



## AJUSTE DOS COEFICIENTES DE EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA SANTA MARIA - RS

ROBERTO TRENTIN<sup>1</sup>, ARNO B. HELDWEIN<sup>2</sup>, JOCÉLIA ROSA DA SILVA<sup>3</sup>,  
GUSTAVO TRENTIN<sup>4</sup>, FERNANDO D. HINNAH<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agr., Departamento de Fitotecnia, CCR/UFMS, Santa Maria – RS, Fone: (0xx55) 3220-8902, trentinrt@bol.com.br

<sup>2</sup> Eng. Agr., Prof. Titular, Departamento de Fitotecnia, CCR/UFMS, Santa Maria – RS.

<sup>3</sup> Acadêmica do curso de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, CCR/UFMS, Santa Maria – RS.

<sup>4</sup> Eng. Agr., Pesquisador, EMBRAPA-CPPSUL, Bagé - RS.

<sup>5</sup> Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Fitotecnia, CCR/UFMS, Santa Maria – RS.

Apresentado no XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 06 de Setembro de 2013 – Centro de Convenções e Eventos Benedito Silva Nunes, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo comparar sete modelos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) com o método de estimativa de Penman-Monteith e proceder o ajuste dos coeficientes dos modelos para melhorar a estimativa da ET<sub>o</sub> para Santa Maria, RS. Os dados foram obtidos das estações automática e convencional do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) em Santa Maria, compreendendo o período de janeiro de 2002 até maio de 2013. Foi possível obter o ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para os métodos de Camargo, Turc, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton e Makkink, permitindo obter uma melhor precisão na estimativa da ET<sub>o</sub>. Os métodos com coeficientes calibrados para Santa Maria, RS, podem ser utilizados quando a disponibilidade de dados para estimativa pelo método de Penman-Monteith for limitada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Evapotranspiração de referência, métodos de estimativa, calibração de coeficientes.

## ADJUSTMENT OF EQUATIONS COEFFICIENTS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR SANTA MARIA - RS

**ABSTRACT:** The objective of this study was to compare seven empirical models for estimating reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) compared with the Penman-Monteith method and carry out the adjustment of the model coefficients to improve the estimation of ET<sub>o</sub> for Santa Maria, RS. Data were obtained from automatic and conventional weather stations of INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) in Santa Maria, RS, Brazil, covering the period from January 2002 to May 2013. It was possible the coefficients adjustment of the equations for reference evapotranspiration estimation: Camargo, Turc, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton and Makkink, allowing a better estimate of ET<sub>o</sub>. The methods with adjusted coefficients to Santa Maria, RS, Brazil, can be used when the available data to estimate ET<sub>o</sub> by Penman-Monteith method is limited.





**KEYWORDS:** Reference evapotranspiration, estimating methods, coefficients calibration.

## INTRODUÇÃO

O balanço de energia, a demanda atmosférica, o suprimento de água do solo às plantas, a dimensão da área foliar do dossel e as características fisiológicas das plantas são as principais determinantes da evapotranspiração (ET) (MENDONÇA et al., 2003) e por isso são as variáveis mais utilizadas.

Os modelos de estimativa da evapotranspiração podem ser agrupados em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação dos turbilhões (PEREIRA et al., 1997). Segundo MEDEIROS, 1998, os métodos empíricos são os mais empregados nas estimativas da evapotranspiração de referência, visto que estes utilizam dados meteorológicos facilmente disponíveis.

O método Penman-Monteith, é considerado o método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), sendo recomendado por Allen et al. (1998). Contudo, este requer dados de saldo de radiação, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar. Quando não há disponibilidade de todos estes dados meteorológicos, uma alternativa é o emprego de métodos mais simples com menor número de variáveis de entrada de dados.

Informações quantitativas de ET<sub>o</sub> são necessárias nos vários campos científicos que tratam dos numerosos problemas do manejo da água. Dados confiáveis de ET<sub>o</sub> são exigidos para o planejamento, construção e operação de reservatórios e sistemas de irrigação e drenagem (STONE & SILVEIRA, 1995). Assim, erros na estimativa da ET<sub>o</sub> podem resultar na irrigação superior ou inferior ao demandado pela cultura, acarretando maiores custos ao produtor além de causar impacto ambiental, como erosão do solo e lixiviação de nutrientes.

Este trabalho teve como objetivo comparar sete modelos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) com o método de estimativa de Penman-Monteith e proceder o ajuste dos coeficientes dos modelos para melhorar a estimativa da ET<sub>o</sub> para Santa Maria, RS.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram obtidos das estações automática e convencional do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) em Santa Maria, pertencente à região de abrangência do 8º DISME, compreendendo o período de janeiro de 2002 até maio de 2013. Em alguns dias, devido a problemas diversos, não são disponibilizadas todas as medições das variáveis meteorológicas, para esses dias optou-se pelo descarte dos mesmos, para melhor comparação entre os dois métodos.

Os métodos de determinação da ET<sub>o</sub> utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 1, estes foram comparados ao método Penman-Monteith (PM) com a equação parametrizada por Allen et al. (1998).

Para o ajuste dos coeficientes dos métodos avaliados procedeu-se inicialmente a comparação entre os valores calculados da ET<sub>o</sub> pelo método de PM com os provenientes da estimativa





XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – XVIII CBA  
2013 e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia  
Belém - PA, Brasil, 02 a 06 de Setembro 2013  
Cenários de Mudanças Climáticas e a Sustentabilidade  
Socioambiental e do Agronegócio na Amazônia



pelos demais métodos. Posteriormente, a partir da análise dos desvios procedeu-se o ajuste local dos respectivos coeficientes (Tabela 1), adequando-os às condições da região de Santa Maria, RS, utilizando-se o assistente de regressão não linear do Programa estatístico SigmaPlot.

Para a avaliação do desempenho dos ajustes foram analisados estatisticamente o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME) calculada conforme (JANSSEN & HEUBERGER, 1995) na comparação entre os valores diários de  $ET_o$  estimados pelo método de PM e pelo outro método em análise.

Tabela 1 – Métodos de estimativa de evapotranspiração de referência avaliados e suas respectivas equações e coeficientes originais.

Métodos Utilizados	Referência Original e/ou citada	Equações de estimativa da $ET_o^*$	Coeficientes originais		
			a	b	c
Penman-Monteith (PM)	Allen et al. (1998)	$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \frac{Q^*}{L} + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot d}{(\Delta + \gamma^*)(T + 273)}$	—	—	—
Camargo (CM)	Camargo (1971)	$ET_o = a \cdot (Q_o/2,45) \cdot T$	0,01	—	—
Benevides-Lopes (BL)	Benevides & Lopes (1970)	$ET_o = a \cdot 10^{\left[\frac{7,5 \cdot T}{237,5 + T}\right]} (1 - 0,01 \cdot UR) + b \cdot T - c$	1,21	0,21	2,3
Turc (TU)	Turc (1955)	$ET_o = a \cdot \left[ \frac{T_{max}}{T_{max} + b} \right] (c + K \downarrow \cdot 23,88)$	0,013	15	50
Linacre (LI)	Linacre (1977)	$ET_o = \frac{a \cdot T_H (100 - \theta)^{-1} + b \cdot (T - T_d)}{c - T}$	500	15	80
Priestley-Taylor (PT)	Priestley & Taylor (1972)	$ET_o = a \frac{\Delta'}{\Delta' + \gamma} \cdot \frac{(Q^* - G)}{2,45}$	1,26	—	—
Tanner-Pelton (TP)	Tanner & Pelton (1960)	$ET_o = a \cdot Q^*/2,45 - b$	1,12	0,11	—
Makkink (MK)	Makkink (1957)	$ET_o = a \cdot \frac{\Delta'}{\Delta' + \gamma} \cdot \frac{K \downarrow}{2,45} - b$	0,61	0,12	—

\* $ET_o$ : evapotranspiração de referência ( $mm \text{ dia}^{-1}$ );  $\Delta$  é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );  $\Delta'$  é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água ( $hPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ); T a temperatura média diária ( $^\circ C$ );  $Q^*$  é o saldo de radiação ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $0,0662 \text{ kPa } ^\circ C^{-1}$ );  $U_2$  a velocidade média diária do vento a 2 m de altura ( $m \text{ s}^{-1}$ ), d o déficit de saturação de vapor do ar ( $kPa$ ); L o calor latente de evaporação ( $2,46 \text{ MJ kg}^{-1}$ );  $Q_o$  a radiação solar na ausência de atmosfera ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ); UR a umidade relativa do ar (%);  $T_{max}$  a temperatura máxima diária do ar ( $^\circ C$ );  $T_d$  a temperatura do ponto de orvalho do ar ( $^\circ C$ );  $T_H$  a temperatura do ar equivalente ao nível do mar ( $^\circ C$ ),  $T_H = T + 0,006 \cdot H$ , sendo H a altitude do local (m); G a densidade de fluxo de calor no solo ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) e  $K \downarrow$  a radiação solar global incidente ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).





## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando os valores diários da evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith com os demais métodos de estimativa da ETo com coeficientes originais observa-se que o desempenho foi bastante variável (Tabela 2). Os melhores resultados foram obtidos com métodos que utilizam o saldo de radiação ou a radiação solar global incidente. O método de TP foi o único que superestimou os valores de PM, os demais subestimaram.

Os coeficientes ajustados para as condições meteorológicas de Santa Maria são apresentados na Tabela 2. Os métodos de Benevides-Lopes e Linacre não melhoram o desempenho após o ajuste dos coeficientes. Portanto, para estes dois métodos, em de Santa Maria recomenda-se o uso dos coeficientes originais apresentados na Tabela 1.

Verifica-se, na Tabela 2, que a calibração dos coeficientes pode promover uma considerável melhoria de desempenho dos métodos, tendendo a aproximar os coeficientes angulares das retas de regressão de comparação dos valores estimados para a unidade, como pode ser observado, por exemplo, para o método de Makkink de 0,738 para 0,921, considerando os coeficientes originais e os ajustados, respectivamente.

Tabela 2 – Análise de regressão linear da ETo diária calculada por diferentes de métodos de estimativa em relação ao calculado pelo método de Penman-Monteith, utilizando coeficientes originais e coeficientes ajustados para Santa Maria, RS.

Método analisado	Com coeficientes originais				Com coeficientes ajustados				Coeficientes ajustados		
	Coef. Ang.	Coef. Linear	Coef. Det. (r <sup>2</sup> )	RQME <sup>1</sup>	Coef. Ang.	Coef. Linear	Coef. Det. (r <sup>2</sup> )	RQME	a <sup>2</sup>	b	c
CM <sup>3</sup>	0,475	1,189	0,62	1,43	0,579	1,450	0,62	1,26	0,0122	—	—
BL	0,554	1,138	0,44	1,61	0,581	1,188	0,44	1,60	*	*	*
TU	0,811	0,656	0,93	0,59	0,929	0,244	0,93	0,53	0,021	31,2517	-0,6580
LI	0,331	1,439	0,44	1,75	0,415	2,007	0,46	1,50	*	*	*
PT	0,700	-0,365	0,97	1,52	1,110	-0,579	0,97	0,50	1,998	—	—
TP	1,163	-0,152	0,99	0,53	0,998	-0,008	0,99	0,09	0,9607	-0,0435	—
MK	0,738	0,288	0,92	0,91	0,921	0,265	0,92	0,57	0,7608	0,2434	—

<sup>1</sup>RQME é a raiz do quadrado médio do erro (RQME) calculada conforme JANSSEN & HEUBERGER (1995), em mm d<sup>-1</sup>.

<sup>2</sup>Coeficientes calibrados (a, b, c) para as condições de Santa Maria, RS.

<sup>3</sup>CM = Camargo; BL = Benevides-Lopes; TU = Turc; LI = Linacre; PT = Priestley-Taylor; TP = Tanner-Pelton e MK = Makkink.

\* Não houve melhora no desempenho do método por meio da calibração dos coeficientes, deste modo, recomenda-se o coeficiente original.

A equação de Tanner-Pelton foi a que apresentou melhor desempenho. Utilizando-se os coeficientes ajustados, o RQME obtido foi de apenas 0,09 mm d<sup>-1</sup>. Este método pode ser uma alternativa ao método de Penman-Monteith quando não há disponibilidade de dados de velocidade do vento e/ou umidade do ar. O método de Priestley-Taylor também pode ser uma alternativa na ausência de dados de velocidade do vento e/ou umidade do ar, contudo o erro na estimativa é maior comparado ao método Tanner-Pelton.





**XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – XVIII CBA  
2013 e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia**  
Belém - PA, Brasil, 02 a 06 de Setembro 2013  
**Cenários de Mudanças Climáticas e a Sustentabilidade  
Socioambiental e do Agronegócio na Amazônia**



Na ausência de dados de radiação solar ou saldo de radiação, a alternativa recai nos métodos que necessitam somente de dados de temperatura, como o método de Camargo, que foi o de melhor desempenho. Contudo, este método possui limitações, sendo pouco indicado para Santa Maria, pois tende a subestimar a evapotranspiração de referência, principalmente em dias com maior demanda atmosférica por vapor d'água.

## CONCLUSÕES

O ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência dos métodos de Camargo, Turc, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton e Makkink, permite obter uma melhor precisão na estimativa da ETo do que com os coeficientes originais.

Os coeficientes ajustados para Santa Maria, RS, possibilitam utilizar os métodos alternativos, como os de Turc, Priestley-Taylor, Makkink e, principalmente, Tanner-Pelton, quando da limitação de disponibilidade de dados para estimativa da ETo pelo método de Penman-Monteith.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão das bolsas de alguns dos autores.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 299p.

BENAVIDES, J. G.; LOPEZ, D. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S), **Agronomia Tropical**, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

CAMARGO, A. P. **Balanco hídrico no Estado de São Paulo**. 3ª ed., Campinas, IAC. 24 p. 1971. (Boletim 116).

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process - oriented models. **Ecological Modeling**, v. 83, n. 1-2, p. 55-56, 1995.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature alone. **Agricultural Meteorology**, v. 18, p. 409-429, 1977.

MAKKINK, G. F. Ekzamenno de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 5, p. 290-305, 1957.





XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – XVIII CBA  
2013 e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia  
Belém - PA, Brasil, 02 a 06 de Setembro 2013  
**Cenários de Mudanças Climáticas e a Sustentabilidade  
Socioambiental e do Agronegócio na Amazônia**



MEDEIROS, S. L. P. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p.105-109, 1998.

MENDONÇA, J. C. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n. 2, p. 275-279, 2003.

PEREIRA, A. R. et al. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81-92, 1972.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. 49p. Documentos, 55.

TANNER, C. B., PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 65, p. 3391-3403, 1960.

TURC, L. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporations et l'écolement. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 6, p. 5-131, 1955.

