

MÉDIA DIÁRIA DO DÉFICIT DE PRESSÃO DE SATURAÇÃO DO VAPOR D'ÁGUA DO AR E SUA INFLUÊNCIA NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO MODELO DE PENMAN-MONTEITH (FAO 56) EM PIRACICABA - SP

GUSTAVO B. LYRA¹, ANTONIO R. PEREIRA², GILBERTO C. SEDIYAMA³,
GUILHERME B. LYRA⁴, ALAILSON V. SANTIAGO¹, MARCOS V. FOLEGATTI⁵

RESUMO: Utilizando-se como padrão as medidas lisimétricas de um gramado, avaliaram-se os resultados de estimativas de ET_o obtidas com $D_{ar_méd}$ oriundos de 14 métodos para seu cálculo. Tais comparações permitiram separar os métodos de cálculo de $D_{ar_méd}$ em três grupos, ou seja: um grupo resultou sempre em superestimativa de ET_o ; em outro, a tendência foi de sempre subestimar, e no último a tendência foi de superestimar valores baixos ($< 4,5 \text{ mm dia}^{-1}$) e de subestimar valores altos de ET_o . Não foram observadas diferenças significativas (teste t; $p < 0,05$) de ET_o , em função dos métodos de $D_{ar_méd}$ ao utilizar a média horária da temperatura e/ou umidade relativa do ar em relação aos determinados com a média dos valores máximo e mínimo desses elementos. Dos métodos propostos pelo boletim FAO56, apenas o que utilizou a umidade relativa média para calcular a pressão parcial de vapor d'água (e_a) apresentou estimativa satisfatória. As melhores estimativas de ET_o foram obtidas com os métodos de $D_{ar_méd}$, que utilizaram média da temperatura do ar na determinação da pressão de saturação (e_s), e média da umidade relativa para e_a . A utilização do déficit de pressão de saturação em um único horário (9 e 10 h local), como representativo para o $D_{ar_méd}$, mostrou-se boa alternativa na estimativa da ET_o , para as condições climáticas de Piracicaba - SP.

PALAVRAS-CHAVE: pressão de saturação do vapor d'água, equação combinada, análise de sensibilidade.

DAILY AVERAGE OF THE SATURATION-VAPOR-PRESSURE DEFICIT OF THE AIR AND ITS INFLUENCE UPON THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BY PENMAN-MONTEITH MODEL (FAO56) IN PIRACICABA, SP, BRAZIL

SUMMARY: The results of the evapotranspiration obtained with the D_{air_avg} proceeding from 14 methods were evaluated, by using the lysimetric measures of a sward. These comparisons allowed to separate the D_{ar_avg} calculating methods into three groups: a group always resulted into an overestimate ET_o ; in other one always tended to underestimating the ET_o ; and in the last tended to overestimating the low values ($< 4.5 \text{ mm day}^{-1}$), while underestimating the high values of ET_o . No significant statistical differences were observed (t test; $p < 0.05$) in ET_o as a function of the D_{air_avg} methods, when using the hourly average of the temperature and/or the air relative humidity in relation to those determined with the average of the maximum and minimum values of these elements. Among the methods proposed by paper FAO56, just the one using the average relative humidity to calculate the actual pressure (e_a) showed a satisfactory estimate. The best estimates of ET_o were obtained with the D_{air_avg} methods using the average of the air temperature in the determination of the saturation pressure (e_s) and the average of the relative humidity for the actual pressure (e_a). The use of saturation-vapor-pressure deficit of the air at a single time (from 9 or 10 a.m. local) as a representative of D_{air_avg} showed to be a satisfactory alternative in estimating the ET_o under the climatic conditions of Piracicaba, SP, Brazil.

KEYWORDS: saturation vapor pressure, combination equation, sensitivity analysis

¹ Meteorologista, Doutorando em Física do Ambiente Agrícola, Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba - SP, e-mail: gblyra@esalq.usp.br

² Eng° Agrônomo, Prof. Titular, Depto. de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, e-mail: arpereir@esalq.usp.br

³ Eng° Agrônomo, Prof. Titular, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG, e-mail: sediyama@ufv.br

⁴ Eng° Agrônomo, Doutorando em Produção Vegetal, LEA/UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, e-mail: gbastos@uenf.br

⁵ Eng° Agrônomo, Prof. Associado, Depto. de Engenharia Rural, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, e-mail: mvfolega@esalq.usp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 12-6-2003

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 21-5-2004

INTRODUÇÃO

Um elemento meteorológico importante para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) por Penman-Monteith é o déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar (D_{ar}). O método utilizado na determinação da média diária de D_{ar} ($D_{ar_méd}$) pode introduzir erros significativos nos valores de ET_o diária (DOORENBOS & PRUITT, 1975). Isso se deve, principalmente, à não-linearidade da relação entre pressão de saturação do vapor d'água (e_s) e temperatura do ar.

Vários métodos de cálculo de $D_{ar_méd}$ são descritos na literatura (JENSEN, 1974; DOORENBOS & PRUITT, 1975; SADLER & EVANS, 1989; JENSEN et al., 1990; HOWELL & DUSEK, 1995; PEREIRA et al., 1997 a; ALLEN et al., 1998), sendo que alguns não são práticos, e suas estimativas diferem estatisticamente entre si (PEREIRA et al., 1997 b). Diferenças de -26 a +3% entre os valores de $D_{ar_méd}$ calculados com dados horários e estimados por métodos aproximados foram determinados por JENSEN (1974). Utilizando cinco métodos, DOORENBOS & PRUITT (1975) relatam subestimativa de 32% em média. Aqueles propostos pelo manual ASCE n° 70 (JENSEN et al., 1990) apresentam erros na faixa de 4,4% a 36,4% (HOWELL & DUSEK, 1995).

PEREIRA et al. (1997 b) avaliaram a possibilidade de utilização de apenas um valor horário de D_{ar} (entre 9 e 10 h local), como representativo para $D_{ar_méd}$, em Piracicaba - SP. Observaram que os valores de D_{ar} das 10 h superestimaram o $D_{ar_méd}$ em 11,7%, enquanto os das 9 h subestimaram em 27,5%, em média.

Estudando o efeito de 15 métodos de estimativa de $D_{ar_méd}$ sobre a estimativa de ET_o , usando a equação de Penman modificada por Bavel (BAVEL, 1966), SADLER & EVANS (1989) relatam variações de 8 a 17% em relação ao melhor método de $D_{ar_méd}$ na determinação de ET_o . PEREIRA et al. (1996), baseados em PRUITT & DOORENBOS (1977), citam erros relativos de 10 a 50% no inverno, e em torno de 10% no verão, com alguns casos extremos acima de 100%, na estimativa de ET_o pela equação original de Penman, ao utilizarem seis métodos de cálculo de $D_{ar_méd}$.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência de métodos para a determinação da média diária do déficit de pressão de saturação do ar, inclusive aqueles descritos em ALLEN et al. (1998), na estimativa da evapotranspiração de referência, padrão FAO56.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de 1^o-01 a 31-12-1996, numa área de 3.150 m² (35 x 90 m), localizada na Fazenda Areão, ESALQ/USP, em Piracicaba - SP (latitude 22°42'S; longitude 47°30'W e altitude de 546 m). Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa (subtropical úmido, com chuvas no verão e inverno seco). O solo local foi classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), com declividade média de 2,3%, e vegetado com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé) (SANTIAGO et al., 2002).

A evapotranspiração de referência diária foi determinada pela variação da massa de um lisímetro de pesagem gramado (ET_{o_lis} , mm d⁻¹), descrito em SILVA et al. (1999 b). Detalhes do seu manejo são apresentados por SILVA et al. (1999 a). Devido a problemas operacionais com o lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento, como descrito por PEREIRA et al. (2002), foram selecionados apenas 141 dias para as análises.

A estimativa de ET_o diária (mm d⁻¹) seguiu as parametrizações do modelo de Penman-Monteith descritas em ALLEN et al. (1998), ou seja:

$$ET_o = \frac{0,408 s (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{méd} + 273} u_2 D_{ar_méd}}{s + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

em que,

$T_{méd}$ - temperatura média do ar a 2 m de altura [$T_{méd} = (T_{máx} + T_{mín})/2$], °C;

$T_{máx}$ e $T_{mín}$ - temperatura máxima e mínima do ar, respectivamente, °C;

s - derivada da curva de pressão de saturação do vapor do ar no ponto de $T_{méd}$ [$s = 4098 (0,6108 \exp(17,27 T_{méd} / 237,3 + T_{méd})) / (T_{méd} + 237,3)^2$], kPa °C⁻¹;

R_n - saldo de radiação total diário estimado (ALLEN et al., 1998), MJ m⁻² dia⁻¹;

G - fluxo de calor no solo ($G = 0$), na escala diária (ALLEN et al., 1998), MJ m⁻² dia⁻¹;

γ - coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹;

u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;

$D_{ar_méd}$ - média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar, kPa.

O γ foi admitido como constante e igual a 0,0633 kPa °C⁻¹, devido à pequena amplitude da pressão atmosférica local ao longo do ano, com um máximo de 95,7 kPa em julho e mínimo de 95,03 kPa em janeiro. Assumiu-se o calor latente de evaporação da água igual a 2,45 MJ kg⁻¹, e os métodos de estimativa de $D_{ar_méd}$ analisados foram divididos em seis grupos (Tabela 1).

Uma estação meteorológica automática instalada na área experimental forneceu os elementos meteorológicos: velocidade do vento (O14A, MET ONE INSTRUMENTS, Grants Pass, OR), temperatura e umidade relativa do ar (HMP35C, VAISALA, Woburn, MA) coletados a 2 m de altura. Foram armazenados valores médios de 30 min, a partir de medidas obtidas com frequência de 1 Hz, e também os valores extremos de temperatura e umidade relativa do ar, por um *datalogger* (CR10X, CAMPBELL SCIENTIFIC Inc., Logan, UT).

Na avaliação da influência dos métodos de cálculo de $D_{ar_méd}$, na estimativa de ET_o pela eq.(1), os seguintes coeficientes estatísticos foram utilizados: média aritmética, variância, coeficiente de determinação (R^2), interceptação (a) e coeficiente angular (b) da regressão linear entre ET_o , medida pelo lisímetro (X) e estimada por Penman-Monteith (Y). Utilizaram-se, também, o erro-padrão de estimativa (EPE) e o coeficiente de sensibilidade relativa (S_r). Efetuaram-se os testes t e F para médias e variâncias de ET_o , respectivamente, em função dos vários métodos e para os valores medidos pelo lisímetro.

Na análise de sensibilidade da eq.(1), utilizou-se a metodologia descrita por McCUEN (1973), MELLO (1998) e HUPET & VANCLOOSTER (2001). A eq.(1) necessita de diversos elementos de entrada que podem introduzir erros. Uma forma geral de se expressar ET_o é a seguinte:

$$ET_o = f(v_1 + v_2 + \dots + v_n) \quad (2)$$

em que, v_1, v_2, \dots, v_n , são os n elementos de entrada.

Se Δv_i é a perturbação do elemento i , então a perturbação em ET_o como resultado da perturbação de todos os elementos, pode ser quantificada por:

$$ET_o + \Delta ET_o = f(v_1 + \Delta v_1 + v_2 + \Delta v_2 + \dots + v_n + \Delta v_n) \quad (3)$$

TABELA 1. Descrição dos grupos e métodos de estimativa da média diária do déficit de pressão de saturação do ar ($D_{ar_méd}$).

Grupo e Descrição	Métodos	Referência
I - Temperatura média		
Método 1	$e_s(T_{méd}) - e_s(T_{mín})$	SADLER & EVANS (1989); PEREIRA et al. (1997 a)
Método 1a	$e_s(T_{24}) - e_s(T_{mín})$	
II - Temperatura média e umidade relativa média		
Método 2	$e_s(T_{méd})(1 - 0,01 UR_{méd})$	DOORENBOS & PRUITT (1977); SADLER & EVANS (1989); JENSEN et al. (1990); HOWELL & DUSEK (1995); PEREIRA et al. (1996); PEREIRA et al. (1997 a)
Método 2a	$e_s(T_{24})(1 - 0,01 UR_{24})$	SADLER & EVANS (1989)
III - Pressão de saturação média		
Método 3	$\{[e_s(T_{máx}) + e_s(T_{mín})] / 2\} - e_s(T_{mín}) 0,01 UR_{máx}$	FAO56 (ALLEN et al., 1998)
Método 4	$\{[e_s(T_{máx}) + e_s(T_{mín})] / 2\} (1 - 0,01 UR_{méd})$	SADLER & EVANS (1989); FAO56 (ALLEN et al., 1998)
Método 4a	$\{[e_s(T_{máx}) + e_s(T_{mín})] / 2\} (1 - 0,01 UR_{24})$	
Método 5	$[e_s(T_{máx})(1 - 0,01 UR_{mín}) + e_s(T_{mín})(1 - 0,01 UR_{máx})] / 2$	SADLER & EVANS (1989); HOWELL & DUSEK (1995); PEREIRA et al. (1997 a); FAO56 (ALLEN et al., 1998)
IV - Média do déficit de pressão		
Método 6	$(D_{ar_máx} + D_{ar_mín}) / 2$	SADLER & EVANS (1989)
Método 7	$\sum_{i=1}^{24} \frac{D_{ar_i}}{24}$	SADLER & EVANS (1989); PEREIRA et al. (1997 a)
V - Média da pressão parcial		
Método 8	$e_s(T_{méd}) - e_{a,méd}$	
Método 8a	$e_s(T_{24}) - e_{a,24}$	
VI - Medição em um único horário		
Método 9	$e_s(T_9)(1 - 0,01 UR_9)$	PEREIRA et al. (1997 b)
Método 10	$e_s(T_{10})(1 - 0,01 UR_{10})$	PEREIRA et al. (1997 b)
e_s - pressão de saturação do ar [$e_s = 0,6108 \exp(17,27T) / (237,3 + T)$], kPa;	T_{10} - temperatura do ar das 10 horas local, °C;	
$e_{a,méd}$ - média diária da pressão parcial de vapor máxima e mínima, kPa;	$UR_{méd}$ - média diária da umidade relativa máxima e mínima do ar, %;	
$e_{a,24}$ - média diária de 24 valores horários da pressão parcial de vapor, kPa;	UR_{24} - média diária de 24 valores horários da umidade relativa do ar, %;	
$T_{méd}$ - média diária da temperatura máxima e mínima do ar, °C;	$UR_{máx}$ - umidade relativa máxima do ar, %;	
T_{24} - média diária de 24 valores horários da temperatura, °C;	$UR_{mín}$ - umidade relativa mínima do ar, %;	
$T_{máx}$ - temperatura máxima do ar, °C;	UR_9 - umidade relativa do ar das 9 horas local, %;	
$T_{mín}$ - temperatura mínima do ar, °C;	UR_{10} - umidade relativa do ar das 10 horas local, %;	
T_9 - temperatura do ar das 9 horas local, °C;	$D_{ar_mín}$ - déficit de pressão de saturação mínimo, kPa;	
	$D_{ar_máx}$ - déficit de pressão de saturação máximo, kPa.	

Expandindo-se a eq.(3) em uma série de Taylor e ignorando os termos de segunda ordem e as potências maiores, pode-se escrever:

$$\Delta ET_o = \frac{\partial ET_o}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial ET_o}{\partial v_2} \Delta v_2 + \dots + \frac{\partial ET_o}{\partial v_n} \Delta v_n \quad (4)$$

em que as derivadas parciais definem a sensibilidade da estimativa para cada elemento i (v_i). Esses coeficientes de sensibilidade são sensíveis às magnitudes relativas de ET_o e v_i . A eq.(4) assume que a perturbação de cada v_i é independente daquela dos outros elementos. Embora haja correlação de v_i e ET_o , assume-se que não há correlação entre os elementos (HUPET & VANCLOOSTER, 2001). No caso do déficit de pressão de saturação, objetivo deste estudo, um coeficiente de sensibilidade relativa adimensional (S_r), de acordo com McCUEN (1973), pode ser expresso da seguinte forma:

$$S_r = \left(\frac{\partial ET_o}{\partial D_{ar_méd}} \right) \frac{D_{ar_méd}}{ET_o} \quad (5)$$

Diferenciando-se a eq.(1) com respeito a $D_{ar_méd}$ e substituindo-se na eq.(5), obtém-se:

$$S_r = \left\{ 900 \frac{\gamma u_2}{[s + \gamma(1 + 0,34 u_2)](T_{méd} + 273)} \right\} \frac{D_{ar_méd}}{ET_o} \quad (6)$$

Em cada dia analisado, há um valor de S_r para cada método de estimativa de $D_{ar_méd}$. Quanto menor o S_r , menor será o erro repassado à ET_o pelo método de estimativa de $D_{ar_méd}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média da evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{o_lis}) foi 3,56 mm dia⁻¹ com variância de 1,85 mm dia⁻¹ (Tabela 2), enquanto as médias estimadas de ET_o por Penman-Monteith FAO56 (PM-FAO56), utilizando os diversos métodos de cálculo da média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água, variaram entre 3,36 (método 9) e 4,19 mm dia⁻¹ (método 3). Com exceção do método 9, que subestimou em 5,52% a ET_{o_lis} , todos os outros métodos a superestimaram de 1,43% (método 2a) a 17,67% (método 3). As médias de ET_o dos métodos 3, 5 e 6 diferiram estatisticamente da ET_{o_lis} pelo teste t ($p < 0,05$), sendo os métodos 3 e 5 recomendados pelo boletim FAO56.

As variâncias de ET_o estimadas ficaram entre 1,19 mm dia⁻¹ (método 1) a 1,83 mm dia⁻¹ (método 10). As variâncias das ET_o estimadas para seis métodos apresentaram diferenças significativas com relação à variância do lisímetro pelo teste F a $p < 0,05$ (Tabela 2). Porém, seus valores não se afastaram muito do valor observado do lisímetro. Isso mostra que o manejo do lisímetro foi adequado.

Em trabalho similar, MELLO (1998) avaliou a influência dos métodos 1; 1a; 2; 2a e 5 sobre a estimativa dos valores de ET_o para Córdoba, Espanha. Independentemente do método, todos subestimaram de 2,25% a 17,64% a ET_{o_lis} . A variância de ET_{o_lis} (4,26 mm dia⁻¹) foi superior a dos valores estimados (1,65 a 2,28 mm dia⁻¹). Problemas no manejo do lisímetro foi uma provável causa atendida por MELLO (1998).

O erro-padrão de estimativa (EPE) dá pesos iguais às diferenças absolutas entre valores medidos e estimados. O EPE variou entre 0,40 (método 2a) e 0,80 mm d⁻¹ (método 3). A ET_o estimada em função dos métodos, utilizando a média horária da temperatura e/ou umidade relativa do ar (1a; 2a; 4a, e 8a) resultou em menores valores de EPE, em comparação aos seus híbridos com média dos valores máximo e mínimo desses elementos (métodos 1; 2; 4, e 8). Entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre esses métodos (teste t; $p < 0,05$). Os métodos do grupo VI obtiveram erro-padrão de estimativa entre os menores determinados, sendo de 0,44 (método 9) e 0,50 mm dia⁻¹ (método 10). Dos métodos propostos pelo FAO56, apenas o EPE do método 4 (0,48 mm dia⁻¹) se encontrou na faixa dos

menores valores, enquanto os métodos 3 e 5 apresentaram os maiores valores observados, sendo, respectivamente, 0,80 e 0,78 mm dia⁻¹.

TABELA 2. Média aritmética (mm dia⁻¹) e variância (mm dia⁻¹) da evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro e estimada pela equação de Penman-Monteith (FAO56), utilizando os diferentes métodos de determinação do $D_{ar_méd}$. Erro-padrão de estimativa (EPE, mm dia⁻¹), sensibilidade relativa (Sr), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente angular (b) e interceptação (a) da regressão linear entre os valores estimados e medidos, para os métodos avaliados.

Método ⁺	Média	Variância	EPE	Sr	a (mm dia ⁻¹)	b	R ²
Lisímetro	3,56	1,85					
Método 1	3,85	1,19**	0,53	0,31	1,1198 ± 0,0741	0,7682 ± 0,0195	0,9175
Método 1a	3,78	1,23**	0,50	0,29	1,0135 ± 0,0786	0,7778 ± 0,0206	0,9103
Método 2	3,71	1,32**	0,43	0,28	0,8224 ± 0,0742	0,8119 ± 0,0195	0,9253
Método 2a	3,61	1,41	0,40	0,25	0,6321 ± 0,0791	0,8367 ± 0,0208	0,9206
Método 3	4,19*	1,31**	0,80	0,36	1,3764 ± 0,0941	0,7902 ± 0,0247	0,8795
Método 4	3,79	1,33**	0,48	0,29	0,9012 ± 0,0782	0,8122 ± 0,0205	0,9178
Método 4a	3,70	1,43	0,45	0,27	0,7190 ± 0,0856	0,8380 ± 0,0225	0,9085
Método 5	4,17*	1,43	0,78	0,36	1,2269 ± 0,0983	0,8269 ± 0,0258	0,8800
Método 6	4,16*	1,43	0,77	0,35	1,2296 ± 0,0977	0,8248 ± 0,0257	0,8806
Método 7	3,82	1,46	0,51	0,29	0,8221 ± 0,0908	0,8421 ± 0,0238	0,8990
Método 8	3,78	1,40**	0,48	0,29	0,8334 ± 0,0856	0,8278 ± 0,0225	0,9065
Método 8a	3,70	1,44	0,44	0,27	0,7044 ± 0,0837	0,8423 ± 0,0220	0,9130
Método 9	3,36	1,72	0,44	0,18	—	0,9233 ± 0,0239	0,9145
Método 10	3,78	1,83	0,50	0,27	0,4317 ± 0,1049	0,9413 ± 0,0275	0,8928

* A média do valor estimado difere estatisticamente da média do lisímetro pelo teste t ($p < 0,05$)

** A variância do valor estimado difere estatisticamente da variância dos valores do lisímetro pelo teste F ($p < 0,05$)

— Interceptação não significativa ($p < 0,05$)

⁺ Conforme descrito na Tabela 1

MELLO (1998) encontrou valores de EPE superiores aos determinados no presente trabalho, variando de 0,80 (método 5) a 1,25 mm dia⁻¹ (método 2a). Aqui, o menor valor de EPE dos métodos similares aos avaliados por MELLO (1998) foi o do método 2a (0,40 mm dia⁻¹), e o maior foi obtido pelo método 5 (0,78 mm dia⁻¹). Porém, também não foram observadas diferenças significativas entre ET_o em função dos métodos de $D_{ar_méd}$, utilizando a média horária em relação aos com média dos valores máximo e mínimo da temperatura e/ou umidade relativa do ar.

Pela análise do coeficiente de sensibilidade relativa (Sr), observou-se que a ET_o estimada foi menos sensível ao método 9 (0,18) e mais sensível aos métodos 3 e 5 (0,36). Esses resultados significam que erros de 10% na estimativa do $D_{ar_méd}$ implica incremento de 1,8% na ET_o pelo método 9 e de 3,6% no caso dos métodos 3 e 5. Não houve Sr negativo, o que indicaria redução na ET_o com incremento no $D_{ar_méd}$.

Esses valores são semelhantes àqueles encontrados por SAXTON (1975), para a equação de Penman ($0,20 \leq Sr \leq 0,30$), e por MELLO (1998) e BASELGA (1990), para o método de Penman-Monteith, cujos valores encontrados foram, respectivamente, 0,32 a 0,41 e 0,25 a 0,50.

Em termos de comparação entre valores medidos e preditos por modelos, WILLMOTT (1981) sugere que sejam utilizados a interceptação (a) e o coeficiente angular (b) da regressão entre valores observados e estimados, bem como uma análise gráfica da dispersão dos valores em torno da reta 1:1. Quanto mais próximo de 1 for o valor do coeficiente angular e menor interceptação, melhor ajuste do modelo.

Os coeficientes de determinação (R^2) entre o valor medido e estimado (Tabela 2) foram elevados, ficando entre 0,8800 e 0,9253, para os métodos 5 e 2, respectivamente. Os métodos dos grupos II, V e VI obtiveram coeficientes angulares próximos de 1, variando entre $0,8119 \pm 0,0195$ (método 2) e $0,9413 \pm 0,0275$ (método 10), com baixos valores de interceptação, entre $0,4317 \pm 0,1049$ (método 10) e $0,8334 \pm 0,0856 \text{ mm dia}^{-1}$ (método 8), sendo a interceptação do método 9 não-significativa ($p < 0,05$). Nos métodos 3; 5 e 6, o coeficiente angular esteve na mesma faixa dos grupos supracitados, com exceção do método 3 ($0,7902 \pm 0,0247$), que se afastou mais do ideal, porém os valores da interceptação foram os mais elevados entre todos, acima de $1,2 \text{ mm dia}^{-1}$. O grupo I apresentou altos valores da interceptação e coeficientes angulares afastados do ideal (Tabela 2).

Apesar de os métodos do grupo VI apresentarem boas estimativas de ET_o , deve-se tomar cuidado na sua utilização, principalmente por esses poderem proporcionar erros não-sistemáticos elevados; entretanto, é uma alternativa prática para locais com condições climáticas similares às da área em estudo.

O método 7 obteve coeficiente angular de $0,8421 \pm 0,0238$ e interceptação de $0,8221 \pm 0,0908 \text{ mm dia}^{-1}$. Essa é a forma mais correta para o cálculo do $D_{ar_méd}$, devido à pressão de saturação do vapor d'água (e_s) ser função exponencial da temperatura do ar. Entretanto, sua utilização para a estimativa de ET_o superestimou os valores menores que $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$ e subestimou os maiores. Esse resultado se deve às parametrizações dos outros elementos da equação de PM-FAO56. Assim, nem sempre o método que melhor estima $D_{ar_méd}$ é o mais indicado para ser utilizado em PM-FAO56.

ALLEN et al. (1998) sugerem que a pressão de saturação média seja calculada pela média aritmética da pressão de saturação à temperatura mínima e máxima do ar ($[e_s(T_{máx}) + e_s(T_{mín})]/2$), como nos métodos do grupo IV, com o intuito de minimizar o problema da não-linearidade da curva de pressão de saturação. Contudo, apenas os métodos que utilizaram a média da umidade relativa do ar na pressão parcial (método 4 e 4a) apresentaram valores do coeficiente angular próximos de 1 e da interceptação baixos (Tabela 2).

A ET_o estimada mostrou três tendências em função do método de $D_{ar_méd}$ utilizado (Figura 1). Houve a superestimativa dos valores da ET_o menores que $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$, em média, e subestimativa dos valores maiores, utilizando os métodos 1; 1a; 2; 2a; 4; 4a; 7; 8 e 8a. Nos métodos 3; 5; 6 e 10, a tendência foi sempre de superestimar, enquanto no método 9 houve sempre subestimativa.

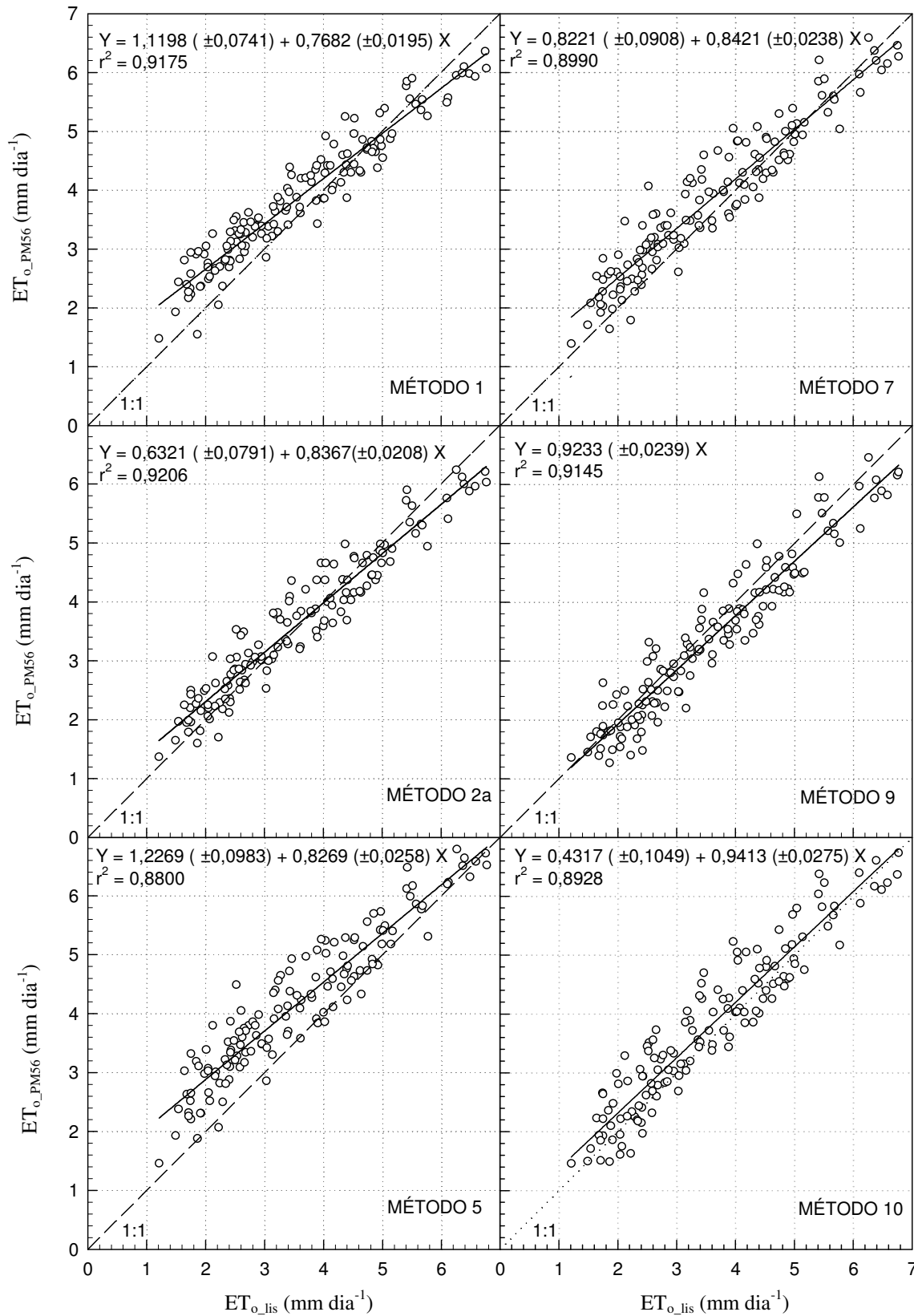


FIGURA 1. Relação entre ET_o medida pelo lisímetro (ET_{o_lis}) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith FAO56 (ET_{o_PM56}), em função dos métodos 1; 2a; 5; 7; 9 e 10 (conforme descrito na Tabela 1), para a determinação da média diária do déficit de pressão de saturação do ar.

CONCLUSÕES

Os métodos de estimativa da média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar afetaram de forma significativa a determinação da evapotranspiração de referência padrão FAO56, de modo que se torna necessário determinar os que melhor estimem a ET_o para condições climáticas específicas.

Não necessariamente o melhor método de estimativa da média do déficit de pressão de saturação, como no caso do método utilizando valores horários, foi o mais indicado para ser utilizado na equação de PM-FAO56, devido às parametrizações dos outros elementos de entrada do modelo.

Independentemente de $D_{ar_méd}$ ser determinado utilizando a média horária da temperatura e/ou umidade relativa do ar ou seus híbridos, com a média dos valores máximo e mínimo desses elementos, a estimativa de ET_o não apresentou diferenças significativas.

Dos métodos sugeridos pelo boletim FAO56, apenas o que utilizou a umidade relativa média do ar para estimar a pressão parcial de vapor se apresentou entre os que proporcionaram melhor estimativa de ET_o . Os métodos que utilizaram apenas um valor horário de D_{ar} (9 e 10 h local), como representativo para $D_{ar_méd}$ e os em função das médias diárias da temperatura e umidade relativa do ar foram os que apresentaram as melhores estimativas de ET_o , seguidos dos métodos estimados com a pressão parcial média e temperatura do ar média para e_s . Os métodos que utilizaram a pressão de saturação à temperatura mínima do ar, para determinação da pressão parcial de vapor, não apresentaram boas estimativas para as condições climáticas da área em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56)
- BASELGA, J. *The feasibility of using remotely sensed inputs for the estimation of roughness length and zero-plane displacement of corn*. 1990. 119 f. Tese (Mestrado em Irrigação) - Utah State University, Logan, 1990.
- BAVEL, C.H.M. Van. Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. *Water Resource Research*, Washington, v.2, p.455-67, 1966.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. *Crop water requirements*. Rome: FAO, 1975. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).
- HOWELL, T.A.; DUSEK, D.A. Comparison of vapor-pressure-deficit calculation methods - Southern High Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.121, n.2, p.191-8, 1995.
- HUPET, F.; VANCLOOSTER, M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 243, p.192-204, 2001.
- JENSEN, M.E. *Consumptive use of water and irrigation requirements*. New York: ASCE, 1974. 215 p. (Reports of Technical Committee on Irrigation Water Requirements)
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York: ASCE, 1990. 332 p. (Manual, 70).
- McCUEN, R. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.18, p.37-53, 1973.

- MELLO, J.L.P. *Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO*. 1998. 78 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 1998.
- PEREIRA, A.R.; MANIERO, M.A.; VILLA NOVA, N.A.; BARBIERI, V. Penman's wind function for a tropical humid climate. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.4, n.1, p.69-75, 1996.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997a. 183 p.
- PEREIRA A.R.; SENTELHAS, P.S.; MARCHI, J.L. Estimativa do déficit de saturação médio diário. In: REUNIÓN ARGENTINA Y LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 7., 1997. *Anais...* Buenos Aires: Asociación Argentina de Agrometeorología, 1997 b. p.15-16.
- PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.10, n.1, p.51-6, 2002.
- PRUITT, W.O.; DOORENBOS, J. Empirical calibration, a requisite for evapotranspiration formulae based on daily or long mean climatic data? In: INTERNATIONAL ROUND TABLE CONFERENCE ON "EVAPOTRANSPIRATION", 1977, Budapeste. *Anais...* Budapeste: International Commission on Irrigation and Drainage, 1977. p.1-20.
- SADLER, E.J.; EVANS, D.E. Vapor pressure deficit calculations and their effect on the equation combination equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 49, n.1, p.55-80, 1989.
- SANTIAGO, A.V.; PEREIRA, A.R.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO56), nas escalas mensal e decenal. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.10, n.1, p.57-66, 2002.
- SAXTON, K. E. Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.15, n. , p.343-53, 1975.
- SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.7, n.1, p.19-23, 1999 a.
- SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.7, n.1, p.53-8, 1999 b.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, Palm Beach, v.2, n.2, p.184-94, 1981.