



Calibração de métodos empíricos para estimativa de evapotranspiração de referência no oeste do Paraná

Calibration of empirical methods for estimating reference evapotranspiration in western Paraná

Tharsos Hister Giovanella*, Fabrício Correia de Oliveira†,

Júlia Tluszcz‡ Lucas Eduardo Wendt§

RESUMO

A evapotranspiração é uma variável agrometeorológica que quantifica a saída de água do solo. É uma variável extremamente importante para a realização de balanço hídrico, manejo de irrigação, zoneamento agroclimático e gerenciamento dos recursos hídricos. Sua determinação depende de diversos parâmetros que nem sempre estão disponíveis, então é necessário que sejam utilizados meios alternativos para a sua determinação, que usem menos dados de entrada. Porém estes métodos empíricos tem suas limitações e precisam ser validados antes de serem utilizados fora da sua região de origem. Este trabalho teve como objetivo calibrar dois métodos empíricos que já foram validados para a região oeste do Paraná, a fim de reduzir os erros nas suas estimativas com relação ao método padrão Penman-Monteith. Para isso, foram utilizadas nove estações meteorológicas para a calibração e mais cinco estações para a validação e avaliação de desempenho das equações regionais. As calibrações foram realizadas utilizando a extensão *Solver* do *Microsoft Excel* e a validação e avaliação de desempenho por meio de indicadores estatísticos concordância de Wilmott, Correlação de Pearson, Coeficiente de Nash-Sutcliffe, RMSE e EAM. A calibração dos métodos proporcionou incremento no desempenho das estimativas. O método de Jensen-Haise se destacou, fornecendo melhores estimativas.

Palavras-chave: Jensen-Haise; Hargreaves-Samani; Recursos Hídricos; Irrigação.

ABSTRACT

Evapotranspiration is an agrometeorological variable that corresponds to the lost of water from the soil. It is an extremely important variable for the realization of hydric balance, irrigation management, agroclimatic zoning and water resources management. Its determination depends on several parameters that are not always available, so it is necessary to use alternative strategy for its determination, which use less input data. However, these empirical methods have their limitations and need to be validated before being used outside their region of origin. This research had the intention to calibrate two empirical methods that have already been validated for the western region of Paraná, in order to reduce errors in their estimates in relation to the standard Penman-Monteith method. For this purpose, nine meteorological stations were used for calibration and another five stations for the validation and performance evaluation of regional equations. Calibrations were performed using *Solver* extension of *Microsoft Excel* and validation and performance evaluation using statistical indicators Wilmott method, Pearson correlation, de Nash-Sutcliffe coefficient, RMSE and EAM. The Jensen-Haise method stood out, providing the best estimates.

Keywords: Jensen-Haise; Hargreaves-Samani; Water Resources; Irrigation.

1 INTRODUÇÃO

* Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil; tharsosgiovanella@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Santa Helena; fcoliveira@utfpr.edu.br

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil; juliatluszcz@gmail.com

§ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil; lucas59356@gmail.com



A evapotranspiração é uma variável meteorológica que define as formas de perda de água de superfícies vivas e inanimadas para a atmosfera. A perda de água através de superfícies vivas é chamada de transpiração, enquanto a que ocorre em superfícies não-vivas é chamada de evaporação (REICHARDT & TIMM, 2012).

A ETo é fundamental no gerenciamento de recursos hídricos, podendo ser aplicadas nas áreas agrícolas e ambientais, como balanços hídricos, manejo de irrigação, caracterizações climáticas, produtividade potencial e demonstrar a demanda hídrica da atmosfera local (ALLEN *et al.*, 1998). Portanto, a determinação eficiente da evapotranspiração de referência é essencial para diversas atividades relacionadas ao planejamento dos recursos hídricos, sendo fundamental para garantir segurança hídrica para os dias atuais e futuro. Portanto, a calibração dos métodos empíricos reduz o erro das estimativas de evapotranspiração de referência no oeste do Paraná?

Para a determinação da ETo podem ser utilizados dois meios: lisímetros e equações empíricas. Os lisímetros são equipamentos caros e com custo de manutenção elevados, sendo utilizados apenas em instituições de pesquisa e universidades (VALIPOUR, 2015). A forma mais comum e mais viável de determinar a evapotranspiração é a utilização das equações empíricas (PILAU *et al.*, 2012).

A *Food and Agriculture Organization* da ONU, por meio do boletim FAO 56, recomenda que o modelo de Penman-Monteith seja utilizado como método padrão para as estimativas de evapotranspiração, uma vez que esse método apresentar um bom desempenho na maioria dos climas (ALLEN *et al.*, 1998). Porém, é comum que várias localidades não possuam dados meteorológicos suficientes para realizar as estimativas com o método padrão, limitando a sua ampla utilização (PILAU *et al.*, 2012). Portanto, métodos empíricos que utilizam menos dados de entrada como Thornthwaite, Hargreaves-Samani e Jensen-Haise tornam-se boas alternativas (ČADRO *et al.*, 2017). O principal fator limitante para a utilização destes modelos é a necessidade de validação antes de serem utilizados, uma vez que foram desenvolvidos em uma região específica, sendo recomendado realizar validações e calibrações antes de serem utilizados em outros locais (CUNHA *et al.*, 2013).

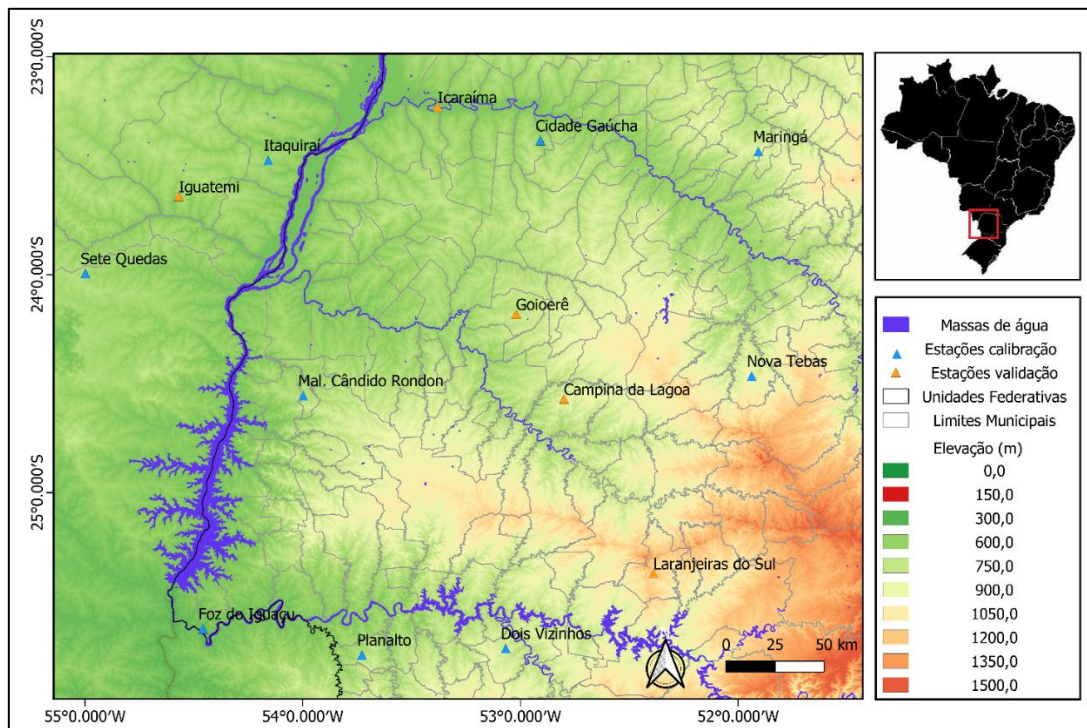
A validação é feita comparando os valores de evapotranspiração de referência estimados por meio de métodos empíricos, com os valores obtidos utilizando o método padrão (PAPARRIZOS *et al.*, 2017). Entretanto, mesmo após a validação estes modelos empíricos podem apresentar um desempenho insatisfatório nas estimativas, subestimando ou superestimando a ETo, o que pode levar a erros no gerenciamento dos recursos hídricos (ZANETTI *et al.*, 2018). Assim, torna-se necessário que sejam feitas calibrações nos métodos empíricos, visando estimativas acuradas e menor desperdício de recursos hídricos (CUNHA *et al.*, 2013). Dessa forma, os coeficientes empíricos dos modelos matemáticos podem ser ajustados, reduzindo o seu erro com relação a evapotranspiração obtida pelo Penman-Monteith (ČADRO *et al.*, 2017).

2 MÉTODO (OU PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA)

A pesquisa foi realizada na região oeste do estado do Paraná, com foco nos municípios lindeiros ao lago de Itaipu. A precipitação anual na região oeste do paraná varia de 1400 até 2000 mm anuais. A evapotranspiração da região varia de 2 mm a 10 mm diários, com a média dos municípios próximos a 6 mm diários. Os maiores valores de ETo são registrados no verão, enquanto os meses de julho, agosto e setembro são os com menor pluviosidade (GIOVANELLA *et al.*, 2020).

Para a realização da pesquisa foram utilizados dados meteorológicos provenientes da rede de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para a seleção das estações foram estabelecidos critérios: Possuir pelo menos 10 anos de dados, com no máximo 10% de falhas nestes dados. O Mapa 1 apresenta a localização das estações meteorológicas utilizadas nas calibrações.

Figura 1 – Localização das estações meteorológicas utilizadas para calibração (azul) e avaliação de desempenho das equações calibradas (amarelo).



Fonte: Autoria Própria (2021)

Foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura do ar instantânea máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e umidade relativa instantânea máxima e mínima (%) para um período de dez anos (1 $^{\circ}$ de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2020). A temperatura média foi calculada em função da temperatura máxima e mínima. Visando proporcionar maior consistência e confiabilidade dos resultados, os dias que apresentaram falhas de leituras em uma ou mais variáveis foram substituídos por valores de ETo interpolados de estações próximas utilizando a equação Inverso do Quadrado da Distância (GIOVANELLA *et al.*, 2021). Já os dias com falhas de leituras em dados de temperatura foram substituídos por dados de temperaturas retirados do banco de Dados NASA/POWER (ABOELKHAI *et al.*, 2019; MONTEIRO *et al.*, 2017)

Os dois métodos selecionados para serem calibrados foram o Hargreaves-Samani e Jensen-Haise (CUNHA *et al.*, 2013). Ambos os métodos apresentaram bons valores de correlação em um estudo anterior, porém o erro destes métodos limitava seu uso (GIOVANELLA *et al.*, 2020). Por serem métodos que utilizam poucos dados de entrada, são simples de aplicar e possuem coeficientes empíricos que podem ser calibrados em diversas escalas, de locais a regionais (ČADRO *et al.*, 2017).

Método Hargreaves-Samani (CUNHA *et al.*, 2013):

$$ET_{O_{HG-S}} = A_{hs} \cdot Ra \cdot ((T_{max} - T_{min})^{C_{hs}}) \cdot (T + B_{hs}) \quad (01)$$

Método Jensen-Haise (CUNHA *et al.*, 2013):

$$ET_{O_{JH}} = Qg \cdot (A_{jh} \cdot T + B_{jh}) \quad (02)$$

Em que: T - Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$); "Tmax" - Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); "Tmin" - Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$); Ra - Radiação extraterrestre (mm d^{-1}); Qo - Radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); "Qg" - Radiação solar global (mm d^{-1}); $A_{hs} = 0,0023$; $B_{hs} = 17,8$; $C_{hs} = 0,5$; $A_{jh} = 0,025$; $B_{jh} = 0,08$;

O método Penman-Monteith (03) é considerado o método padrão para estimativas de evapotranspiração de referência. O método é utilizado como referência para avaliação de desempenho dos outros métodos.



A estimativa de radiação solar global foi realizada utilizando a equação de Hargreaves-Samani, baseada na temperatura máxima e mínima do ar (04) (HARGREAVES & SAMANI, 1985).

Em seguida, foi estimada a evapotranspiração de referência diária com cada um dos métodos nas nove estações meteorológicas selecionadas. Após as estimativas diárias de ETo em cada estação para o período de 10 anos, foi realizado o processo de calibração dessas equações. Através da extensão *Solver* do *Microsoft Excel*, foi realizada a calibração das equações, visando reduzir o Erro Absoluto Médio das estimativas dos métodos empíricos em relação às estimativas do Penman-Monteith. Para a calibração, foram alterados os coeficientes A_{hs} , B_{hs} , C_{hs} , A_{jh} e B_{jh} .

As calibrações dos métodos Jensen-Haise e Hargreaves-Samani foram realizadas nas nove estações com 10 anos de dados, gerando uma equação calibrada para cada método. A fim de gerar uma equação regional, foi feita a média entre os coeficientes calibrados, gerando uma equação com os coeficientes médios para a região.

Após gerar as equações calibradas para a região, ambas as equações tiveram seu desempenho avaliado, a fim de validar as equações regionais. Para isso, foram selecionadas outras cinco estações localizadas no interior da região. Estas estações estão representadas em amarelo na Figura 1.

Paralelamente a validação das equações, foi avaliado o desempenho das mesmas. Foram calculados os valores de evapotranspiração com o Penman-Monteith. Também foram estimados os valores de evapotranspiração com os métodos empíricos Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Hargreaves-Samani Regional e Jensen-Haise Regional. Os valores obtidos com os métodos empíricos foram comparados com os valores do Penman-Monteith. Para isso, foram utilizadas as equações Concordância de Wilmott (d), Correlação de Pearson (r), Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe (CE), RMSE e Erro Médio Absoluto.

3 RESULTADOS

As equações Hargreaves-Samani (HS) e Jensen-Haise (JH) após calibradas para cada estação apresentaram resultados numericamente próximos, com pouca variação entre os coeficientes. Na equação JH, em todas as estações o coeficiente A foi igual a zero. O coeficiente B variou de 0,53 a 0,59, com média de 0,57. A equação HS apresentou comportamento similar no coeficiente B, apresentando o valor 100 em todas as equações. O coeficiente A variou de 0,0007 a 0,0011, com média de 0,0009 e o coeficiente C variou de 0,43 a 0,62, com o valor médio de 0,49, se mantendo numericamente próximo ao coeficiente original.

A equação Jensen-Haise calibrada regionalmente (JHR) aponta que os valores de evapotranspiração diários são iguais a 57% da radiação solar global estimada pela equação 04. A equação JHR está apresentada abaixo (03).

$$ET_{oJH-Regional} = Qg \cdot 0,57 \quad (03)$$

Ao contrário da equação JHR, a equação Hargreaves-Samani regional (HSR) manteve seus coeficientes A e C bem próximos dos valores originais, a maior diferença foi o coeficiente B, que aumentou de 17,8 para 100. A equação HSR está apresentada abaixo (04).

$$ET_{oHS-Regional} = 0,0009 \cdot ((T_{max} - T_{min})^{0,49}) \cdot (T + 100) \quad (04)$$

Os resultados obtidos pela análise estatística de desempenhos dos métodos HS, JH, HSR e JHR estão representados na Tabela 4, sendo concordância de Wilmott (d), correlação de Pearson (r), Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (CE), Erro Absoluto Médio (EAM) e Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE).

Tabela 4 – Resultados da análise estatística com as médias dos coeficientes nos cinco municípios.

Método	d	r	CE	EAM	RMSE
Hargreaves-Samani	0,999	0,85	0,25	1,00	1,28
Jensen-Haise	0,963	0,83	-0,26	1,23	1,78
Hargreaves-Samani Regional	0,999	0,86	0,54	0,81	1,15



Jensen-Haise Regional	0,999	0,86	0,54	0,71	1,02
------------------------------	-------	------	------	------	------

Fonte: Autoria Própria (2021).

Todos os métodos avaliados apresentaram valores de “d” muito próxima de 1, o que indica alta concordância entre os valores comparados. Da mesma forma, todos os métodos obtiveram valores de “r” superiores a 0,7, sendo classificados como “correlação muito forte” (CUNHA *et al.*, 2013). É importante destacar que tanto o método JH quanto o HS demonstraram aumento nos valores de “r” após as equações serem calibradas regionalmente.

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (CE) demonstra que os métodos JH e HS não apresentavam estimativas satisfatórias antes de serem calibrados, pois todos os valores de CE das equações originais se mantiveram abaixo de 0,36, sendo classificados como “insatisfatório”. Entretanto, da mesma forma que aconteceu com o “r”, os valores de CE sofreram um incremento ao avaliar as equações calibradas. JHR e HSR apresentaram valores de CE entre 0,45 e 0,63, sendo classificados como “satisfatórios” (VAN LIEW *et al.*, 2007).

Os valores de EAM sofreram redução com as duas equações calibradas em todas as estações. A equação JHR mantém o EAM em torno de $\pm 0,7 \text{ mm d}^{-1}$. O método HSR apresentou maior variação em seus valores de EAM, apresentando $\pm 1,15 \text{ mm/dia}$, valor bastante próximo do que a equação original obteve.

O RMSE das equações calibradas foi inferior ao RMSE das equações originais. O RMSE é bastante sensível a erros mais discrepantes, o que permite inferir que as equações originais apresentam mais erros grosseiros do que as equações calibradas (CHAI & DRAXLER, 2014; GIOVANELLA *et al.*, 2021). O método JHR apresenta valores de RMSE inferiores ao HSR, o que indica que seu desempenho foi mais consistente, apresenta menos erros e menos erros grosseiros do que o HSR. Esse resultado é bastante similar ao encontrado por outros autores, que apontam que a calibração dos coeficientes de HS reduzem o EAM e o RMSE (ZANETTI *et al.*, 2018; FENG *et al.*, 2017).

Comumente, o método HS geralmente é o mais utilizado para calibrações, pois seus três coeficientes empíricos permitem que o método se ajuste adequadamente a diversas situações (ČADRO *et al.*, 2017). Entretanto, a calibração apenas do coeficiente A também fornece resultados muito próximos (ZANETTI *et al.*, 2018). Os resultados encontrados com a equação HSR corroboram com os encontrados por Čadro (2017), onde a equação de HS calibrada apresentou resultados muito satisfatórios.

Em um trabalho anterior, a equação de JH apresentou o menor erro entre vários métodos empíricos, portanto ao calibrar o método, o seu erro de estimativa que já era baixo reduziu ainda mais, fazendo com que seu desempenho ficasse maior do que o do HS e HSR (GIOVANELLA *et al.*, 2020).

4 CONCLUSÃO

A equação JHR apresentou estimativas satisfatórias dentro de todas as estações avaliadas, mesmo com a diferença climática entre as estações. Seus erros de estimativa se mostraram baixos, bem como os valores de RMSE, indicando que raramente o método erra grosseiramente em relação ao Penman-Monteith. Além disso, a presença de apenas dois coeficientes para calibrar favorece a calibração do JH em relação ao HS que possui três coeficientes. O método HSR apresentou bom desempenho na maioria das estações, porém foi inferior ao JHR.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação Araucária e a UTFPR pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2012.



- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 283–290, 2012.
- VALIPOUR, M. Temperature analysis of reference evapotranspiration models. **Meteorological Applications**, v. 22, n. 3, p. 385–394, 2015.
- ČADRO, S.; UZUNOVIĆ, M.; ŽUROVEC, J.; ŽUROVEC, O.; Validation and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 5, n. 4, p. 309-324, 2017.
- PAPARRIZOS, S.; MARIS, F.; MATZARAKIS, A. Sensitivity analysis and comparison of various potential evapotranspiration formulae for selected Greek areas with different climate conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, n. 3–4, p. 745–759, 2017.
- CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul, MS. **Engenharia na Agricultura**, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.
- ZANETTI, S. S.; DOHLER, R. E.; CARMO, E. B.; CECÍLIO, R. A. Calibração da equação de Hargreaves-Samani para a estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 3, p. 2692-2701, 2018.
- GIOVANELLA, T. H.; OLIVEIRA, F. C.; PEREIRA, V. A. S.; ROCHA, A. S; Métodos empíricos para estimativa de evapotranspiração de referência nos municípios lindeiros ao lago de Itaipu. **XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, novembro de 2020.
- GIOVANELLA, T. H.; OLIVEIRA, F. C.; MARCHI, V. A. A.; TLUSZCZ, J.; Desempenho de Métodos de Preenchimento de Falhas em Dados de Evapotranspiração de Referência para Região Oeste do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia [online]**, 2021.
- ABOELKHAIR, H.; MORSY, M.; EL AFANDI, G. Assessment of agroclimatology NASA POWER reanalysis datasets for temperature types and relative humidity at 2 meter against ground observations over Egypt. **Advances in Space Research**, v. 64, n. 1, p. 129-142, 2019.
- MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P. C.; PEDRA, G. U. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. **International Journal of Climatology**, v. 3, n. 38, p. 1560-1570, 2017.
- FENG, Y.; JIA, Y.; CUI, N.; ZHAO, L.; LI, C.; GONG, D.; Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration estimation in Sichuan basin of southwest China. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 1 – 9, 2017.
- WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088–2094, 2011.
- VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173–189, 2007.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.
- ZANETTI, S. S.; DOHLER, R. E.; CARMO, E. B.; CECÍLIO, R. A.; Calibração da equação Hargreaves-Samani para estimar a evapotranspiração de referência no estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 3, p. 2692 – 2701, 2018.