

## **Ajuste de uma Equação de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Pelotas - RS**

**Márcia Oliveira Curi Hallal\***, **Edgar Ricardo Schöffel\***, **Gabriel Franke Brixner\***, **André Luiz Radünz\***  
*marciahallal@hotmail.com, ricardo\_schoffel@uol.com.br, brixner\_gfb@yahoo.com.br, alradunz@yahoo.com.br*

*Recebido: 14/06/12 - revisado: 09/05/13 - aceito: 02/12/13*

### **RESUMO**

*Este trabalho teve como objetivo identificar as variáveis meteorológicas mais influentes na estimativa da evapotranspiração diária obtida pelo método de Penman-Monteith na região de Pelotas, selecionar um método mais simples que as utilize e propor um ajuste de seus parâmetros ou constantes às condições climáticas locais para melhorar seu desempenho frente ao método padrão. Foi determinada a correlação das variáveis meteorológicas com as estimativas da evapotranspiração realizadas com dados meteorológicos diários da Estação Agroclimatológica de Pelotas-RS no período entre os anos de 1971 e 2010. A radiação solar e o saldo de radiação foram as variáveis mais influentes em todos os métodos que as utilizam. O método de Jensen-Haise, por utilizar somente dados de radiação solar e temperatura e apresentar índice de desempenho em relação ao método padrão em torno de 0,6, foi escolhido para modificação em suas constantes. A expressão do método com as constantes adaptadas à região apresentou coeficiente de desempenho superior aos da equação original em todas as estações do ano, apresentando índice  $c$  de 0,75 e 0,85 no verão e primavera, respectivamente, sendo, portanto seu uso indicado para a região de Pelotas.*

**Palavras-chave:** correlação, variáveis meteorológicas, Penman-Monteith, Jensen-Haise.

### **INTRODUÇÃO**

A necessidade de se produzir produtos alimentícios diversificados com qualidade, produtividade e em maior quantidade exigem da comunidade científica novos conhecimentos sobre as reais necessidades hídricas das culturas (REIS et al., 2007).

Apesar de algumas dificuldades relacionadas à obtenção de dados e à precisão (PRASAD, 2013), a estimativa da evapotranspiração é a forma mais prática e que proporciona maior agilidade nos resultados permitindo ações rápidas no manejo de irrigação. Uma estimativa adequada da evapotranspiração facilita o estabelecimento de políticas de uso racional da água. (KOBAYAMA & VESTENA, 2006)

A evapotranspiração de referência pode ser obtida por métodos diretos e indiretos. Os diretos são geralmente utilizados em projetos de pesquisa devido ao elevado custo dos equipamentos. Os indiretos, menos onerosos, baseiam-se na aplicação de métodos matemáticos que utilizam dados meteorológicos (PEREIRA et al., 1997).

A expressão descrita por Penman-Monteith é reconhecida pela Food and Agriculture Organization (FAO) como a mais precisa para estimar a evapotranspiração de referência e é utilizada como padrão de comparação com os outros métodos (PRASAD, 2013; PILAU et al. 2012; SOUZA et al., 2010; MENDONÇA & DANTAS, 2010; SILVA et al., 2005; OLIVEIRA & CARVALHO, 1998).

Segundo Andrade et al. (2003), o conhecimento das variáveis de maior relevância na estimativa da evapotranspiração de referência em uma região é fator importante para se fazer a seleção mais adequada do modelo a ser aplicado. Ao medir a evapotranspiração da cultura do pimentão cultivado em lisímetros no interior de estufa plástica, Dalmago et al. (2006) concluíram que o saldo de radiação externo à estufa e o déficit de saturação do ar médio no interior da estufa foram as variáveis meteorológicas que apresentaram maior relação com a evapotranspiração da cultura durante o outono. Segundo Araújo et al. (2011), as variáveis radiação global e temperatura média do ar foram as únicas variáveis meteorológicas que apresentaram efeito direto sobre a evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman-Monteith, na região sul do Espírito Santo. Os autores orientam que métodos que não consideram essas variáveis podem levar a

\*Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – Programa de Pós-Graduação em Sistema de Produção Agrícola Familiar (PPGS-PAF)

erros na estimativa da evapotranspiração de referência.

Muitas das expressões amplamente utilizadas para estimar a evapotranspiração são adaptações de outras anteriormente conhecidas, aprimoradas com a finalidade de apresentar melhor ajuste a determinadas localizações geográficas em estudo. Com essa finalidade, por exemplo, Borges e Mendiondo (2007) verificaram a precisão dos métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Camargo, Thornthwaite, Hamon e Karrufa na comparação como o método de Penman-Monteith, para a bacia do rio Jacupiranga, em São Paulo. Os autores propuseram novos valores para as constantes e para alguns parâmetros das equações que proporcionaram aumento no nível de confiança em todos os métodos, apresentando o índice de desempenho c superior a 0,90 em todas as comparações. No clima úmido do leste da China, Xu et al. (2013) verificaram que métodos baseados na radiação solar apresentaram desempenho muito melhores do que métodos baseado na temperatura. Avaliando métodos que utilizam basicamente a temperatura para estimar a evapotranspiração de referência para doze cidades no sul do Canadá, Sentelhas et al. (2010) concluíram que os métodos de Hargreaves-Samani e Thornthwaite, após alguns ajustes, foram as opções mais adequadas para estimar a evapotranspiração de referência na região. Segundo Carvalho et al. (2011), trabalhos dessa natureza evidenciam que a calibração de alguns parâmetros dos métodos pode melhorá-los consideravelmente.

Assim, os objetivos desse trabalho foram identificar as variáveis meteorológicas mais influentes na estimativa da evapotranspiração diária obtida pelo método de Penman-Monteith na região de Pelotas e selecionar aquele que utilize essas variáveis, com uma expressão de fácil utilização, e que possibilite ajustar seus parâmetros ou constantes às condições climáticas locais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido com dados meteorológicos do acervo histórico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, instalada na cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul, considerando o período entre os anos de 1971 a 2010. A mesorregião de Pelotas ( $31^{\circ}52' S$  e  $52^{\circ}21' W$ , 13 m de altitude) possui clima do tipo subtropical úmido, com temperatura média anual de  $17,8^{\circ}C$ , sendo que a temperatura média do mês mais frio (julho) é de  $12,3^{\circ}C$  e

do mês mais quente (janeiro) é de  $23,2^{\circ}C$ , com chuva anual de 1367 mm, regularmente distribuída ao longo do ano (EAPEL, 2011).

Os valores da evapotranspiração de referência foram estimados pelos métodos do Tanque Classe A (EToTA), Thornthwaite (EToTH), Camargo (EToCA), Makkink (EToMK), Radiação Solar (EToRS), Jensen-Haise (EToJH), Linacre (EToLI), Hargreaves-Samani (EToHS), Blaney-Criddle (EToBC), e Penman-Monteith (EToPM) descritos pelas seguintes expressões:

$$ET_{o\_TH} = 16 \left( 10 \frac{T_i}{I} \right)^{\frac{1}{3}} \quad T_i > 0^{\circ}C \quad (1)$$

$$ET_{o\_CA} = F Q_o TND \quad (2)$$

$$ET_{o\_MK} = 0,61 WR_s - 0,12 \quad (3)$$

$$ET_{o\_RS} = c_0 + c_1 WR_s \quad (4)$$

$$ET_{o\_JH} = R_s (0,0252 T + 0,078) \quad (5)$$

$$ET_{o\_LI} = \frac{500 (T + 0,006 h) + 15 (T - T_o)}{100 - \theta} \quad (6)$$

$$ET_{o\_HS} = 0,0023 Q_o (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8) \quad (7)$$

$$ET_{o\_BC} = a' + b p (0,46 T + 8,13) \quad (8)$$

$$ET_{o\_PM} = \frac{0,408 s (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_z (\theta_s - \theta_a)}{s + \gamma (1 + 0,34 U_z)} \quad (9)$$

onde:  $T_i$  é a temperatura média mensal;  $I$  e  $a$  são índices que expressam o nível de calor disponível;  $Q_o$  é radiação solar extraterrestre diária expressa em equivalente de evaporação ( $mm\ d^{-1}$ );  $T$  é temperatura média no período ( $^{\circ}C$ );  $ND$  é número de dias do período;  $F$  fator de ajuste variável com a temperatura média;  $R_s$  é radiação solar global ao nível da superfície ( $mm\ d^{-1}$ );  $W$  fator de ponderação em função da temperatura de bulbo úmido ( $^{\circ}C$ );  $c_0$  e  $c_1$  são coeficientes da equação;  $\theta$  é a latitude local ( $^{\circ}$ );  $h$  é a altitude local (m);  $T_o$  é a temperatura média do ponto de orvalho do período ( $^{\circ}C$ );  $T_{max}$  temperatura máxima diária ( $^{\circ}C$ );  $T_{min}$  temperatura mínima diária ( $^{\circ}C$ );  $a'$  e  $b$  coeficientes relacionados a

umidade relativa e a relação horas de brilho solar e o fotoperíodo;  $p$  é a porcentagem do total do fotoperíodo médio diário mensal sobre o total o fotoperíodo anual;  $G$  é fluxo de calor no solo ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ );  $U_2$  é a velocidade média diária do vento medida a 2 m de altura ( $m \cdot s^{-1}$ );  $e_s$  é a pressão de saturação de vapor (kPa);  $e_a$  é a pressão atual de vapor (kPa);  $s$  é a declividade da curva de pressão de vapor ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $\gamma$  e  $\gamma^*$  são os coeficientes psicométricos ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ );  $\lambda$  é o calor latente de evaporação ( $2,45 \cdot MJ \cdot Kg^{-1}$ ).

Após a determinação da estimativa diária da evapotranspiração de referência por todos os métodos, foi feita a comparação individual de cada um deles com o método padrão de Penman-Monteith através da correlação linear.

O coeficiente de correlação  $r$  indica a precisão da correlação medindo o grau de dispersão dos dados em relação à média, expresso por:

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

onde:  $x_i$  são os valores a ser comparados com o método padrão;  $y_i$  são valores estimados pelo método padrão e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  as médias respectivas de  $x_i$  e  $y_i$  (MAYER, 1976).

A partir do coeficiente de correlação  $r$  obtém-se o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) que mede em valor absoluto o grau de relação entre as variáveis.

O grau de através do teste “t” Student e foi comparado com o valor crítico de  $t$  com  $(n-2)$  graus de liberdade. A prova estatística foi feita pela expressão:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (11)$$

onde: a significância do coeficiente de correlação é determinada pelo valor do  $t$  calculado ser maior que o valor de  $t$  crítico no nível de 1%.

O indicador da exatidão, associado ao desvio entre os valores medidos e estimados, foi determinada pelo índice de Willmott ( $d$ ), segundo metodologia apresentada por Camargo e Sentelhas (1997) e Syperreck et al. (2008), expresso por:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum(x_i - y_i)^2}{\sum(|x_i - \bar{x}_i| + |y_i - \bar{y}_i|)^2} \right] \quad (12)$$

O índice de desempenho ( $c$ ), que representa o produto entre os índices de precisão ( $r$ ) e de exatidão ( $d$ ), foi utilizado para classificar a relação entre cada método com o método padrão, de acordo com a metodologia proposta por Camargo & Sentelhas (1997), da seguinte forma: a relação foi considerada ótima (OT), quando  $c$  apresentou valores maiores que 0,85; muito boa (MB), para valores entre 0,76 e 0,85; boa (BO), para valores entre 0,66 e 0,75; mediano (ME), para valores entre 0,61 e 0,65; sofrível (SO), para valores entre 0,51 e 0,60; mau (MA), para valores entre 0,41 e 0,50 e, péssima (PE), para valores do índice  $c$  inferiores a 0,41.

Para dar suporte a essa classificação também foi calculado o valor do Erro Padrão de Estimativa (EPE) através da expressão:

$$EPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (13)$$

As estimativas da evapotranspiração de referência foram determinadas para todos os métodos, na escala diária e os resultados foram agrupados sazonalmente.

Para identificar a participação de cada elemento meteorológico sobre a ET<sub>0</sub> foi determinada a correlação linear das variáveis meteorológicas com os valores das estimativas da ET<sub>0</sub> obtidas pelo método Penman-Monteith e, também, com os valores obtidos pelos métodos que mostraram melhor ajuste com padrão.

Entre os métodos de estimativa da ET<sub>0</sub> foi selecionado aquele que melhor se adaptou as seguintes características: utilizou as variáveis meteorológicas que mostraram alta correlação com a ET<sub>0</sub> pelo método padrão; apresentou valores de estimativa com correlação, no mínimo, boa com o método padrão; seja uma expressão simples. Nesta expressão foram feitos ajustes nos coeficientes, com a finalidade de melhor adaptá-la as condições climáticas da região, sendo que, o ajuste da equação foi feito utilizando o banco de dados de 1971 a 1999 e a validação, desta equação, foi feita com base no período de 2000 a 2010.

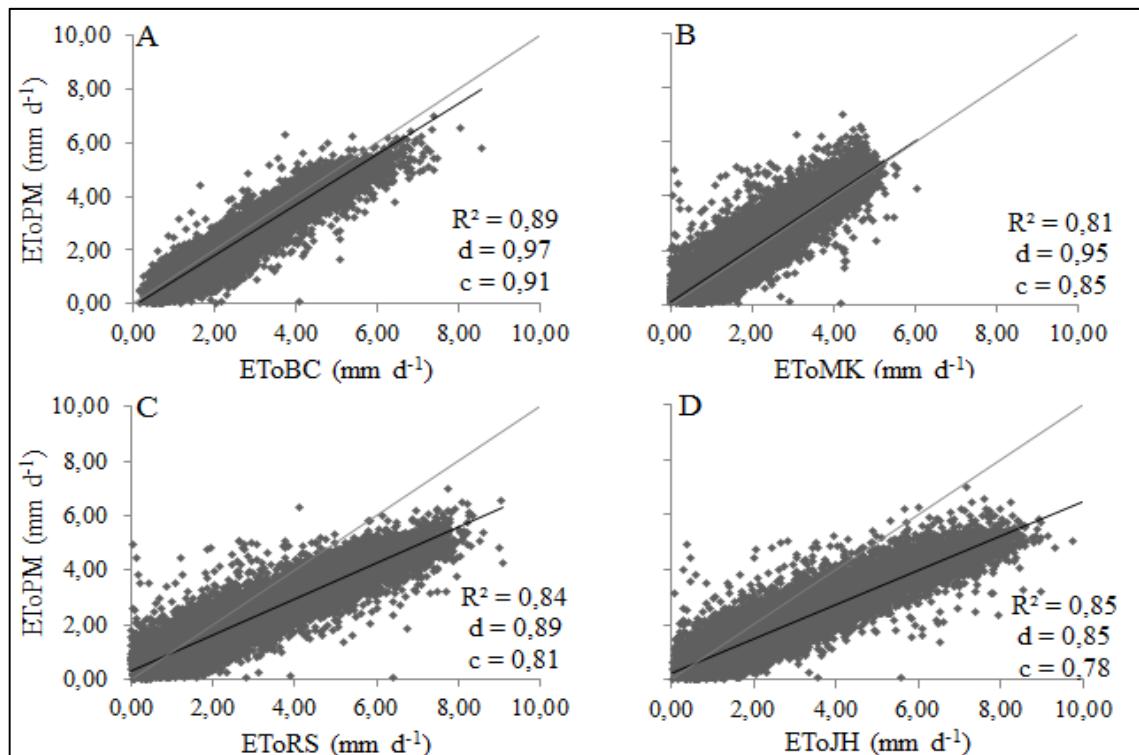


Figura 1- Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação da evapotranspiração diária (ETo  $\text{mm d}^{-1}$ ) dos métodos de Blaney-Criddle (A), Makkink (B), Radiação Solar (C) e Jensen-Haise (D) com o método de Penman-Monteith, com dados de Pelotas, RS, no período de 1971 a 2010.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da correlação do valor da estimativa por Penman-Monteith com os valores dos demais métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, na escala diária, mostrada na Tabela 1 sugere que os métodos de Camargo, Thornthwaite, Hargreaves-Samani e Tanque Classe A não devem ser utilizados em Pelotas em virtude do baixo desempenho apresentado por esses métodos em todas as estações do ano. O método de Linacre apresentou desempenho intermediário entre os métodos pesquisados (Tabela 1). Acredita-se que o desempenho destes métodos esteja relacionado ao fato de que estes métodos foram desenvolvidos na escala mensal, conforme revisão realizada por Carvalho et al. (2011).

Semelhante a estes resultados, Pilau et al. (2012), obtiveram coeficientes desempenhos entre 0,51 e 0,66 da estimativa da ETo para os métodos de Camargo e de Thornthwaite em Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, localizados no região do Alto Uruguai, RS. Em estudo abrangendo seis muni-

cípios da região da Campanha do RS, para o período de outubro a março, Brixner (2013) constatou que os métodos de Linacre, Camargo e Thornthwaite apresentaram o pior desempenho na estimativa da ETo diária em comparação ao método padrão, analisando 8 métodos.

Os métodos que apresentaram melhores desempenhos na comparação com Penman-Monteith foram os métodos de Blaney-Criddle, Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise. Tais resultados corroboram com aqueles obtidos por Pilau et al., (2012) e Brixner (2013), sendo que Pilau et al. (2012) encontraram desempenho ótimo para Makkink e Radiação Solar, e Brixner (2013) obteve desempenho muito bom para os mesmos métodos deste estudo (Blaney-Criddle, Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise).

Na Figura 1 é possível observar que o método de Blaney-Criddle apresenta a menor dispersão em relação ao método padrão, apresentando ótimo desempenho indicado pelos valores dos índices de desempenho (c) e de exatidão (d) e pelo coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Verifica-se também que o ajuste dos demais métodos destacados em relação ao método padrão é classificado como muito bom, o

que indica que esses métodos foram capazes de aproximar-se dos valores de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith, tanto por seus coeficientes e parâmetros, pelas variáveis utilizadas ou pela influência dessas variáveis em suas expressões.

**Tabela 1 - Valores do coeficiente de desempenho (c), do erro padrão de estimativa (EPE, mm d<sup>-1</sup>) e a classificação dos métodos da Radiação Solar (EToRS), Linacre (EToLI), Jensen-Haise (EToJH), Makkink (EToMK), Camargo (EToCA), Thornthwaite (EToTH), Blaney-Criddle (EToBC), Hargreaves-Samani (EToHS) e Tanque classe A (EToTA) em relação ao método de Penman-Monteith, obtidos com dados diários, na região de Pelotas, RS, no período de 1971 a 2010.**

Método		Verão	Outono	Inverno	Primavera
EToRS	c	0,7	0,7	0,5	0,7
	clasf	BO	BO	SO	BO
EToLI	EPE	1,3	0,8	0,8	1,4
	c	0,5	0,6	0,5	0,6
EToJH	clasf	MA	ME	MA	MA
	EPE	1,2	0,6	0,6	0,6
EToMK	c	0,6	0,6	0,5	0,7
	clasf	SO	ME	MA	BO
EToCA	EPE	1,8	1,0	0,8	1,5
	c	0,8	0,7	0,5	0,8
EToBC	clasf	MB	BO	MA	MB
	EPE	0,7	0,5	0,6	0,6
EToHS	c	0,2	0,5	0,2	0,3
	clasf	PE	MA	PE	PE
EToTA	EPE	1,2	0,7	0,6	1,0
	c	0,1	0,3	0,1	0,2
EToTH	clasf	PE	PE	PE	PE
	EPE	1,2	0,9	0,8	1,2
EToHS	c	0,9	0,8	0,6	0,9
	clasf	OT	MB	ME	OT
EToBC	EPE	0,4	0,5	0,5	0,5
	c	0,4	0,5	0,3	0,5
EToHS	clasf	MA	MA	PE	MA
	EPE	1,3	1,1	1,0	1,4
EToTA	c	0,4	0,4	0,3	0,5
	clasf	MA	MA	PE	MA
	EPE	1,9	1,5	0,4	1,8

\*Classificação para o índice desempenho OT- ótimo, MB- muito bom, BO- bom, ME- mediano, SO- sofrível, MA- mau, PE- péssima.

Assim, para quantificar a magnitude da influência das variáveis meteorológicas em cada método, foi utilizada a correlação linear simples cujos

resultados estão na Tabela 2, onde é possível verificar que, nos quatro métodos, as variáveis de maior relevância na estimativa de ETo estão relacionadas a radiação solar. Mesmo utilizando muitas variáveis meteorológicas, nota-se que no método de Penman-Monteith, o saldo de radiação apresentou coeficiente de correlação igual a 0,94, o que demonstra a grande influência desta variável na estimativa da evapotranspiração de referência nesta região.

A radiação solar global apresenta uma correlação de 0,88 com os valores da evapotranspiração estimados pelo método de Penman-Monteith, embora não seja usada diretamente na expressão do método. A variável apresentou a melhor correlação nos métodos da Radiação Solar e Makkink e Jensen-Haise com valores de 0,98 nos dois primeiros e 0,94 no último.

**Tabela 2 - Coeficiente de correlação entre as variáveis meteorológicas e a estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman-Monteith (EToPM), Blaney-Criddle (EToBC), Radiação Solar (EToRS), Makkink (EToMK) e Jensen-Haise (EToJH) em Pelotas, RS, no período de 1971 a 2010.**

Variáveis	EToPM	EToBC	EToRS	EToMK	EToJH
Rs	0,88		0,98	0,98	0,94
Rn	0,94				
Qo	0,82				
N	0,82	0,75			
n	0,65	0,7			
Tmax	0,64				
es	0,64				
T	0,63	0,64			
UR	-0,63	-0,67	-0,65		
Tu	0,51		0,41	0,46	
Tmin	0,49				
Ea	0,42				
Ud	0,27	0,34	0,19		

\*Rn: saldo de radiação; Rs: radiação solar global; Qo: radiação extraterrestre; N: fotoperíodo; n: horas de brilho solar; Tmax: temperatura máxima do ar; es: pressão de vapor na saturação; T: temperatura média do ar; UR: umidade relativa do ar; Tu: temperatura de bulbo úmido; Tmim: temperatura mínima do ar; ea: pressão atual de vapor; Ud: vento.

\*\* coeficiente de correlação r significativo a 1%.

Esses resultados corroboram aqueles obtidos em trabalhos realizados por Caixeta (2009), Ruhoff et al. (2009), Araújo et al. (2011) e por Xu et al. (2013) nos quais também houve a indicação da radiação solar global como a variável mais influente na

estimativa da evapotranspiração de referência. Em estudo desenvolvido, na zona da Mata mineira, em Viçosa, MG, o primeiro autor detectou que a radiação solar e a temperatura máxima apresentaram coeficientes de correlação de 0,58 e de 0,51, respectivamente, com a estimativa obtida pelo método do Tanque Classe A.

As variáveis meteorológicas fotoperíodo e insolação, bastante associadas a emissão de energia, apresentaram valores de correlação relativamente altos (Tabela2). Para a região de Pelotas, essas duas variáveis são as mais importantes quando se considera o método de Blaney-Criddle, com valores do coeficiente de correlação de 0,75 e 0,70, respectivamente.

Muito provavelmente pela facilidade de medição, a temperatura média do ar é uma variável utilizada em muitos métodos de estimativa, mas seu valor de correlação com as estimativas não é o alto. Observa-se, na Tabela 2, que a temperatura média do ar (T) apresentou correlação igual a 0,63, no método de Penman-Monteith, e 0,67, no método de Jensen-Haise, valores estes semelhantes aos da umidade relativa do ar, porém em sentidos opostos.

No estado do Espírito Santo, Araújo et al. (2011) estimaram a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith e analisaram sua relação com as variáveis através da análise de trilha onde o coeficiente de correlação com a temperatura média do ar foi de 0,79, superado apenas pelo coeficiente da radiação solar global de 0,93.

A velocidade do vento foi uma grandeza que apresentou baixos coeficientes de correlação com a ETo em Pelotas, obtendo valores de 0,19, 0,27 e 0,34 nos métodos da Radiação Solar, Penman-Monteith e Blaney-Criddle, respectivamente. Este resultado está de acordo com aqueles observados por Caixeta (2009) e Oliveira (2009), que concluíram que a velocidade do vento apresentou baixa correlação com a evapotranspiração de referência. O primeiro autor analisou a correlação das variáveis meteorológicas com os valores de ETo estimados pelo Tanque Classe A, e o segundo com valores estimados por 15 Irrigâmetros (aparelho evapopluiométrico que possibilita medir a lâmina evapotranspirada).

Em uma análise dos componentes principais da ETo de três regiões climáticas diferentes do Centro-Sul do Ceará, Andrade et al. (2003) concluíram que as variáveis envolvidas no processo de evapotranspiração de maior significância na região de clima tropical chuvoso foram a velocidade do vento

e a umidade relativa do ar. Entretanto, no mesmo trabalho, nas estações localizadas em região de clima semiárido, a variável razão de insolação foi a que apresentou maior influência, seguida da precipitação anual e velocidade do vento.

Na região do Alto de Paranaíba-MG, Oliveira (2009) verificou que nos meses de novembro a março as correlações entre as variáveis meteorológicas e a ETo foram muito baixas, inferiores a 0,30, com exceção do mês de janeiro, em que os coeficientes de correlação foram de 0,78 para a umidade relativa do ar e em torno de 0,60 para as temperaturas máxima e mínima e radiação solar.

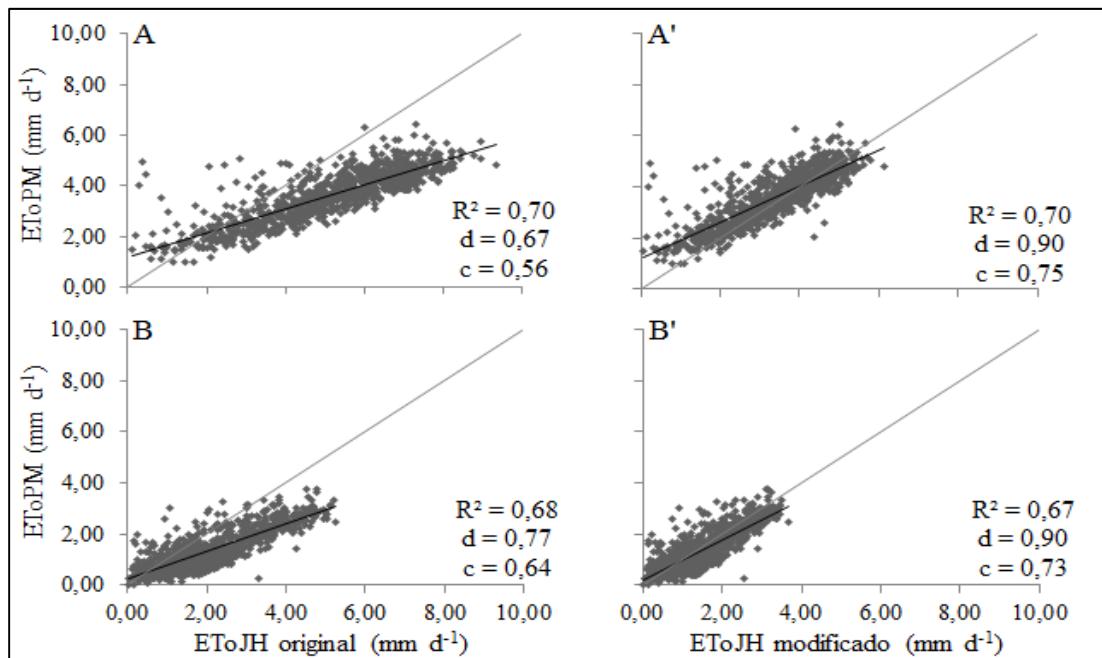
Estudos sobre a influência das variáveis meteorológicas nas estimativas da evapotranspiração de referência nas diversas regiões brasileiras mostram diferentes resultados ocasionados pela grande variabilidade climática no país. Por esta razão, estudos regionais são necessários para fornecer informações precisas às condições locais que poderão proporcionar ajustes em métodos de estimativa da ETo adequados à região em estudo.

A alta correlação da radiação solar e de outras variáveis associadas a ela com os valores da estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelo método padrão na região de Pelotas induziu a seleção por um método mais simples que utilizasse essa variável e que apresentasse um bom ajuste com o método de Penman-Monteith. Nessas condições, o método de Jensen-Haise foi aquele que melhor se adaptou a essas características. Somado a isto, a expressão do método, dada pela equação 6, permite que se substitua os coeficientes para adequá-la mais precisamente à região de Pelotas.

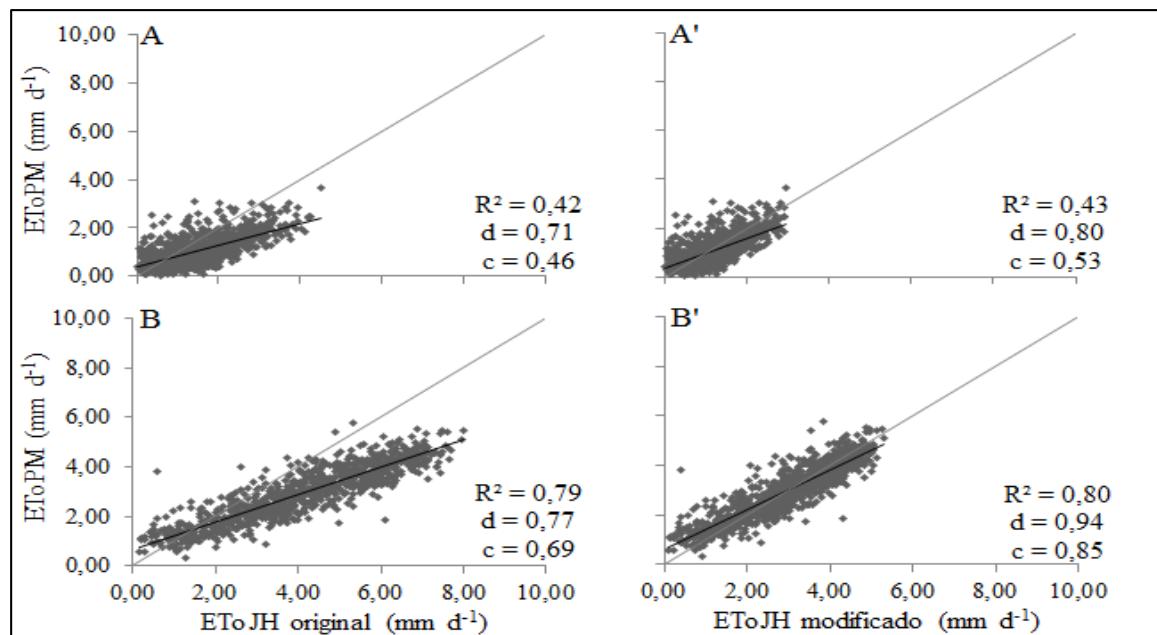
Assim, com o propósito de que o valor estimado pela expressão de Jensen-Haise seja o mais próximo ao valor obtido por Penman-Monteith, foi feita uma análise linear entre a razão  $\frac{ETo\ PM}{RS}$  e a temperatura média T. Os coeficientes da equação obtida foram utilizados para uma nova expressão de Jensen-Haise, expressa por:

$$ETo\ JHmod = Rs (0,013T + 0,176) \quad (14)$$

Para a análise linear entre a razão  $\frac{ETo\ PM}{RS}$  e a temperatura média (T) consideraram-se os dados meteorológicos compreendidos entre 1971 a 2000. Com a expressão de Jensen-Haise modificada, foi feita nova comparação do método com Penman-



**Figura 2**- Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação do método de Jensen-Haise original e do método de Jensen-Haise modificado com o método de Penman-Monteith (ET0PM) no verão (A e A') e outono (B e B'), com dados de Pelotas, RS, no período de 2001 a 2010.



**Figura 3**- Gráfico de dispersão e coeficientes da comparação do método de Jensen-Haise original e do método de Jensen-Haise modificado com o método de Penman-Monteith (ET0PM) no inverno (A e A') e primavera (B e B'), com dados de Pelotas, RS, no período de 2001 a 2010.

Monteith para validação do modelo, utilizando-se os dados do período de 2001 a 2010, em cada estação do ano, analisado segundo os critérios já citados anteriormente e mostrados na Figura 2 e 3, juntamente com os índices obtidos da equação original.

Pela Figura 2 e 3 observa-se que a dispersão dos dados não sofre grande alteração na equação modificada em relação à equação original. No entanto, identifica-se menor dispersão dos dados nos períodos de verão (Figura 2 A e A') e na primavera (Figura 3 B e B'), quando os dados encontram-se mais aglutinados, indicando melhor ajuste das comparações.

Na análise dos coeficientes estatísticos observa-se que o método modificado apresentou índice de desempenho (c) mais elevado em todas as estações do ano. Nota-se ainda, que os valores do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) sofreram pouca influência, enquanto os valores do índice de exatidão, indicada pelo índice d, apresentaram considerável aumento, conforme se verifica na Figura 2 e 3. Essa situação ocorreu porque o coeficiente  $r^2$  refere-se à aproximação dos dados das séries com os respectivos valores médios dessas séries. Os novos coeficientes da equação de Jensen-Haise produziram uma nova série, com nova média, e a relação entre as séries original e modificada com suas respectivas médias não provocou alteração na correlação de ambas com o método padrão.

Porém, o índice d referente à exatidão do método em relação ao padrão, está relacionado ao afastamento dos valores obtidos pelo método analisado em relação aos valores do método padrão, mostrou-se mais elevado para os dados obtidos pela equação de Jensen-Haise modificada. O valor do índice d mais elevado fez com que o índice de desempenho fosse superior na comparação da equação de Jensen-Haise modificada com o método padrão.

A expressão de Jensen-Haise modificada apresentou valores do índice c que elevaram a classificação do método em todas as estações: no verão, de sofrível para bom; no outono, de mediano para bom; no inverno, de mau para sofrível e na primavera, de bom para muito bom. Isto corrobora com resultados obtidos por XU et al. (2013), os quais também obtiveram melhorias na estimativa da ET<sub>0</sub> a partir da calibração local dos métodos de Turc e Priestley-Taylor.

Observa-se, na Figura 3, que o valor do índice c, na primavera (0,85) é muito próximo do valor que classifica o método com ótimo ajuste ao método padrão, e o valor do mesmo índice para o verão (0,75) é superior aos valores do índice em todos os

métodos, com exceção do método de Blaney-Criddle, cuja expressão, assim como a do método de Penman-Monteith, é bastante trabalhosa e necessita de variáveis não disponíveis em estações meteorológicas básicas. Nota-se ainda que essa melhoria ocorre justamente nas estações do ano que demandam maior necessidade de irrigação na região. Isso indica que a modificação é bastante conveniente, pois utilizando somente dados de temperatura e radiação solar, em uma expressão de simples aplicação, apresentou ajuste muito bom em relação ao método padrão de Penman-Monteith.

## CONCLUSÕES

1. As variáveis meteorológicas mais relevantes na estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas-RS são a radiação solar global e o saldo de radiação. A equação de Jensen-Haise com os coeficientes modificados,  $ET_0 \text{ JHmod} = R_s (0,013T + 0,176)$ , é uma boa alternativa para estimar a evapotranspiração de referência para Pelotas-RS, quando os valores são inferiores a 8 mm d<sup>-1</sup>, apresentando desempenho classificado como bom no verão e outono, e muito bom na primavera.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. A.; SILVEIRA, S. S.; AZEVEDO, B. M. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n.1, p.39-44, 2003.
- ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MOREIRA, G. R. Correlação entre variáveis meteorológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.5, n.2, p.96-104, 2011.
- 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*, v.11, n.3, p.293-300, 2007.
- BRIXNER, G. F. Caracterização da aptidão climática da região da Campanha do Rio Grande do Sul para a viticultura. 2013. 103p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. UFPel, Pelotas.

- CAIXETA, S. P. Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo irrigâmetro nas condições climáticas da Mata Mineira. Viçosa: UFV, 2009. 52p. Dissertação Mestrado.
- 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, v.5, n.1, p.89-97, 1977.
- CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.
- DALMAGO, G. A.; HELDWEIN, A. B.; NIED, A. H.; GRIMM, E. L.; PIVETTA, C. R. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. Ciência Rural, v.36, n.3, p.785-792, 2006.
- EAPEL Estação Agroclimatológica de Pelotas. <http://www.cpacpt.embrapa.br/agromet/estacao/index.html>. Acesso em 27 de setembro de 2011.
- KOBIYAMA, M.; VESTENA, L. R. Aplicação do método de Penman-Monteith modificado no cálculo da evapotranspiração potencial para quatro estações meteorológicas do estado do Paraná. Revista Ciências Exatas e Naturais, v.8, n.1, p.83-95, 2006.
- MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.2, p.196-202, 2010.
- MEYER, P. L. Probabilidade: Aplicações à Estatística. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1976, 391p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- 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, v.42, n.2, p.283-290, 2012.
- OLIVEIRA, E.M. Desempenho do irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência na região do Alto Paranaíba-MG. Viçosa: UFV, 2009. 75p. Dissertação Mestrado.
- OLIVEIRA, M. A. A.; CARVALHO, D. F. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédia e Campos, estado do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, n.2, p.132-135, 1998.
- PRASAD, S.; KUMAR, V. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data at Pusa. Journal of Agrometeorology, v. 15, n.1, p. 23-30, 2013.
- REIS, E. F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G. O.; PEPOZZONE, J. E. M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado do Espírito Santo no período seco. Idesia, v.25, n.3, p.75-84, 2007.
- RUHOFF, A. L.; SALDANHA, C. B.; COLLISHON, W.; UVO, C. B.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M. R. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de Cerrado e cana de açúcar. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.14, n.4, p.137-146, 2009.
- SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. Agricultural Water Management, v.97, n.5, p.635-644, 2010.
- SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.4, p.547-553, 2005.
- SOUZA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G; NETTO, A. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado do Sergipe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.6, p.633-644, 2010.
- SUPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativa de evapotranspiração de referência para região de Palotina, Estado do Paraná. Acta Scientiarum Agronomy, v.30, n.5, p.603-609, 2008.
- XU, J.Z. PENG, S.Z.; DING, J.L.; WEI, Q; YU, Y.M. Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China. Archives of Agronomy and Soil Science, v.59, n.6, p.845-858, 2013.

***Adjustment Of An Equation To Estimate Reference  
Evapotranspiration For Pelotas - RS***

***ABSTRACT***

*This work aimed to identify the most influential meteorological variables for the daily evapotranspiration estimate obtained using the Penman-Monteith method in the region of Pelotas; to select another simpler method that uses them and to propose an adjustment of its parameters or constants to the local climatic conditions in order to improve its performance considering the standard method. The correlation of the meteorological variables with the evapotranspiration estimates was performed using daily meteorological data from the Agroclimatological Station of Pelotas RS in the period between 1971 and 2010. Solar radiation and net radiation were the most influential variables in the methods that use them. Because the Jensen-Haise method uses only solar radiation and temperature data and shows a performance rate around 0.6 related compared to the standard method, it was chosen for the modification of its constants. The expression of the method with the constants adapted to the region showed a higher performance coefficient than those of the original equation for all seasons of the year, showing a  $c$  rate of 0.75 and 0.85 in summer and spring, respectively, and therefore it is appropriate for use in the Pelotas region.*

**Key-words:** correlation, meteorological variables, Penman-Monteith, Jensen-Haise