitude (rad); e d_r – distância relativa terra-sol.

A radiação solar extraterrestre (r_a) é calculada conforme a Equação 4.

$$r_a = 37,59 d_r (w_s \sin \varphi \sin D_s + \cos \varphi \cos D_s \sin w_s) \quad (4)$$

Para o cálculo são necessários a pressão atmosférica (P, Equação 5), a constante psicométrica (γ , Equação 6) e a taxa de variação da pressão de saturação em função da temperatura (Δ , Equação 7).

$$P = 101,3 \left(\frac{293-0,0065}{293} z \right)^{5,26} \quad (5)$$

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{med}}{T_{med}+237,3} \right) \right]}{(T_{med}+237,3)^2} \quad (7)$$

em que:

P – pressão atmosférica (kPa); γ - constante psicométrica (kPa °C⁻¹); Δ – taxa de variação da pressão de saturação em função da temperatura (kPa °C⁻¹); z – é a altitude (m); e Tmed – temperatura do ar média (°C).

Posteriormente calcula-se a média da pressão parcial de vapor na saturação do ar (es) através das Equações 8, 9 e 10. A pressão atual de vapor (ea) é calculada através da Equação 11.

$$es_{m\acute{a}x} = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{m\acute{a}x}}{T_{m\acute{a}x}+237,3} \right) \quad (8)$$

$$es_{m\acute{i}n} = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{m\acute{i}n}}{T_{m\acute{i}n}+237,3} \right) \quad (9)$$

$$es = \frac{es_{m\acute{a}x} + es_{m\acute{i}n}}{2} \quad (10)$$

$$ea = \frac{UR_{med}}{100} es \quad (11)$$

em que:

es – pressão de saturação do ar (kPa); ea – pressão atual de vapor (kPa); esmáx – pressão de saturação do ar máxima (kPa); Tmáx – temperatura máxima do ar (°C); Tmín – temperatura mínima do ar (°C); e URmed – umidade relativa do ar média (%).

Para o balanço de ondas longas (Rnl) é necessário definir a radiação solar máxima (Rso), que pode ser feita através da Equação 12, utilizando os coeficientes de Angstrom com base na latitude. O balanço de ondas longas é calculado conforme a Equação 13.

$$R_{so} = (a+b) ra \quad (12)$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{m\acute{a}x}^4 + T_{m\acute{i}n}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{ea}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (13)$$

em que:

Rnl – balanço de ondas longas (MJ m⁻² dia⁻¹); Rso – radiação solar máxima (MJm⁻²dia⁻¹); a – coeficiente de Angstrom correspondente a fração da radiação difusa; b – coeficiente de Angstrom complementar que representa o total de radiação solar global; ra – radiação solar extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹); σ – constante de Stefan-Boltzmann (MJ k⁻⁴ m⁻² dia⁻¹).

O balanço de ondas curtas (Rns) é calculado com base na Equação 14. A partir do balanço de ondas curtas e longas, o saldo de radiação (Rn) pode ser calculado conforme a Equação 15. Finalmente, a equação de Penman-Monteith (Equação 16) é aplicada.

$$R_{ns} = 0,77 R_s \quad (14)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (15)$$

$$ET_{0(FAO)} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med}+273} U_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (16)$$

em que:

ET_o (FAO) – evapotranspiração de referência pela equação de Penman-Monteith (mm); R_{ns} – balanço de ondas curtas ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); R_s – radiação solar global ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); R_n – saldo de radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); G – fluxo de calor do solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); e U_2 – velocidade do vento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$)

Para a evapotranspiração calculada pelo método de Hargreaves e Samani foi utilizada a Equação 17.

$$ET_o\ (HS) = a\ R_s\ (b + T_{med}) \quad (17)$$

em que:

$ET_o\ (HS)$ – evapotranspiração de referência, equação de Hargreaves e Samani ($mm\ dia^{-1}$); $a = 0,0135$, $b = 0,408$ – os parâmetros que foram ajustados; T_{med} – temperatura média do ar ($^{\circ}C$); e R_s – radiação solar global ($MJ\ dia^{-1}$).

O comportamento da equação de Hargreaves e Samani foi quantificado através do coeficiente de correlação (r , Equação 18), do coeficiente de exatidão de Willmott (d , Equação 19), e do coeficiente de desempenho (c , Equação 20). A quantificação do erro foi obtida através da raiz quadrada do erro médio (RQEM).

$$r = \sqrt{\frac{\sum_i^n \frac{(P_i - O)^2}{N}}{r}} \quad (18)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_i^n (P_i - O_i)^2}{\sum_i^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (19)$$

$$c = r \cdot d \quad (20)$$

em que:

r – coeficiente de correlação; d – coeficiente de exatidão; c – coeficiente de desempenho; P_i – dados de ET_o estimados por meio da equação de Penman-Monteith; O – dados de ET_o estimados por meio da equação de Hargreaves e Samani; N – número de observações.

O coeficiente de desempenho foi avaliado conforme a Tabela 02:

Tabela 02. Valores do coeficiente de desempenho de acordo com Camargo e Sentelhas (1997)

Table 02. Performance coefficient values according to Camargo e Sentelhas (1997)

Valor do coeficiente "c"	Desempenho
> 90,0	Ótimo
0,81 a 90,0	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sufrível
0,31 a 0,40	Mau

Os parâmetros da equação de Hargreaves e Samani foram ajustados com base no coeficiente de desempenho (c), utilizando a ferramenta Solver do Excel®, visando aumentá-lo, o que consequentemente melhorou os coeficientes de correlação e/ou exatidão. Os dados utilizados para o ajuste das equações foram os dos anos ímpares.

Para se validar os dados são necessários dois conjuntos distintos de dados: parte dos dados entra na modelagem; outra parte dos dados não é utilizada no modelo: serve para que se valide o modelo. Com o modelo criado, estima-se seu resultado e compara-se este resultado estimado com os

dados que não entraram na modelagem. Quanto mais próximos os dois estiverem, melhor foi o desempenho do modelo gerado.

Pela heterogeneidade dos dados quanto à sua disponibilização temporal (entre as 22 estações há muita variação quanto ao tamanho da série disponível), optou-se por um modelo de separação de dados conveniente neste caso: utilizar anos ímpares na modelagem e anos pares na validação. Desta maneira dois conjuntos de dados distintos são criados a partir de um.

A metodologia mais adequada seria ter uma longa série medida continuamente para gerar dados para o modelo, e posteriormente se ter outra série contínua para a validação. Não houve possibilidade de se usar essa opção neste trabalho devido a algumas estações terem sua série temporal muito limitada.

Os mesmos coeficientes utilizados para avaliar as equações originais foram utilizados na avaliação das equações ajustadas

3. Resultados e Discussão

O desempenho da equação com os parâmetros originais de Hargreaves e Samani está apresentado na Tabela 03.

Tabela 03. Análise estatística da equação de Hargreaves e Samani aplicada nas estações do Estado do Pará

Table 03. Statistical analysis of the Hargreaves and Samani equation applied to stations in the State of Pará

ESTAÇÃO	r	d	c	REQM
BELÉM	0,99	0,84	0,83	0,39
BRAGANÇA	0,95	0,91	0,86	0,50
CAMETÁ	0,98	0,92	0,90	0,64
CAPITÃO POÇO	0,91	0,88	0,80	0,33
CASTANHAL	0,90	0,89	0,80	0,40
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	0,92	0,81	0,74	0,42
ITAITUBA	0,98	0,85	0,83	0,63
MARABÁ	0,98	0,87	0,85	0,53
MINA PALITO	0,98	0,82	0,81	0,44
MONTE ALEGRE	0,95	0,93	0,89	0,33
NOVO REPARTIMENTO	0,97	0,93	0,90	0,51
ÓBIDOS	0,94	0,74	0,70	0,68
PACAJÁ	0,94	0,83	0,78	0,49
PARAGOMINAS	0,93	0,67	0,63	0,60
PLACAS	0,97	0,75	0,73	0,47
RONDON DO PARÁ	0,91	0,80	0,73	0,42
SALINÓPOLIS	0,88	0,91	0,80	0,42
SANTANA DO ARAGUAIA	0,88	0,79	0,70	0,42
SERRA DOS CARAJÁS	0,86	0,90	0,78	0,36
SOURE	0,95	0,89	0,84	0,52
TOMÉ-AÇU	0,91	0,63	0,57	0,58
TUCURUÍ	0,94	0,74	0,70	0,50

Os valores do coeficiente de correlação de todas as estações foram classificados como “forte”, variando de 0,86 a 0,99. Em relação ao coeficiente de exatidão, todas as estações apresentaram valores de “d” maiores do que 0,50, com variação de 0,63 a 0,93 (Tabela 03).

Quanto ao coeficiente de desempenho, cerca de 22,7% das localidades foram classificadas como “mediano”, em torno de 36,4%, como “bom” e 40,9% como “muito bom”. Os melhores desempenhos foram das estações de Novo Repartimento (c=0,90), Cametá (c=0,90) e Monte Alegre

($c=0,89$). Já os menores valores de “ c ” foram das estações de Tomé-açu ($c=0,57$), Paragominas ($c=0,63$) e Santana do Araguaia ($c=0,79$) (Tabela 03).

A REQM resultou em valores variando de 0,33 a 0,68 mm dia⁻¹. Os menores erros foram das estações de Capitão-Poço (REQM=0,33), Monte Alegre (REQM=0,33) e Serra dos Carajás (REQM=0,36), enquanto que os maiores foram das estações de Óbidos (REQM=0,68), Cametá (REQM=0,64) e Itaituba (REQM=0,63) (Tabela 03).

Aplicando a equação de Hargreaves e Samani em Sete Lagoas – MG, caracterizada pelo clima tropical chuvoso, com inverno seco, Borges Junior et al. (2017) obtiveram uma forte tendência a superestimação da ETo na base diária, quando comparada a equação de Penman-Monteith.

Em clima semiárido, na cidade de Ouricuri – PE, mudanças na temperatura máxima e mínima do ar acarretam em impactos na ETo, pois, a temperatura é a variável que reflete de forma imediata mudanças no clima (Borges; Oliveira, 2020).

A equação de Hargreaves e Samani tende a superestimar a ETo em regiões de clima úmido. Arraes *et al.* (2016), observaram essa tendência ao analisar oito municípios de Pernambuco. Nas estações onde a umidade média do ar obteve valores acima de 70% houve superestimação da ETo, porém com bons resultados estatísticos, isso porque, com a umidade do ar maior, ocorre menor déficit de pressão e de velocidade do vento. Apesar da equação de Hargreaves e Samani ter sido desenvolvida para o clima seco, estes autores não obtiveram bons resultados para as estações localizadas no sertão pernambucano, devido a equação não ter como dado de entrada a umidade relativa do ar.

Nota-se, portanto, que a equação de Hargreaves e Samani apresenta bons resultados desde que sejam feitos os ajustes locais dos seus parâmetros. Assim, foi feito o ajuste local dos parâmetros originais da equação de Hargreaves e Samani para que houvesse melhorias nos resultados da análise estatística (Tabela 04), visto que o desempenho da equação original poderia ser melhorado e que em nenhuma localidade a equação apresentou a classificação de desempenho “ótimo”, isto é, valor do coeficiente “ c ” maior do que 90,0. O resumo da análise do coeficiente “ c ” em comparação entre a equação original e ajustada é apresentado na Tabela 05 e os parâmetros ajustados são apresentados na Tabela 06.

Tabela 04. Análise estatística da equação de Hargreaves e Samani ajustada localmente para as estações do Estado do Pará

Table 04. Statistical analysis of the locally adjusted Hargreaves and Samani equation for stations in the State of Pará

ESTAÇÃO	r	d	c	REQM
BELÉM	0,99	0,99	0,98	0,07
BRAGANÇA	0,95	0,97	0,92	0,26
CAMETÁ	0,98	0,96	0,94	0,42
CAPITÃO POÇO	0,93	0,96	0,90	0,17
CASTANHAL	0,90	0,94	0,85	0,28
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	0,94	0,97	0,91	0,14
ITAITUBA	0,98	0,98	0,96	0,17
MARABÁ	0,98	0,98	0,97	0,17
MINA PALITO	0,97	0,98	0,96	0,11
MONTE ALEGRE	0,96	0,98	0,95	0,18
NOVO REPARTIMENTO	0,97	0,95	0,92	0,41
ÓBIDOS	0,94	0,97	0,91	0,18
PACAJÁ	0,94	0,96	0,90	0,21
PARAGOMINAS	0,93	0,96	0,89	0,16
PLACAS	0,97	0,98	0,96	0,10
RONDON DO PARÁ	0,92	0,96	0,88	0,17
SALINÓPOLIS	0,88	0,92	0,81	0,39
SANTANA DO ARAGUAIA	0,84	0,90	0,76	0,23
SERRA DOS CARAJÁS	0,89	0,94	0,84	0,29
SOURE	0,95	0,97	0,93	0,23
TOMÉ-AÇU	0,93	0,96	0,89	0,14
TUCURUÍ	0,95	0,97	0,92	0,13

Tabela 05. Resumo do desempenho em relação ao coeficiente “c” da equação de Hargreaves e Samani original e ajustada localmente para as estações do Estado do Pará

Table 05. Summary of performance in relation to the coefficient “c” of the original Hargreaves and Samani equation and locally adjusted for stations in the State of Pará

Estação	Original		Ajustada	
	C	Classificação	C	Classificação
Belém	0,83	Muito Bom	0,98	Ótimo
Bragança	0,86	Muito Bom	0,96	Ótimo
Cametá	0,90	Muito Bom	0,96	Ótimo
Capitão Poço	0,80	Bom	0,92	Ótimo
Castanhal	0,80	Bom	0,89	Muito Bom
Conceição do Araguaia	0,74	Bom	0,91	Ótimo
Itaituba	0,83	Muito Bom	0,89	Muito Bom
Marabá	0,85	Muito Bom	0,97	Ótimo
Mina Palito	0,81	Muito Bom	0,88	Muito Bom
Monte Alegre	0,89	Muito Bom	0,96	Ótimo
Novo Repartimento	0,90	Muito Bom	0,90	Muito Bom
Óbidos	0,70	Mediano	0,95	Ótimo
Pacajá	0,78	Bom	0,91	Ótimo
Paragominas	0,63	Mediano	0,90	Muito Bom
Placas	0,73	Bom	0,93	Ótimo
Rondon do Pará	0,73	Bom	0,76	Bom
Salinópolis	0,80	Bom	0,92	Ótimo
Santana do Araguaia	0,70	Mediano	0,85	Muito Bom
Serra dos Carajás	0,78	Bom	0,84	Muito Bom
Soure	0,84	Muito Bom	0,81	Muito Bom
Tomé-Açu	0,57	Mediano	0,92	Ótimo
Tucuruí	0,70	Mediano	0,94	Ótimo

Tabela 06. Parâmetros ajustados localmente da equação de Hargreaves e Samani para as estações do Estado do Pará**Table 06.** Locally adjusted parameters of the Hargreaves and Samani equation for stations in the State of Pará

ESTAÇÃO	HS	PARÂMETROS
Belém	0,0104	a
	25,8164	b
Bragança	0,0180	a
	3,1717	b
Cametá	0,0199	a
	0,0000	b
Capitão Poço	0,0209	a
	0,0000	b
Castanhal	0,0210	a
	0,0000	b
Conceição do Araguaia	0,0203	a
	0,0000	b
Itaituba	0,0154	a
	6,7876	b
Marabá	0,0199	a
	0,0000	b
Mina Palito	0,0021	a
	225,4329	b
Monte Alegre	0,0212	a
	0,0000	b
Novo Repartimento	0,0203	a
	0,0000	b
Óbidos	0,0003	a
	1714,0943	b
Pacajá	0,0202	a
	0,0000	b
Paragominas	0,0196	a
	0,0000	b
Placas	0,0175	a
	3,5631	b
Rondon do Pará	0,0190	a
	2,1113	b
Salinópolis	0,0217	a
	0,0000	b
Santana do Araguaia	0,0030	a
	161,0732	b
Serra dos Carajás	0,0240	a
	0,0000	b
Soure	0,0203	a
	0,0000	b
Tomé-Açu	0,0198	a
	0,0000	b
Tucuruí	0,0196	a
	0,0000	b

Após a calibração das equações, o coeficiente de correlação permaneceu alto, com variação de 0,84 a 0,99, classificado como “forte”. Os valores mais altos foram das estações de Belém ($r=0,99$), Marabá ($r=0,98$) e Itaituba ($r=0,98$). Os valores menores foram das estações de Santana do Araguaia ($r=0,84$), Salinópolis ($r=0,88$) e Serra dos Carajás ($r=0,89$) (Tabela 05).

A forte correlação da ETo utilizando a equação de Hargreaves e Samani observada, tanto na sua forma original como calibrada, se deve as variáveis de entrada utilizadas serem a temperatura e a radiação solar, que em conjunto, são importantes componentes da evapotranspiração em um clima úmido.

Houve melhoria do coeficiente de exatidão, após o ajuste local, que variou de 0,90 a 0,99. Em resultado disso, houveram melhoras no coeficiente de desempenho de todas as estações, em que foram classificadas como “bom” (4,5%), “muito bom” (36,4%) e “ótimo” (59,1%), com exceção da estação de Soure, onde houve uma ligeira redução (Tabela 04).

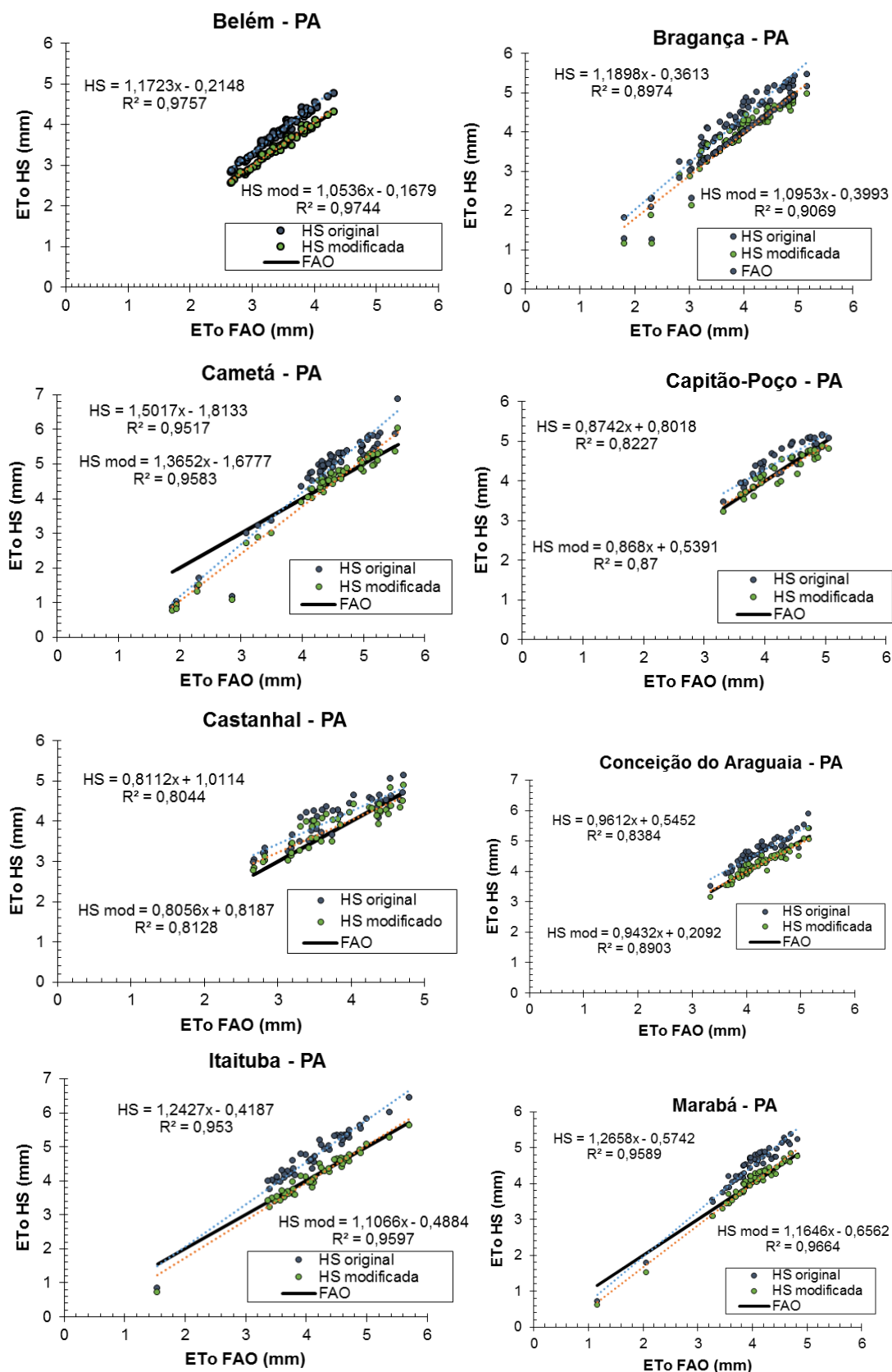
No entanto, nota-se que mesmo após os ajustes nas equações das estações de Rondon do Pará, Mina Palito, Itaituba, Soure e Novo Repartimento, não houve melhoria na classificação do coeficiente de desempenho, permanecendo o mesmo, sendo Rondon do Pará classificado como “bom” e as demais citadas como “muito bom” tanto antes como depois do ajuste local.

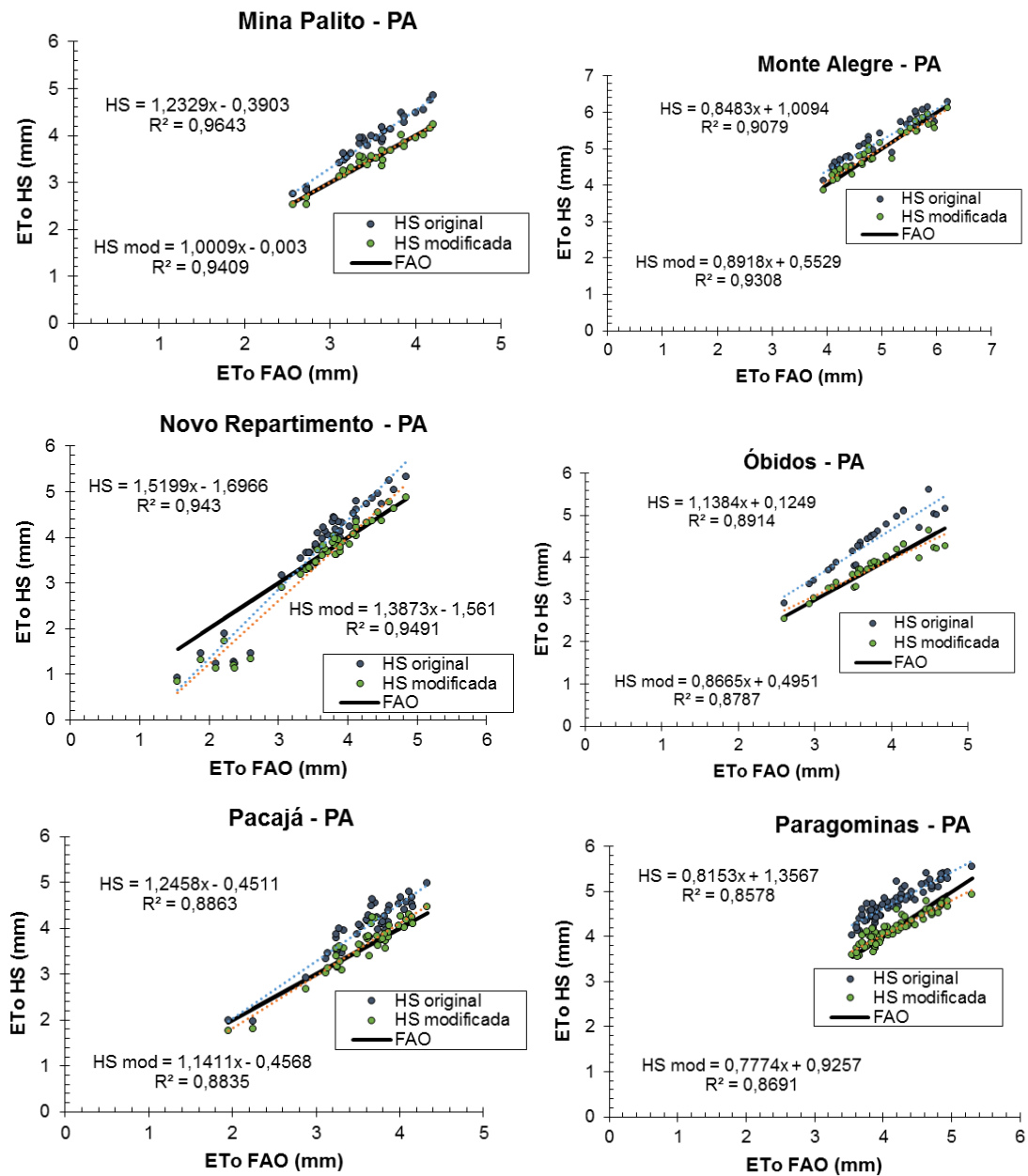
Houve redução dos valores de REQM, após calibração, resultando em uma variação de 0,07 a 0,42 mm dia⁻¹. Os menores erros foram encontrados na estação de Belém (REQM=0,07), Placas (REQM=0,10) e Mina Palito (REQM=0,11) enquanto os maiores foram nas estações de Cametá (REQM=0,42), Novo Repartimento (REQM=0,41) e Salinópolis (REQM=0,39) (Tabela 04).

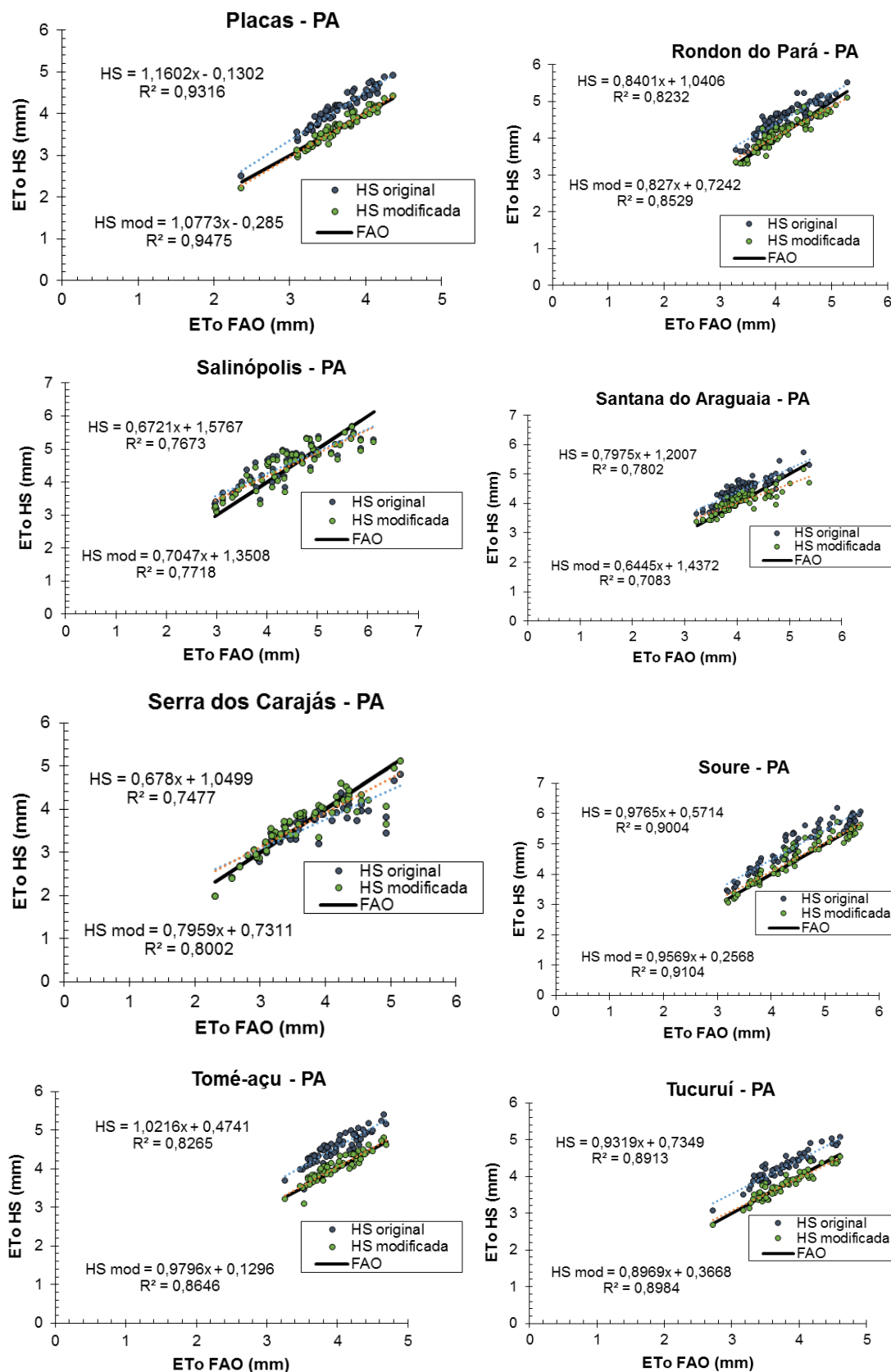
Na Figura 01 é apresentado o comportamento da equação de Hargreaves e Samani com os parâmetros originais e com os parâmetros ajustados em relação à equação de Penman-Monteith. Nota-se que houve boa correlação da equação original com a equação de Penman-Monteith em todas as estações do Estado do Pará. Em relação a equação ajustada localmente, o comportamento linear permaneceu “bom”, com aumentos em relação à equação original, com exceção das estações de Belém, Mina Palito, Óbidos, Pacajá e Santana do Araguaia, onde houve ligeiras reduções do R^2 .

Figura 01. Relação entre a ETo estimada por Hargreaves e Samani original, Hargreaves e Samani modificada e Penman-Monteith FAO

Figure 01. Relationship between ETo estimated by Hargreaves and original Samani, Hargreaves and modified Samani and Penman-Monteith FAO







Devido à grande dimensão do Estado do Pará em relação à quantidade de estações meteorológicas da rede pública disponíveis, não foram utilizadas metodologias de geoespacialização, como a krigagem, sendo esta uma das limitações do estudo. O uso das equações ajustadas é mais adequado para o local onde foi feita a calibração.

Sugere-se que sejam feitos mais estudos associando o uso dos métodos locais com sensoriamento remoto e geoestatística para que haja maior cobertura de aplicação das equações de evapotranspiração de referência no Estado do Pará.

4. Conclusão

A equação de Hargreaves e Samani utiliza como variáveis de entrada a radiação solar e a temperatura do ar, apresentando bons resultados, o que mostra que em regiões de clima úmido, boa parte das variações da evapotranspiração de referência estão atreladas a estas duas variáveis.

Recomenda-se o uso da equação de Hargreaves e Samani original ou ajustada localmente para o cálculo da ETo no Estado do Pará, quando não houver meios de utilização da equação de Penman-Monteith.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and drainage paper, 56).
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- ARRAES, F. D. D.; LIMA JÚNIOR, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; MACEDO, 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, Fortaleza**, v. 10, n. 1, p. 410-419, 2016.
- BARROS, A. C.; SILVA, C. S. O.; NETTO, A. O. A. Ajuste dos parâmetros de equação Hargreaves-Samani em escala diária para o perímetro irrigado Jacaré-Curitiba, Canindé-SE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.11, n.8, p. 2152-2161, 2017.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; OLIVEIRA, A. L. M.; ANDRADE, C. L. T.; PINHEIRO, M. A. B. Equação de Hargreaves-Samani calibrada em diferentes bases temporais para Sete Lagoas, MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 38-49, 2017.
- BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.
- BORGES, T. K. S.; OLIVEIRA, A. S. Análise de sensibilidade de equação de Hargreaves-Samani a mudanças na temperatura do ar em condições de semiárido. *Revista Geama*, **Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, [s.l], v. 6, n. 3, p. 15-21, 2020.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n.1, p.89-97, 1997.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Ajuste do modelo de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência no Noroeste Paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n.5, p.306-316, 2013.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, F. A. L.; MACÊDO, K. G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência do Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciências Agronômicas**, Fortaleza, v.47, n.3, p. 447-454, 2016.

SANTIAGO, E. J. P.; OLIVEIRA, V. E. A.; SILVA, R. R.; GONÇALVES, I. S.; OLIVEIRA, G. M. Ajuste da equação de Hargreaves e Samani a partir de dados lisimétricos para o município de Juazeiro – BA. Irriga, Botucatu, Edição especial, **Irriga & Inovagri**, p. 108-114, 2016.

SOUZA, M. L. A.; SOUSA, J. W. Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 1, p. 254-267, 2020.

ZANETTI, S. S.; DOHLER, R. E.; CARMO, E. B.; CECÍLIO, R. A. Calibração da equação de Hargreaves-Samani para estimar a evapotranspiração de referência no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.12, n.3, p. 2692-2701, 2018.

Author contribution:

Camila Gaia: Conceituação, Análise Formal; Escrita –Primeira Redação.

Enzo Dal Pai: Curadoria de dados; Escrita – Revisão e Edição

Acknowledgment

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela estrutura para a realização das análises de dados. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro a pesquisa.

Financing Sources

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, através de bolsa de mestrado a primeira autora.

Conflict of Interest

Os autores declaram não haver conflito de interesse

Associate Editor

Luciana da Silva Borges

ORIGINAL ARTICLE

