

# EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM PIRACICABA-SP: I. AJUSTE E VALIDAÇÃO DE MODELOS BASEADOS EM ANÁLISE DE REGRESSÃO

ANDREA I. IRIGOYEN<sup>1</sup>, LUIZ R. ANGELOCCI<sup>2</sup>, JONES SIMON<sup>3</sup>

- 1 Eng. Agrônoma, M. Sc., Fac. de Ciências Agrárias, UNMdP, Balcarce, Argentina, doutoranda do Programa Física do Ambiente Agrícola ESALQ-USP, Piracicaba-SP, airigoyen@balcarce.inta.gov.ar
- 2 Eng. Agrônomo, Prof. Associado, Depto. Ciências Exatas, ESALQ, USP, Piracicaba-SP, bolsista CNPq
- 3 Eng. Agrônomo, doutorando do Programa Física do Ambiente Agrícola ESALQ-USP, Piracicaba-SP

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia  
- 22 a 25 de setembro de 2009 - GranDarrell Minas Hotel, Belo Horizonte, MG

**RESUMO:** O método de Penman-Monteith tem sido proposto como método padrão de estimativa de evapotranspiração de referência. Embora, na escala mensal exista uma diversidade de métodos que conseguem gerar estimativas próximas daquelas do método padrão, torna-se importante avaliar métodos para estimar a evapotranspiração de referência para casos com dados faltantes de uma ou mais variáveis em escala de tempo mais reduzida. O trabalho objetivou avaliar modelos baseados em análise de regressão para estimar a evapotranspiração de referência na escala diária na localidade de Piracicaba, reduzindo o número de variáveis requeridas para aplicar o método padrão FAO-56 ( $ET_{OPM}$ ). Bom desempenho foi obtido para qualquer modelo baseado em regressão quando disponíveis os dados de saldo de radiação ( $R_n$ ) ou radiação solar ( $R_g$ ), mesmo que faltantes uma ou mais das outras variáveis necessárias para aplicar o método padrão Penman-Monteith.

**Palavras-Chave:** regressão, modelagem

## REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN PIRACICABA-SP: I. ADJUSTMENT AND VALIDATION OF BASED REGRESSION MODELS

**ABSTRACT:** The FAO-Penman-Monteith equation ( $ET_{OPM}$ ) is recommended as the standard method for computation of daily or hourly reference evapotranspiration. Lack of complete set of weather data is a common situation and therefore estimates from a few meteorological variables become interesting. The objective was to test models based in regression analyses and limited meteorological variables to estimate  $ET_{OPM}$ . Good performance was obtained for any model when net radiation or solar radiation data were available, even missing one and more of other variables required by the Penman-Monteith equation.

**Key-words:** regression, modelling

**INTRODUÇÃO:** O método de Penman-Monteith tem sido proposto como método padrão de evapotranspiração de referência. Localmente, tem apresentado bom desempenho quando comparado com dados lisimétricos (SENTELHAS, 1998). Dentre as vantagens desse método podem ser citadas a abordagem física e a adequada representação do processo em períodos curtos, enquanto como desvantagem principal destaca-se a demanda de variáveis que nem sempre se encontram disponíveis, especialmente as envolvidas na solução do termo aerodinâmico. Com relação à falta de dados de radiação, mesmo que a radiação extraterrestre apresente menor grau de associação com a evapotranspiração de referência, esta pode resultar

em uma forma simples de se dispor de alguma medida de energia, já que pode ser calculada simplesmente a partir de latitude da localidade e data (HARGREAVES e SAMANI, 1985). A maioria das equações empíricas não é de aplicação universal, sem previa calibração local. Embora, na escala mensal exista uma diversidade de métodos que apresentam resultados próximos das estimativas do método padrão (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), torna-se importante avaliar métodos para casos com dados faltantes em uma ou mais das variáveis, mesmo em escala de tempo mais reduzida. A presença de correlação entre as variáveis determinantes pode ser um obstáculo na aplicação de modelos de estimativa da evapotranspiração de referencia baseados em regressão. O objetivo deste trabalho foi avaliar modelos baseados em regressão para estimar a evapotranspiração de referência com redução do numero de variáveis requeridas para aplicar o método padrão FAO-56 ( $ET_{oPM}$ ) na localidade de Piracicaba, SP, disponibilizando inicialmente alguma medida da energia necessária para o processo.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A evapotranspiração de referência ( $mm\ d^{-1}$ ) foi calculada seguindo o método padrão proposto pela FAO (ALLEN et al., 1998) a partir de dados diários seguindo a equação parametrizada:

$$ET_{oPM} = \frac{0,408 \delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_{ar} + 273} u(DPV)}{\delta + \gamma(1 + 0,34 u)}$$

em que  $Rn$  é o saldo de radiação ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ),  $T_{ar}$  é a temperatura do ar a 2 m ( $^{\circ}C$ ),  $u$  é a velocidade do vento a 2 m ( $m\ s^{-1}$ ),  $DPV$  é déficit de pressão de vapor (kPa),  $\delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura  $T_{ar}$  ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ ) e  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ ). Integraram-se os valores horários registrados em estação automática localizada no campus da ESALQ-USP, Piracicaba, SP, Brasil (latitude:  $22^{\circ}\ 42'S$ ; longitude:  $47^{\circ}\ 30'W$ ; altitude: 546 m) no período 1997-2006. O cálculo de  $DPV$  foi realizado considerando a umidade relativa média de 24 horas (LYRA et al., 2003). O saldo de radiação ( $Rn$ ) foi estimado a partir da radiação global medida ( $Rg$ ) seguindo a relação discutida por Sentelhas et al. (2003) com ajustes mensais. O fluxo de calor no solo ( $G$ ) foi estimado de acordo com Allen et al. (1998), a partir da temperatura média diária e a temperatura média diária do dia anterior. A série de valores estimados de  $ET_{oPM}$  foi dividida nos subconjuntos de ajuste (1997-2004) e validação de modelos (2005-2006). Primeiramente, foram ajustados modelos que consideraram a entrada de valores diários de saldo de radiação ( $Rn$ ) ou radiação solar ( $Rg$ ) e alternassem alguma combinação das variáveis: temperatura média diária ( $T_{ar}$ ), déficit de pressão de vapor médio diário ( $DPV$ ) e velocidade do vento média diária ( $u$ ). Outros conjuntos de modelos foram ajustados sobre a base de valores de radiação teórica ( $RTA$ ), expressa em  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$  e estimada a partir da latitude e dia do ano. O desempenho dos modelos foi avaliado tanto através de análise de regressão, quanto dos índices raiz quadrada do quadrado médio do erro ( $RSME$ ), erro médio absoluto ( $MAE$ ), desvio médio ( $MBE$ ) e índice ( $d$ ) de concordância (WILLMOTT,1982).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Um padrão sazonal nos valores de  $ET_{oPM}$  foi característico na série analisada, com um valor médio anual de  $3,1\ mm\ d^{-1}$ . A contribuição do termo radiativo à evapotranspiração de referencia foi predominante, atingindo um valor médio anual de 0,84 na proporção  $ET_{oPMrad}/ET_{oPM}$ . De outubro a junho essa proporção esteve acima de 0,84 e embora tenha diminuído no inverno, não foi inferior a 0,75. Os valores diários de radiação solar ( $Rg$ ) e saldo de radiação ( $Rn$ ) apresentaram elevado grau de associação linear ( $r \geq 0,95$ ) com os valores diários de  $ET_{oPM}$  (Tabela 1), mostrando que apenas uma relação simples explica grande parte da contribuição do termo radiativo à evapotranspiração de

referencia. Quando analisada a relação com as variáveis determinantes do termo aerodinâmico, os valores diários de DPV apresentaram uma relação mais estreita ( $r = 0,69$ ).

**Tabela 1.** Coeficientes de correlação simples ( $r$ ) entre valores diários de evapotranspiração de referência ( $ET_{OPM}$ ) e das variáveis determinantes na série completa (1997-2006).

	Rg	Rn	RTA	Tar	DPV	u
Rn	0,98					
RTA	0,47	0,47				
Tar	0,54	0,61	0,70			
DPV	0,60	0,55	0,70	0,41		
u	0,12	0,14	0,15	-0,13	0,13	
$ET_{OPM}$	0,95	0,97	0,58	0,66	0,69	0,20

Na Tabela 2 apresentam-se os parâmetros obtidos para os modelos que representam situações com disponibilidade de valores diários de Rn ou Rg e falta de valores de uma ou mais das outras variáveis necessárias para aplicar o método Penman-Monteith. Os ajustes foram significativos para todas as combinações com valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando entre 0,92 e 0,95. Os coeficientes linear (a) e angular (b) das equações ajustadas entre os valores estimados pelos modelos baseados em regressão simples ou múltipla e os valores obtidos pelo método padrão ( $ET_{OPM}$ ) não diferiram significativamente de 0 e 1, respectivamente (Tabela 3). Por sua vez, os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) na faixa de valores entre 0,92 e 0,98, expressam que grande parte da variação nos valores de  $ET_{OPM}$  pode ser explicada pela variação obtida pelos modelos considerando uma ou mais variáveis faltantes caso se tenha disponibilidade de dados de Rn ou Rg. Ainda o modelo que emprega apenas os valores diários de Rn obteve um desempenho satisfatório, com valor de RSME de  $0,259 \text{ mm d}^{-1}$  e de MAE de  $0,189 \text{ mm d}^{-1}$  que representa um erro relativo de 6% em relação ao valor médio de  $ET_{OPM}$ . O déficit de pressão de vapor foi a variável mais efetiva quando Rn já estava inclusa no modelo, provocando uma diminuição de 30% no valor de RSME e de 26% no valor de MAE.

**Tabela 2.** Coeficientes obtidos no ajuste por regressão quando considerados inicialmente os valores diários de Rn ou Rg. Erros padrão dos coeficientes entre parênteses.

Modelo	a	Rn/Rg	Tar	DPV	u
Reg $ET_{OPM}$ (Rn)	0,040 (0,016)	0,303 (0,001)			
Reg $ET_{OPM}$ (Rn, Tar)	-0,614 (0,037)	0,283 (0,002)	0,041(0,002)		
Reg $ET_{OPM}$ (Rn, DPV)	-0,015 (0,009)	0,264 (0,001)		0,879 (0,013)	
Reg $ET_{OPM}$ (Rn, Tar, DPV)	-0,488 (0,024)	0,250 (0,001)	0,030 (0,001)	0,860 (0,014)	
Reg $ET_{OPM}$ (Rn, u)	-0,118 (0,018)	0,300 (0,001)	0,147 (0,008)		
Reg $ET_{OPM}$ (Rn, Tar, u)	-1,034 (0,037)	0,272 (0,002)	0,054 (0,002)		0,200 (0,002)
Reg $ET_{OPM}$ (Rn, DPV, u)	-0,145 (0,011)	0,262 (0,001)		0,875 (0,013)	0,121 (0,005)
Reg $ET_{OPM}$ (Rg)	-0,267 (0,022)	0,182 (0,001)			
Reg $ET_{OPM}$ (Rg, Tar)	-1,508 (0,039)	0,161 (0,001)	0,077 (0,002)		
Reg $ET_{OPM}$ (Rg, DPV)	-0,250 (0,018)	0,160 (0,001)		0,784 (0,023)	
Reg $ET_{OPM}$ (Rg, Tar, DPV)	-1,341 (0,033)	0,144 (0,001)	0,0678 (0,002)	0,674 (0,020)	
Reg $ET_{OPM}$ (Rg, u)	-0,450 (0,023)	0,180 (0,001)			0,171 (0,010)
Reg $ET_{OPM}$ (Rg, Tar, u)	-1,991 (0,036)	0,154 (0,001)	0,090 (0,002)		0,253 (0,008)
Reg $ET_{OPM}$ (Rg, DPV, u)	-0,406 (0,020)	0,158(0,001)		0,754 (0,023)	0,148 (0,008)

A consideração conjunta de Tar e DPV provocou uma diminuição de 36% do valor de RSME. Por sua vez, a temperatura do ar resultou mais efetiva na redução dos valores de RSME (16%) e de MAE (15%) quando incluída no modelo que já tinha presente Rg. Com a disponibilidade de dados de Tar e DPV resultou mais conveniente o uso da expressão da energia disponível na forma de Rn, mediante a aplicação da relação obtida por Sentelhas e Nascimento (2003), já que significou uma redução do RSME de 30% em relação à inclusão de somente Rg no modelo. Os valores de MBE foram baixos (no máximo 0,067 mm d<sup>-1</sup>) e sempre positivos. Os índices de concordância (d) demonstraram exatidão na estimativa dos valores diários de ET<sub>OPM</sub>. O bom desempenho geral é decorrente da elevada associação linear entre a variável ET<sub>OPM</sub> com as formas de energia disponível, seja Rn ou Rg e, por outra parte, da importante contribuição do termo radiativo à evapotranspiração de referência. Por essa mesma razão a falta de dados diários de alguma expressão da energia disponível constitui um problema na modelagem empírica da evapotranspiração. Embora, a radiação teórica (RTA) apresentasse menor grau de associação linear com a evapotranspiração de referência, constitui-se uma alternativa quando não se dispõe facilmente de alguma medida de energia. Os ajustes foram significativos para todas as combinações de variáveis com RTA, mas observaram-se maiores erros na estimativa do parâmetro a (Tabela 4). Os valores de MAE para modelos que consideraram a inclusão de RTA variaram entre 0,4 e 0,7 mm d<sup>-1</sup>, representando entre 14 e 23 % do valor médio de ET<sub>OPM</sub> (Tabela 5).

**Tabela 3.** Índices obtidos na validação de modelos baseados em regressão para estimar valores diários de ET<sub>OPM</sub> quando considerados inicialmente os valores diários de Rn ou Rg.

Modelo	a mm d <sup>-1</sup>	b	R <sup>2</sup>	RSME mm d <sup>-1</sup>	MAE mm d <sup>-1</sup>	MBE mm d <sup>-1</sup>	d
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn)	-3 x10 <sup>-8</sup>	0,9829	0,95	0,259	0,189	0,052	0,985
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn, Tar)	-0,0174	0,9837	0,95	0,251	0,193	0,067	0,986
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn, DPV)	0,0192	0,9890	0,97	0,179	0,140	0,014	0,993
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn, Tar, DPV)	0,0040	0,9891	0,98	0,167	0,129	0,029	0,994
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn, u)	0,0254	0,9775	0,95	0,259	0,189	0,043	0,986
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn, Tar, u)	0,0057	0,9780	0,95	0,241	0,183	0,059	0,988
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rn, DPV, u)	0,0352	0,9850	0,97	0,175	0,138	0,010	0,994
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg)	- 0,0253	0,9928	0,92	0,316	0,246	0,047	0,978
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg, Tar)	- 0,0621	0,9958	0,94	0,265	0,209	0,075	0,985
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg, DPV)	0,0226	0,9865	0,93	0,294	0,248	0,018	0,981
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg, Tar, DPV)	- 0,0259	0,9932	0,95	0,240	0,189	0,047	0,988
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg, u)	0,0048	0,9865	0,92	0,313	0,247	0,036	0,978
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg, Tar, u)	- 0,0370	0,9912	0,96	0,238	0,189	0,064	0,988
Reg ET <sub>OPM</sub> (Rg, DPV, u)	0,0384	0,9839	0,93	0,288	0,243	0,010	0,982

**Tabela 4.** Coeficientes obtidos no ajuste por regressão quando considerados os valores diários de radiação teórica (RTA). Erros padrão dos coeficientes entre parênteses.

Modelo	a	RTA	Tar	DPV	u
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA)	-0,181 (0,099)	0,099 (0,003)			
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA, Tar)	-2,261 (0,112)	0,038 (0,003)	0,195 (0,007)		
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA, DPV)	-1,149 (0,057)	0,088 (0,002)		2,564 (0,037)	
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA, Tar, DPV)	-1,408 (0,078)	0,080 (0,002)	0,028 (0,006)	2,457 (0,043)	
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA, u)	-0,369 (0,092)	0,096 (0,003)			0,225 (0,029)
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA, Tar, u)	-3,120 (0,115)	0,018 (0,003)	0,237 (0,007)		0,487 (0,026)
Reg ET <sub>OPM</sub> (RTA, DPV, u)	-1,205 (0,058)	0,087 (0,002)		2,544 (0,037)	0,076 (0,018)

O déficit de pressão de vapor foi a variável mais efetiva quando RTA já estava inclusa no modelo, provocando uma diminuição de 41% no valor de RSME e de 37% no valor de MAE. A consideração conjunta de Tar e DPV não modificou significativamente os valores de RSME ou MAE em relação aos obtidos com a combinação de DPV e RTA. Apenas as combinações incluindo DPV atingiram índices de concordância na ordem dos obtidos com modelos baseados em Rn ou Rg. Os erros foram menores que os descritos para estimativas na escala mensal (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

**Tabela 5.** Índices obtidos na validação de modelos de estimativa de valores diários de  $ET_{OPM}$  quando considerados os valores de radiação teórica (RTA).

Modelo	a mm d <sup>-1</sup>	b	R <sup>2</sup>	RSME mm d <sup>-1</sup>	MAE mm d <sup>-1</sup>	MBE mm d <sup>-1</sup>	d
Reg $ET_{OPM}$ (RTA)	0,268	0,8602	0,32	0,918	0,691	0,173	0,721
Reg $ET_{OPM}$ (RTA, Tar)	0,159	0,8845	0,42	0,856	0,659	0,210	0,779
Reg $ET_{OPM}$ (RTA, DPV)	0,015	0,9871	0,75	0,545	0,432	0,024	0,924
Reg $ET_{OPM}$ (RTA, Tar, DPV)	0,010	0,9851	0,75	0,548	0,437	0,035	0,923
Reg $ET_{OPM}$ (RTA, u)	0,297	0,8553	0,33	0,910	0,691	0,157	0,728
Reg $ET_{OPM}$ (RTA, Tar, u)	0,082	0,9164	0,48	0,805	0,630	0,183	0,808
Reg $ET_{OPM}$ (RTA, DPV, u)	0,015	0,9886	0,75	0,542	0,430	0,019	0,926

**CONCLUSÕES:** Bom desempenho foi obtido para qualquer modelo baseado em regressão quando disponíveis os dados de saldo de radiação (Rn) ou radiação solar (Rg), mesmo que estejam faltando uma ou mais das outras variáveis necessárias para aplicar o método Penman-Monteith. O uso de dados de radiação extraterrestre (RTA) em modelos semelhantes resultou em índices de desempenho menos satisfatórios. Novas combinações de variáveis e/ou tipos de modelos precisam ser avaliadas para casos de falta de medida de radiação solar ou saldo de radiação.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration. Guides for computing crop water requirements.** FAO Irrigation Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 p.1998.

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.

HARGREAVES, G.H.; Z.A. SAMANI. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Transaction of ASAE**, v. 1, p. 96-99, 1985.

LYRA, G. et al. Média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água e sua influencia na evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith em Piracicaba-SP. **Engenharia Agrícola**, v.4, p. 328-337, 2004.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** 1998. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, 1998. 97 p.

SENTELHAS, P. C.; A. NASCIMENTO. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, p.71-77, 2003.

WILLMOTT, C.J. 1982. Some comments on evaluation of model performance. **American Meteorology Society**, v. 63:1309-1313, 1982.